

*Sociedad Española de Acústica*

# La percepción auditiva y el paisaje sonoro

Dr. Robert Barti Domingo

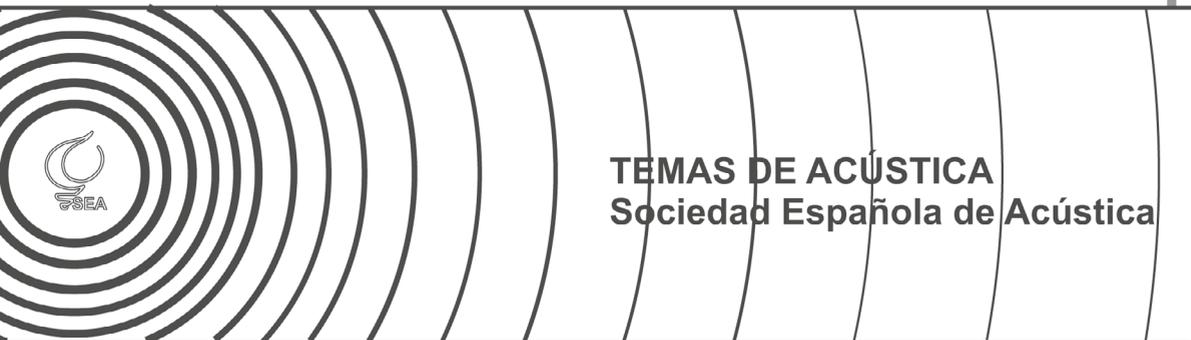


TEMAS DE ACÚSTICA  
Sociedad Española de Acústica

*Sociedad Española de Acústica*

**La percepción auditiva  
y el paisaje sonoro**

Dr. Robert Barti Domingo



**TEMAS DE ACÚSTICA**  
**Sociedad Española de Acústica**

La percepción auditiva y el paisaje sonoro

© Sociedad Española de Acústica

© Dr. Robert Barti Domingo

ISBN: 978-84-87985-34-8

Colección: Temas de Acústica-Volumen n.º 7

Edita: Sociedad Española de Acústica

Web: [www.sea-acustica.es](http://www.sea-acustica.es)

e-mail: [secretaria@sea-acustica.es](mailto:secretaria@sea-acustica.es)

Editor: Jaime Ramis Soriano

Edición: Noviembre 2023

Maquetación: DiScript Preimpresión, S. L.

[www.discript.net](http://www.discript.net)

# Índice

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo 1. Introducción</b> .....                                   | 14 |
| <b>Capítulo 2. El oído humano</b> .....                                 | 17 |
| 2.1. Anatomía del oído .....  | 19 |
| 2.1.1. Oído externo.....  | 20 |
| 2.1.1.1. Pabellón auditivo.....   | 20 |
| 2.1.1.2. Canal auditivo .....   | 23 |
| 2.1.1.3. Función de transferencia relacionada con la cabeza .....       | 24 |
| 2.1.1.4. Influencia del tímpano en la sensibilidad auditiva .....       | 26 |
| 2.1.2. Oído medio.....  | 28 |
| 2.1.2.1. La adaptación de impedancias .....                             | 30 |
| 2.1.2.2. Respuesta en frecuencia del oído medio.....                    | 31 |
| 2.1.2.3. Mecanismo de autoprotección del oído medio .....               | 32 |
| 2.1.3. Oído interno .....   | 34 |
| 2.1.3.1. Membrana basilar.....  | 35 |
| 2.1.3.2. El nervio auditivo.....  | 38 |
| 2.1.3.3. Células ciliadas .....   | 39 |
| 2.1.3.4. Pérdida temporal y permanente de la sensibilidad del oído..... | 42 |
| 2.1.3.5. Detección de la frecuencia de un sonido.....                   | 43 |
| <b>Capítulo 3. Percepción del sonido</b> .....                          | 46 |
| 3.1. Introducción .....   | 46 |
| 3.1.1. Teoría de la posición (o resonancia).....                        | 46 |
| 3.1.2. Teoría de la frecuencia .....                                    | 48 |
| 3.1.3. Percepción de la tonalidad del sonido.....                       | 49 |
| 3.1.4. Percepción de la duración del sonido.....                        | 50 |
| 3.1.5. Efecto Haas .....  | 51 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1.6. Fenómeno de enmascaramiento .....                              | 54        |
| 3.1.6.1. Enmascaramiento de tonos por señales de banda ancha .....    | 54        |
| 3.1.6.2. Enmascaramiento de tonos por señales de banda estrecha ..... | 55        |
| 3.1.6.3. Enmascaramiento de un tono por otro tono .....               | 56        |
| 3.1.6.4. Enmascaramiento temporal .....                               | 58        |
| 3.1.6.5. Banda crítica. Selectividad auditiva tonal .....             | 60        |
| 3.1.6.5.1. Tonos muy juntos. Fluctuación .....                        | 61        |
| 3.1.6.5.2. Tonos ligeramente separados. Rugosidad .....               | 61        |
| 3.1.6.5.3. Tonos individuales separados .....                         | 61        |
| 3.1.7. Sonidos de baja frecuencia e infrasonidos .....                | 61        |
| 3.1.7.1. Infrasonidos naturales .....                                 | 62        |
| 3.1.8. Interpretación del sonido .....                                | 65        |
| 3.1.8.1. Sensaciones sonoras .....                                    | 66        |
| 3.1.8.1.1. Magnitudes físicas .....                                   | 68        |
| 3.1.8.1.2. Sentidos .....   | 68        |
| 3.1.8.1.3. Psique .....   | 68        |
| 3.1.8.1.4. Evaluación sonora .....                                    | 69        |
| 3.1.8.1.5. Reconocimiento del sonido .....                            | 69        |
| 3.1.9. Influencia de la visión sobre la audición .....                | 70        |
| 3.1.9.1. Los sonidos en entornos urbanos .....                        | 70        |
| 3.1.9.2. Hábitos acústicos de riesgo .....                            | 72        |
| 3.1.9.3. Influencia perceptual y cognitiva .....                      | 76        |
| 3.1.9.4. Preferencias visuales y auditivas .....                      | 78        |
| 3.1.10. El paseo sonoro .....   | 80        |
| 3.1.10.1. Cómo reconocer un ambiente acústico confortable .....       | 81        |
| <b>Capítulo 4. Medida de la sensibilidad auditiva .....</b>           | <b>84</b> |
| 4.1. El test audiométrico .....                                       | 84        |
| 4.1.1. Audiometría por vía aérea .....                                | 85        |
| 4.1.2. Audiometría por vía ósea .....                                 | 85        |
| 4.1.3. La impedanciometría .....                                      | 86        |
| 4.1.4. Métodos clásicos para hacer una audiometría .....              | 86        |
| 4.1.4.1. Método del límite .....                                      | 86        |
| 4.1.4.2. Método de ajustamiento .....                                 | 87        |
| 4.1.4.3. Método del estímulo constante .....                          | 87        |
| 4.1.4.4. Procedimientos adaptativos .....                             | 88        |
| 4.1.4.5. Método de seguimiento de Békésy .....                        | 88        |
| 4.1.4.6. Método up-down .....   | 88        |
| 4.1.5. Resultados de un test audiométrico .....                       | 89        |
| 4.1.5.1. Valoración de la capacidad auditiva. NTP 136 .....           | 89        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.1.5.1.1. Pérdida auditiva de percepción .....  | 89         |
| 4.1.5.1.2. Pérdida auditiva por transmisión.....   | 90         |
| 4.1.5.1.3. Pérdida auditiva mixta.....   | 90         |
| 4.1.6. Sensibilidad auditiva de la población.....  | 91         |
| 4.1.6.1. Estudio audiométrico (Barti, 2000).....   | 91         |
| 4.1.6.2. Estudio audiométrico (Rodríguez, 2015).....   | 100        |
| 4.1.6.3. Estudio audiométrico (Engdahl, 2020) .....  | 102        |
| 4.1.6.4. Estudio audiométrico (Wasano, 2021) .....   | 102        |
| <b>Capítulo 5. Características de la audición .....</b>                                      | <b>106</b> |
| 5.1. Características sensoriales de la audición.....   | 106        |
| 5.1.1. Adaptación y habituación del oído al nivel sonoro .....                               | 106        |
| 5.1.2. Seguimiento y reconocimiento de conversaciones .....                                  | 108        |
| 5.1.3. Efecto distractor del sonido.....   | 109        |
| 5.1.3.1. Influencia del sonido en la conducción de vehículos.....                            | 110        |
| 5.1.3.1.1. Efecto de distracción .....   | 112        |
| 5.1.3.1.2. Efecto de excitación .....  | 113        |
| 5.1.3.1.3. Influencia del carácter de la persona .....                                       | 113        |
| 5.1.3.1.4. Sistemas ADAS y ATIS de asistencia al conductor.....                              | 114        |
| 5.1.3.1.5. Influencia de la música en la conducción.....                                     | 119        |
| 5.1.3.2. Influencia del uso del teléfono móvil en la conducción.....                         | 119        |
| 5.1.3.2.1. Acciones para evitar el uso de dispositivos móviles<br>durante la conducción..... | 122        |
| 5.1.4. Percepción musical .....  | 122        |
| 5.1.4.1. Reacción del cuerpo humano a la música .....  | 125        |
| 5.1.4.2. Placer de escuchar música.....  | 127        |
| 5.1.5. Objetos sonoros.....  | 128        |
| 5.1.5.1. Conceptos morfológicos .....  | 130        |
| <b>Capítulo 6. Efectos del sonido sobre el humano.....</b>                                   | <b>132</b> |
| 6.1. Introducción.....   | 132        |
| 6.1.1. Norma ISO 1999-2013 .....   | 132        |
| 6.1.2. Efectos directos del sonido sobre el cuerpo humano .....                              | 134        |
| 6.1.2.1. Afectación por resfriado.....   | 138        |
| 6.1.2.2. Afectación por tocar en un grupo musical .....                                      | 139        |
| 6.1.2.3. Afectación por uso de reproductores musicales personales .....                      | 140        |
| 6.1.2.4. Afectación por frecuentar actividades musicales .....                               | 142        |
| 6.1.3. La sensación de sonoridad .....   | 147        |
| 6.1.3.1. Incrementar la sonoridad, ¿para qué? .....  | 148        |
| 6.1.3.1.1. Proceso de maximización de la señal de audio .....                                | 149        |

|   |            |
|---|------------|
| 6.1.3.1.2. Distribución estadística de la música electrónica....              | 153        |
| 6.1.4. Nivel y ritmo sonoro esperados en algunas actividades.....             | 155        |
| 6.1.5. Efectos del ruido de aerogeneradores .....                             | 157        |
| 6.1.5.1. Síndrome de ruido de aerogenerador .....                             | 162        |
| 6.1.5.2. Ejemplos de niveles sonoros producidos por aerogeneradores           | 163        |
| 6.1.6. Efectos indirectos del sonido sobre el cuerpo humano .....             | 163        |
| 6.1.6.1. La molestia producida por el ruido .....                             | 165        |
| 6.1.6.2. Efectos sobre el sueño.....  | 166        |
| 6.1.6.2.1. Cantidad de sueño .....  | 169        |
| 6.1.6.2.2. Ritmo del sueño.....   | 169        |
| 6.1.6.3. Conciliar el sueño en entornos urbanos .....                         | 171        |
| 6.1.6.4. Efectos sobre los sistemas endocrino, cardiovascular e inmunitario   | 173        |
| 6.1.6.4.1. Cardiopatía isquémica .....  | 174        |
| 6.1.6.5. Efectos psicológicos producidos por el nivel sonoro.....             | 177        |
| 6.1.6.5.1. Respuesta cognitiva y emocional .....                              | 178        |
| 6.1.7. Directrices de la Unión Europea sobre el ruido ambiental .....         | 180        |
| 6.1.8. Informe de la OMS sobre los efectos del ruido sobre la población ..... | 184        |
| 6.1.9. Impacto sobre la salud producido por el ruido (informe UE2020).....    | 185        |
| 6.1.10. Influencia del confinamiento sobre el ambiente sonoro.....            | 187        |
| 6.1.10.1. Encuesta CidB 2020.....   | 187        |
| 6.1.10.2. Reducción del nivel sonoro en Terrassa por el confinamiento ..      | 191        |
| 6.1.10.3. Impacto del confinamiento en Barcelona, Viena y Estocolmo..         | 192        |
| 6.1.10.4. Efectos del confinamiento sobre el ruido en Madrid .....            | 194        |
| 6.1.11. Proteger el oído .....  | 196        |
| 6.1.11.1. Tapones de espuma .....   | 197        |
| 6.1.11.2. Tapones moldeados con doble y triple borde, sin filtro acústico ..  | 199        |
| 6.1.11.3. Tapones moldeados con doble y triple borde, con filtro acústico.    | 200        |
| 6.1.12. Regeneración de la capacidad auditiva .....                           | 205        |
| 6.1.12.1. Recuperación auditiva mediante cirugía coclear .....                | 205        |
| 6.1.12.2. Recuperación auditiva mediante cirugía.....                         | 208        |
| <b>Capítulo 7. Efectos del ruido sobre el entorno natural.....</b>            | <b>211</b> |
| 7.1. Efectos sobre el entorno natural.....                                    | 211        |
| 7.2. Efectos sobre la comunicación sonora de las aves.....                    | 211        |
| 7.3. Efectos fisiológicos sobre las aves.....                                 | 214        |
| 7.4. Efectos sobre la fauna marina .....                                      | 215        |
| 7.4.1. Fuentes de ruido en el medio marino .....                              | 222        |
| 7.4.1.1. Fuentes de ruido de origen natural.....                              | 222        |
| 7.4.1.2. Fuentes de ruido de origen humano .....                              | 223        |
| 7.4.2. Espectro en frecuencia del ruido marino.....                           | 226        |

|  |            |
|--|------------|
| 7.5. Funciones básicas del sonido en mamíferos marinos .....               | 229        |
| 7.6. Sensibilidad auditiva de los mamíferos marinos .....                  | 230        |
| 7.7. Mitigación del impacto sonoro bajo el agua .....                      | 231        |
| 7.8. Electrificación del propulsor marino.....                             | 233        |
| <b>Capítulo 8. Percepción binaural del sonido .....</b>                    | <b>235</b> |
| 8.1. Introducción.....   | 235        |
| 8.1.1. Mecanismo de la audición binaural.....                              | 240        |
| 8.1.1.1. Diferencia temporal interaural .....                              | 240        |
| 8.1.1.2. Diferencia de nivel interaural.....                               | 241        |
| 8.1.1.3. Batido binaural.....  | 244        |
| 8.1.2. Función HRTF.....   | 244        |
| 8.1.3. Funciones HRTF dinámicas .....                                      | 248        |
| 8.1.4. Localización de fuentes sonoras.....                                | 249        |
| 8.1.5. Cono de confusión .....   | 250        |
| 8.1.5.1. Errores de localización simétricos .....                          | 251        |
| 8.1.5.1.1. Error izquierda-derecha.....                                    | 252        |
| 8.1.5.1.2. Error delante-detrás .....                                      | 252        |
| 8.1.5.1.3. Error arriba-abajo .....  | 252        |
| 8.1.6. Señales dinámicas .....   | 253        |
| 8.1.7. Localización de múltiples fuentes sonoras.....                      | 253        |
| 8.1.7.1. Localización auditiva horizontal .....                            | 254        |
| 8.1.7.2. Localización auditiva vertical .....                              | 254        |
| 8.1.8. Coherencia binaural .....   | 255        |
| 8.1.9. Desenmascaramiento binaural .....                                   | 257        |
| 8.1.10. Selección de sonidos .....   | 260        |
| 8.1.10.1. Separación de canales de voz.....                                | 260        |
| 8.1.11. Grabación de sonidos. Técnicas estéreo, multicanal y binaural..... | 264        |
| 8.1.11.1. Técnica estéreo .....  | 264        |
| 8.1.11.1.1. Configuración X-Y coincidente .....                            | 265        |
| 8.1.11.1.2. Configuración MS.....  | 266        |
| 8.1.11.1.3. Configuración AB .....   | 268        |
| 8.1.11.2. Técnica multicanal. Sonido envolvente .....                      | 270        |
| 8.1.11.3. Técnica binaural con HATS .....                                  | 272        |
| 8.1.11.4. Técnica binaural con headset .....                               | 274        |
| 8.1.12. Aplicaciones de la grabación binaural.....                         | 277        |
| 8.1.12.1. Simulación en salas. Auralización .....                          | 277        |
| 8.1.12.2. Sonido envolvente para auriculares .....                         | 277        |
| 8.1.12.3. Sistemas de mezcla binaural .....                                | 277        |
| 8.1.12.4. Proyector acústico 3D.....                                       | 278        |
| 8.1.12.5. Realidad virtual .....   | 278        |



|   |            |
|---|------------|
| 9.1.5.5.1. Aplicación al vuelo de drones .....                                      | 335        |
| 9.1.5.5.2. Ejemplo: valoración del grado de molestia de<br>drones comerciales ..... | 336        |
| 9.1.5.6. Fluctuación.....   | 338        |
| 9.1.6. Concepto de silencio efectivo .....  | 341        |
| 9.1.7. Detección de patrones .....  | 341        |
| 9.1.8. Visualizar el sonido .....   | 343        |
| 9.1.9. Contraste acústico .....   | 345        |
| 9.1.9.1. Concepto de contraste acústico .....                                       | 347        |
| 9.1.9.1.1. Ejemplo 1: lavadora.....   | 348        |
| 9.1.9.1.2. Ejemplo 2: despertadores.....  | 350        |
| 9.1.9.1.3. Ejemplo 3: vuelo comercial.....  | 353        |
| 9.1.9.1.4. Ejemplo 4: ambiente sonoro en el interior de un<br>dormitorio.....       | 354        |
| 9.1.10. Confort sonoro .....  | 355        |
| 9.1.11. Valoración subjetiva del sonido.....  | 357        |
| 9.1.12. Medición de la calidad sonora.....  | 359        |
| 9.1.12.1. Primeros equipos public address.....                                      | 360        |
| 9.1.12.2. Primer concierto con public address en espacio abierto .....              | 362        |
| 9.1.12.3. Equipos de public address actuales .....                                  | 363        |
| 9.1.12.4. Medida de la calidad de sonido .....                                      | 365        |
| <b>Capítulo 10. El paisaje sonoro .....</b>   | <b>367</b> |
| 10.1. Introducción .....  | 367        |
| 10.1.1. Origen del término <i>soundscape</i> .....                                  | 369        |
| 10.1.2. Primer paseo sonoro.....  | 370        |
| 10.1.2.1. Primer experimento .....  | 372        |
| 10.1.2.2. Segundo experimento.....  | 374        |
| 10.1.2.3. Resultados obtenidos.....   | 374        |
| 10.1.3. Entendiendo el paisaje sonoro.....  | 375        |
| 10.1.4. Sostenibilidad sonora .....   | 376        |
| 10.1.5. Tranquilidad del paisaje sonoro .....                                       | 377        |
| 10.1.6. Influencia del paisaje sonoro sobre la calidad de vida .....                | 379        |
| 10.1.7. Ambientes sonoros .....   | 380        |
| 10.1.8. Medidas acústicas para la valoración del paisaje sonoro .....               | 381        |
| 10.1.8.1. Estándar ISO 12913. Paisaje sonoro .....                                  | 382        |
| 10.1.8.2. Criterios psicoacústicos aplicados al paisaje sonoro.....                 | 386        |
| 10.1.9. Medidas para reducir el nivel sonoro en entornos urbanos.....               | 387        |
| 10.1.9.1. Asfalto absorbente.....   | 389        |
| 10.1.9.2. Diseños de neumáticos innovadores .....                                   | 391        |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| 10.1.10.     | Evaluación del paisaje sonoro .....   | 397 |
| 10.1.11.     | Preferencias sonoras .....  | 398 |
| 10.1.12.     | Valoración subjetiva del paisaje sonoro .....   | 398 |
| 10.1.13.     | Entorno sonoro natural y urbano .....   | 401 |
| 10.1.13.1.   | Sonidos naturales: aves .....   | 402 |
| 10.1.13.1.1. | Sonidos de aves con valoración negativa...  | 403 |
| 10.1.13.1.2. | Sonido de aves con valoración positiva .....  | 405 |
| 10.1.13.2.   | Sonidos naturales: saltos y fuentes de agua.....  | 408 |
| 10.1.13.2.1. | Características sonoras de los saltos/fuentes<br>de agua .....                              | 411 |
| 10.1.13.2.2. | Grandes fuentes de agua .....   | 417 |
| 10.1.13.2.3. | Fuentes con surtidores, flujo turbulento y<br>saltos de agua .....                          | 420 |
| 10.1.13.2.4. | Saltos de agua y canal con suelo irregular .  | 421 |
| 10.1.13.2.5. | Influencia del caudal .....   | 422 |
| 10.1.13.2.6. | Pequeño salto de agua en cascada.....   | 424 |
| 10.1.13.3.   | Valoración subjetiva del sonido de fuentes y saltos de agua                                 | 425 |
| 10.1.13.4.   | Nivel equivalente de presión sonora de fuentes de agua                                      | 427 |
| 10.1.13.5.   | Nivel de sonoridad de fuentes de agua (sonio).....  | 428 |
| 10.1.13.6.   | Fluctuación sonora de las fuentes de agua (vacil).....                                      | 428 |
| 10.1.13.7.   | Agudeza sonora de las fuentes de agua (acum).....   | 429 |
| 10.1.14.     | Efecto de la distancia.....   | 430 |
| 10.1.15.     | Valoración subjetiva del paisaje sonoro .....   | 431 |
| 10.1.16.     | Enmascaramiento de sonidos .....  | 433 |
| 10.1.16.1.   | Enmascaramiento energético.....   | 434 |
| 10.1.16.1.1. | Enmascaramiento energético en frecuencia ..   | 434 |
| 10.1.16.2.   | Enmascaramiento informativo .....   | 434 |
| 10.1.17.     | Estrategias para enmascarar el ruido de tráfico.....  | 435 |
| 10.1.18.     | Semiótica del paisaje sonoro .....  | 439 |
| 10.1.19.     | Futuro del paisaje sonoro urbano .....  | 441 |
| 10.1.20.     | Electrificación del transporte urbano como catalizador de cambio<br>del paisaje sonoro..... | 441 |
| 10.1.20.1.   | Detección sonora de la presencia de un vehículo.....  | 442 |
| 10.1.20.2.   | Origen del sistema AVAS .....   | 443 |
| 10.1.21.     | Acciones para mejorar el paisaje sonoro .....   | 444 |
| 10.1.21.1.   | Fase 1. Estado actual del paisaje sonoro .....  | 445 |
| 10.1.21.1.1. | Caracterización acústica del espacio actual..   | 445 |
| 10.1.21.1.2. | Análisis de los registros de audio .....  | 445 |
| 10.1.21.1.3. | Descripción detallada de todas las fuentes<br>sonoras detectadas .....                      | 446 |

|  |            |
|--|------------|
| 10.1.21.1.4. Visual 360 del punto de observación.....  | 446        |
| 10.1.21.2. Fase 2. Reducción de los sonidos no deseados .....  | 446        |
| 10.1.21.3. Fase 3. Introducción de los sonidos deseados .....  | 447        |
| 10.1.22. Tipologías de paisajes sonoros .....  | 448        |
| 10.1.22.1. Paisaje sonoro dual.....  | 448        |
| 10.1.22.2. Paisaje sonoro conversacional.....  | 449        |
| 10.1.22.3. Paisaje sonoro sintético .....  | 449        |
| 10.1.23. Clasificación de los elementos de un paisaje sonoro.....                                    | 450        |
| 10.1.23.1. Radiografía acústica del espacio .....  | 450        |
| 10.1.23.1.1. Delimitar el espacio donde se pretende actuar.....                                      | 450        |
| 10.1.23.1.2. Delimitación y análisis de las estructuras fijas que configuran el espacio sonoro.....  | 450        |
| 10.1.23.1.3. Delimitación temporal del espacio para tratar .....                                     | 451        |
| 10.1.23.1.4. Descripción de la ubicación de las fuentes sonoras presentes en el paisaje sonoro ..... | 451        |
| 10.1.23.1.5. Influencia de la climatología del lugar .....   | 452        |
| 10.1.23.2. Fuentes sonoras intrínsecas .....   | 453        |
| 10.1.24. Ejemplo de paseo sonoro .....   | 453        |
| 10.1.24.1. Encuestas efectuadas .....  | 454        |
| 10.1.24.2. Descripción de los puntos escogidos para el estudio .....                                 | 455        |
| 10.1.24.3. Resultados del punto 2 .....  | 457        |
| 10.1.24.4. Resultados del punto 5 .....  | 458        |
| 10.1.24.5. Resultados del punto 8 .....  | 460        |
| 10.1.24.6. Mediciones efectuadas durante el paseo sonoro.....  | 461        |
| 10.1.23.7. Análisis de los resultados obtenidos.....   | 464        |
| 10.1.24.8. Aspectos cualitativos del sonido en la encuesta .....                                     | 464        |
| <b>Capítulo 11. Uso de aplicaciones para medir el sonido.....</b>                                    | <b>469</b> |
| 11.1. Introducción .....   | 469        |
| 11.2. Micrófono de un dispositivo móvil (smarphone).....   | 470        |
| 11.2.1. Tecnología MEMS.....   | 471        |
| 11.2.2. Micrófono MEMS de un dispositivo móvil .....   | 474        |
| 11.3. Medida del nivel sonoro con aplicaciones .....   | 475        |
| 11.3.1. Encauzar el sonido al dispositivo móvil.....   | 475        |
| 11.3.2. Grado de exactitud de una aplicación para dispositivo móvil.....                             | 476        |
| 11.3.3. Uso con señales reales de una aplicación para dispositivo móvil .....                        | 481        |
| 11.3.4. Uso de micrófonos externos para dispositivo móvil .....                                      | 482        |
| 11.3.4.1. Micrófono externo estéreo de calidad.....  | 482        |

|  |     |
|--|-----|
| 11.3.4.2. Micrófono externo de precisión .....   | 484 |
| 11.4. Evolución de los sistemas de medida de sonido portátiles .....                                 | 485 |
| <b>Capítulo 12. El sonido de las ciudades inteligentes</b> .....                                     | 488 |
| 12.1. Introducción .....   | 488 |
| 12.1.1. Soluciones acústicas inteligentes .....  | 490 |
| 12.1.2. Ruido de vehículos en las ciudades inteligentes .....  | 491 |
| 12.1.2.1. Vehículos con motor de combustión interna (MCI).....                                       | 492 |
| 12.1.2.2. Vehículos con propulsor eléctrico (ME) .....   | 493 |
| 12.1.2.2.1. Futuro del sonido del vehículo eléctrico .....   | 501 |
| 12.1.2.2.2. Sistemas de alerta sonora (AVAS).....  | 505 |
| 12.1.3. Actuaciones musicales en espacios públicos.....  | 508 |
| 12.1.4. Ambientes sonoros de terrazas en entornos urbanos.....                                       | 511 |
| 12.1.5. Maquinaria de limpieza mecánica.....   | 516 |
| 12.1.6. Ayuda a la movilidad mediante tecnología sonora y vibratoria .....                           | 521 |
| 12.1.7. Ruido de drones.....   | 521 |
| 12.1.7.1. Medida del ruido de drones en laboratorio .....  | 522 |
| 12.1.7.2. Medida del ruido de drones en exterior .....   | 525 |
| 12.1.7.3. Reducción del ruido emitido por drones convencionales ...                                  | 528 |
| 12.1.7.4. Nuevas tecnologías en drones silenciosos .....   | 529 |
| 12.1.7.5. Molestia generada por vuelo de drones .....  | 530 |
| 12.1.7.6. Reducción del nivel sonoro de los drones .....   | 532 |
| 12.1.7.7. Efectos del ruido de drones sobre las personas.....  | 532 |
| 12.1.7.8. Reglamento para las operaciones de aerotaxis .....   | 534 |
| 12.1.8. Aplicaciones de la inteligencia artificial en el reconocimiento sonoro....                   | 535 |
| 12.1.8.1. Aplicaciones de la inteligencia artificial en las mediciones<br>de sonido.....             | 537 |
| 12.1.8.2. Aplicaciones de la inteligencia artificial en el sonido<br>profesional. El sonido HD ..... | 537 |
| 12.1.8.3. Aplicación de la inteligencia artificial para la detección de<br>eventos sonoros .....     | 538 |
| 12.1.9. Detección de vehículos ruidosos. El radar acústico .....                                     | 540 |
| <b>Capítulo 13. Marca sonora (branding sonoro)</b> .....   | 542 |
| 13.1. El sonido como elemento diferenciador de una marca ( <i>branding</i> ).....                    | 542 |
| 13.2. Introducción al concepto de <i>branding</i> sonoro .....                                       | 543 |
| 13.3. Impactar en el estado de ánimo del comprador .....   | 546 |
| 13.4. Maridaje entre marca y <i>branding</i> sonoro.....   | 547 |
| 13.5. Rasgos sonoros.....  | 548 |
| 13.6. La conexión sonido-objetos de marca.....   | 549 |

|  |     |
|--|-----|
| 13.6.1. Conexión intrínseca sonido-marca .....               | 550 |
| 13.6.2. Conexión extrínseca sonido-marca .....               | 551 |
| 13.7. Audio UI/UX.....                                       | 552 |
| 13.8. Implantación del <i>branding</i> sonoro .....          | 554 |
| 13.9. Aplicaciones del <i>branding</i> sonoro .....          | 555 |
| 13.9.1. Ejemplo 1: cierre de puerta en un vehículo.....      | 555 |
| 13.9.2. Ejemplo 2: calidad sonora de lavadoras.....          | 560 |
| 13.9.3. Ejemplo 3: calidad sonora de vehículos de motor..... | 563 |
| <b>Bibliografía</b> .....                                    | 569 |

# Capítulo 1.

## Introducción

El sentido auditivo nos permite escuchar los sonidos que se producen a nuestro alrededor. Los sonidos se originan siempre por la vibración de un objeto. Estas vibraciones hacen vibrar, a su vez, a las moléculas de aire que se encuentran en contacto directo con este, y estas a su vez hacen vibrar a las más cercanas... y así sucesivamente, generándose una onda sonora que se propaga por el espacio, en principio en todas direcciones. Las vibraciones originadas llegan hasta nuestros oídos a través de un medio, normalmente el aire, y en ocasiones el agua. Sin un medio transmisor como el aire o el agua no es posible la propagación del sonido.

Las hojas que se mueven por la acción del viento, el agua que fluye por un río o el canto de los pájaros son ejemplos de sonidos llamados «naturales», que se originan con la vibración de un objeto. Todas las ondas sonoras se propagan por el espacio a través del aire y, a medida que recorren más distancia, van reduciendo su intensidad. Las moléculas de aire vibran en la dirección de propagación alrededor de su punto de equilibrio, pero realmente no se desplazan, como sí lo hacen con el viento, que mueve y desplaza a las partículas de aire. La vibración original del objeto se va transmitiendo a las moléculas cercanas; esto hace que el sonido generado en un punto se vaya atenuando a medida que nos alejamos de él. Sin embargo, esta afirmación solo es cierta para la propagación sonora en campo lejano, que engloba a la inmensa mayoría de situaciones y casos reales, donde el punto de observación se encuentra «suficientemente alejado» de la fuente sonora. Estamos en campo cercano cuando nos acercamos excesivamente a la fuente sonora, y eso es muy importante cuando las fuentes sonoras son de gran tamaño.

Las ondas sonoras que se han propagado por el aire son captadas por el sentido auditivo y procesadas por el cerebro, lo que permite al ser humano no solo escuchar los sonidos, sino también hacer funciones más complejas como entender el mensaje de una locución hablada, reconocer la voz de una persona o reaccionar emocionalmente ante una melodía musical. La música o determinados sonidos pueden evocar sentimientos y

eso requiere de funciones potentes del conjunto sentido auditivo-cerebro que desarrollan los individuos a partir del aprendizaje y en función de sus hábitos y cultura.

El oído es un sentido extremadamente sensible, lo que le permite captar niveles sonoros muy bajos. Cerca del umbral audible, las vibraciones de las partículas de aire son tan pequeñas que el tímpano se desplaza una distancia inferior a un átomo, unas 700 veces inferior al diámetro de un pelo humano. Cualquier error genético o un accidente pueden alterar notablemente esta sensibilidad. Un sentido tan sensible no puede soportar niveles de presión acústica elevados sin sufrir consecuencias, como se explicará con detalle más adelante.

Hay que distinguir entre escuchar un sonido o identificar/reconocer un sonido. La mayoría de los sonidos, sean o no deseados, aportan información. En el proceso de identificación del sonido, nuestra mente decide si ese sonido es agradable o no. Esta decisión, en general, suele precisar de unos pocos segundos.

La forma en que se perciben los sonidos está influida por las características fisiológicas, psicológicas y culturales de los individuos. Las sensaciones que un mismo sonido produce sobre distintas personas son muy variables y altamente subjetivas. El mismo sonido puede ser valorado positivamente por unas personas y negativamente por otras. Tal es el caso, por ejemplo, del sonido de los vehículos de competición. Los amantes de estos eventos valoran el rugir de determinados motores. En cambio, otras personas valoran este rugido siempre negativamente y lo consideran un «ruido» o sonido no deseado.

En las últimas décadas, va tomando fuerza el interés por el diseño acústico de los espacios urbanos; es el llamado *soundscape* o *paisaje sonoro*. Diseñar espacios urbanos para que suenen de una determinada manera no es una tarea fácil. Mayoritariamente, se toman decisiones para su diseño de acuerdo con algunas experiencias puntuales previas, donde algunas personas han elaborado los llamados *soundwalks* o *paseos sonoros* y donde se trata de valorar mediante una encuesta la calidad sonora percibida de una plaza o una calle en la ciudad. En paralelo con esta experiencia, generalmente se realizan mediciones acústicas de todo tipo para hacer después una valoración objetiva de los sonidos percibidos durante el paseo sonoro.

Es bastante simple describir con palabras una sala de conferencias a una persona que nunca ha estado en ella. Explicar con todo detalle las proporciones de la sala, los volúmenes, las texturas, los colores, los materiales, etc., que hay en ese lugar es una tarea simple que cualquier persona puede realizar sin esfuerzo, de suerte que la persona que nos escucha se hará una imagen mental muy cercana a la real. Sin embargo, para describir la voz de una persona tendremos que recurrir a la «imitación» de esa voz o buscar el nombre de una persona conocida, con un tono de voz similar, para que nuestro interlo-

cutor entienda lo que tratamos de explicar. Es decir, no tenemos palabras para explicar cómo suena un sonido.

Esta dificultad en describir el sonido es de vital importancia cuando se valora la calidad sonora de un espacio o ambiente sonoro. Los calificativos usados no siempre se interpretan de la misma manera ni en el mismo grado por distintas personas. Esto conduce a que en los paseos sonoros, por ejemplo, se hagan valoraciones subjetivas que, en general, presentan variabilidades importantes. Esto dificulta más, si cabe, el diseño de los ambientes sonoros, ya que es necesario disponer de datos objetivos tanto para el diseño como para poder predecir los resultados obtenidos y valorar la solución más adecuada.

## Capítulo 2.

# El oído humano

El sentido auditivo nos permite reconocer sonidos, comunicarnos, escuchar y disfrutar de la música y un largo etcétera. El sistema auditivo es un sentido más importante de lo que generalmente se piensa. No se puede desconectar voluntariamente, como sí podemos hacer con la vista, aspecto que a veces supone un inconveniente cuando queremos dormir y un ruido nos lo impide. El oído funciona de forma permanente incluso mientras estamos durmiendo. De hecho, es el órgano que nos alerta de los peligros que nos rodean, siendo esta una función primitiva vital para la subsistencia de nuestros antepasados en la prehistoria. Sorprende que un ruido de baja intensidad pueda provocar mientras dormimos, una sensación de alarma superior a la que un sonido de mayor amplitud puede generar estando despiertos.

La experiencia cotidiana muestra que, en general, escuchar un «ruidito» mientras dormimos puede despertarnos con cierta facilidad. Esto sucede por el fenómeno de la llamada *curiosidad acústica*. Esta curiosidad se produce cuando un sonido supera, aunque sea durante un breve instante, los niveles sonoros presentes en ese momento. Este mecanismo se encarga de atraer la atención del cerebro para que este dedique la potencia necesaria para saber la procedencia y naturaleza del sonido percibido. Este mecanismo no se puede desconectar y actúa como una señal de alerta ante un posible peligro. Ante un sonido «sospechoso», el cuerpo segrega adrenalina y se generan movimientos musculares breves pero intensos (sobresalto/despertar), que son las reacciones más primitivas ante un sonido no esperado.

La consecuencia de esta *curiosidad* es que las personas se despiertan por los desniveles del sonido y no por el nivel sonoro. Hay un ejemplo muy común: en un avión podemos ver a gente durmiendo plácidamente, estando vestidos, encajados en un asiento incómodo y con un nivel sonoro de unos 85 dBA. Sin embargo, esa misma gente, estando en su casa, con su mejor pijama y en su cama, no puede dormir porque oyen «un ruidito» con un nivel sonoro de 26 dBA.

El sentido auditivo puede obtener información muy precisa del sonido percibido basada en la experiencia previa del individuo, lo que le permite tomar decisiones importantes muy rápidamente. Por ejemplo, los progenitores desarrollan una sensibilidad especial con el llanto de su hijo, lo reconocen con facilidad entre otros sonidos. En cambio, estos progenitores no reaccionan igual si escuchan llorar a un niño que no sea el suyo.

El sentido auditivo tiene dos partes diferenciadas:

- Órgano auditivo como detector físico de las variaciones de presión acústica que llega al oído externo.
- Procesamiento de estas informaciones por parte del cerebro, que «interpreta» los sonidos percibidos.

Estos dos aspectos están íntimamente ligados, pero utilizan diferentes partes del cuerpo. La parte visible del sentido del oído (pabellón auditivo más el oído medio e interno) es la que nos permite captar los sonidos externos, es decir, actúa básicamente como un micrófono. Si esta parte no funciona de forma correcta, no es posible escuchar sonido alguno y, por tanto, tampoco interpretar informaciones sonoras. También puede suceder que la parte fisiológica funcione y, en cambio, el problema esté con la información que no llega en todo o en parte al cerebro, quizá a causa de un problema con la cóclea o por un neuroma en el nervio auditivo.

Cuando se reconoce una voz, el órgano auditivo traduce los incrementos de presión acústica que llega a nuestros oídos, a señales eléctricas que más tarde el cerebro descodifica e interpreta. El hecho físico de percibir los sonidos no es suficiente para identificar un locutor o reconocer una música, es necesario el proceso de descodificación que hace el cerebro en función del aprendizaje realizado anteriormente. Este proceso de descodificación es bastante complejo y algunos aspectos son aún desconocidos.

Conocer cómo es nuestro oído y qué limitaciones presenta puede ayudar a saber por qué un sonido molesta y otro no. En una primera aproximación, cabe pensar que, a mayor nivel de presión acústica, más molestia se producirá. Sin embargo, eso no es del todo cierto; hay otros factores, además de la presión acústica, que deben ser tenidos en cuenta. La sensibilidad auditiva se estudió bastante entre los años sesenta y setenta. Los estudios más recientes están motivados por algunas observaciones que apuntan a la necesidad de revisar los trabajos llevados a cabo hace unas décadas sobre la sensibilidad y respuesta del oído humano. La evolución del sentido auditivo humano, unida a los hábitos de riesgo acústico, son algunos factores que han motivado recientemente la aparición de nuevos estudios audiométricos.

La capacidad auditiva de la población es un aspecto que ha preocupado siempre a las autoridades. En este sentido, la Ley 96-452, de 28 mayo, introdujo en Francia una

limitación del nivel de sonido de los reproductores de música personales a un nivel de presión sonora de 100 dB y la obligación del fabricante de colocar una etiqueta en los reproductores de música personales con la siguiente indicación: «A plena potencia, la escucha prolongada del reproductor puede dañar el oído del usuario». Los métodos de implantación de los artículos correspondientes fueron definidos por Decreto de 24 de julio de 1998 y complementados por Decreto de 8 de noviembre de 2005. Este último Decreto modificó notablemente el alcance de los artículos al incluir de forma explícita teléfonos móviles y reproductores de música personales MP3.

Fue una medida ciertamente drástica, pero pionera en Europa, y que estaba basada en muchos trabajos de investigación realizados en la época que mostraban que los jóvenes franceses se estaban quedando sordos. Lamentablemente, las medidas de protección impuestas por la ley no fueron suficientes para solucionar el problema. A los pocos meses de publicarse la ley, aparecieron por internet diferentes sitios web donde se explicaba la forma de conseguir un mayor nivel sonoro con unos auriculares diferentes a los que llevaba de origen el reproductor. Este hecho muestra la necesidad de realizar campañas de sensibilización y, sobre todo, de concienciación entre la población más joven para que, cuando sean adolescentes, no caigan en los mismos errores que sus predecesores.

Los problemas relacionados con la contaminación acústica no siempre se tratan de forma adecuada. En las décadas de los sesenta y setenta, a las personas que se quejaban de sufrir un exceso de ruido se las ridiculizaba y estigmatizaba, y, en general, la Administración no hacía nada para solucionar el problema. En aquellos años, aguantar el nivel sonoro elevado de una máquina era «cosa de hombres». Afortunadamente, la sociedad ha ido evolucionando y hoy en día la población está más sensibilizada con los problemas que genera un exceso de nivel sonoro. Tratar con menosprecio los problemas de contaminación acústica es más propio de una sociedad inculta y poco respetuosa con el entorno y el medioambiente.

## 2.1. Anatomía del oído

El sistema auditivo es un órgano complejo que está dividido en tres partes: el oído externo, el oído medio y el oído interno. Cada parte tiene una función específica, aunque en el caso del oído interno, y sobre todo en el procesamiento de los datos por parte del cerebro, existen muchos aspectos desconocidos sobre los mecanismos de la audición. La figura 2.1 muestra una sección esquematizada del oído.

A la izquierda tenemos el pabellón auditivo que, junto con el conducto auditivo, forman el oído externo. En el centro se encuentra el oído medio, formado por el tímpano y la cadena de huesecillos: yunque, martillo y estribo. Por último, a la derecha encontramos el oído interno, formado por la cóclea (caracol).

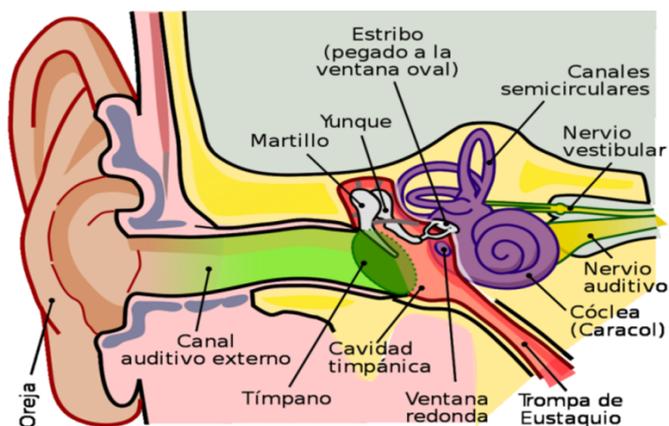


Figura 2.1. Sección del sentido del oído humano.

### 2.1.1. Oído externo

Está formado por el pabellón auditivo, la cavidad auditiva y el conducto auditivo. El pabellón auditivo tiene una función muy importante sobre la localización o procedencia de los sonidos. Contrariamente a lo que se podría pensar, la ausencia del pabellón auditivo no minora de forma notable la sensibilidad auditiva: el pabellón auditivo no es un embudo «que recoge» los sonidos y los conduce al interior del oído, aunque su forma y posición podría inducir a pensar así.

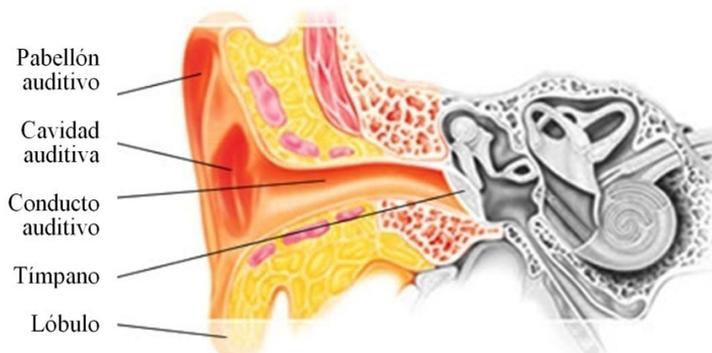


Figura 2.2. Detalle del oído externo.

#### 2.1.1.1. Pabellón auditivo

El principal papel del pabellón auditivo es permitir la localización o procedencia del sonido en un entorno 3D, es decir permite al ser humano orientarse y reconocer el espa-

cio sonoro 3D. Cuando una onda sonora llega al pabellón auditivo, se producen múltiples reflexiones que crean constantemente interferencias con las señales sonoras que llegan al oído y, en consecuencia el sonido que realmente llega al tímpano es la suma de las señales originales más las interferencias. Por tanto, cuando escuchamos un sonido, lo que en realidad estamos escuchando es el sonido original, pero con los matices que nuestro pabellón auditivo ha introducido. Con estas interferencias, se generan unos pequeños retardos entre las señales sonoras y, gracias a estas pequeñas variaciones tanto de nivel como de fase, podemos interpretar la procedencia del sonido, y también, en determinadas circunstancias, la distancia a la que se encuentra una fuente sonora. En el caso del pabellón auditivo humano, las depresiones y los pliegues del pabellón auditivo permiten la localización de las fuentes acústicas en el espacio 3D.

El pabellón auditivo de un individuo crea el llamado *patrón de interferencia*, que es único, de manera que a través del aprendizaje cotidiano desde la infancia hasta la adolescencia, se asocia un determinado desfase en frecuencia y en tiempo con una procedencia concreta del sonido en el espacio tridimensional. Posteriormente, en el proceso de localizar un sonido, el cerebro del individuo busca en primer lugar un patrón de interferencia que se ajuste al que se percibe en ese momento y con este patrón «reconoce» e identifica la procedencia del sonido sin tener que girar la cabeza. Esto permite identificar el origen del sonido de una manera rápida y «fácil». Los patrones de interferencia dependen de la forma del pabellón auditivo, que es distinto del resto de individuos, por lo que cada persona tiene su propio patrón de interferencia. En el proceso cotidiano de localizar la procedencia de los sonidos, el cerebro no tiene que analizar las señales recibidas en ambos oídos para deducir de dónde viene el sonido. Simplemente, busca dentro de la memoria acústica un patrón anterior que coincida con el percibido, proceso que es mucho más rápido.

El proceso de localización de fuentes siempre implica una fase de aprendizaje, que se realiza durante la infancia; es un proceso natural y que pasa desapercibido para el individuo, ya que nadie es consciente de llevar a cabo este aprendizaje. En esta fase, el cerebro memoriza multitud de situaciones acústicas que después utiliza para determinar la procedencia de un sonido o localizar su origen.

Como los pabellones auditivos son diferentes para cada individuo (figura 2.3), un supuesto «intercambio de orejas» haría que la localización de sonidos del entorno resultara más difícil, aunque los sonidos se escucharían prácticamente con la misma intensidad.

En el caso de escuchar un sonido y no encontrar el patrón de interferencia que coincida con alguno almacenado antes en nuestra memoria, se recurre a obtener más información moviendo ligeramente la cabeza a izquierda y derecha o bien en sentido vertical. Eso permite disponer de otros patrones de interferencia del mismo sonido pero en distinta posición y de esta manera el cerebro hace una triangulación para determinar el lugar exacto de procedencia del sonido.

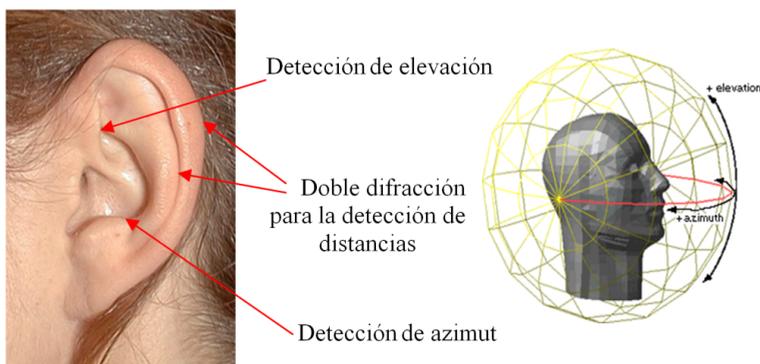


**Figura 2.3.** Ejemplo de la variedad de pabellones auditivos.

El proceso de aprendizaje de la localización de fuentes sonoras en el espacio 3D finaliza aproximadamente en la pubertad. Un proceso similar es el que se utiliza para reconocer un sonido, aunque este proceso de aprendizaje nunca termina.

Hasta la fecha, ningún sistema electrónico puede reconocer una voz con el grado de fiabilidad a como lo hace con toda naturalidad el sentido auditivo humano. Incluso con señales muy distorsionadas o alteradas espectralmente, un individuo identifica con facilidad una voz conocida. Si el sonido no es «conocido», se almacena en la base de datos (cerebro).

En la figura 2.4 podemos ver la función de los distintos pliegues y cavidades del pabellón auditivo sobre la capacidad de localización de sonidos.



**Figura 2.4.** Características del pabellón auditivo que permiten la localización de la procedencia del sonido en el espacio 3D.

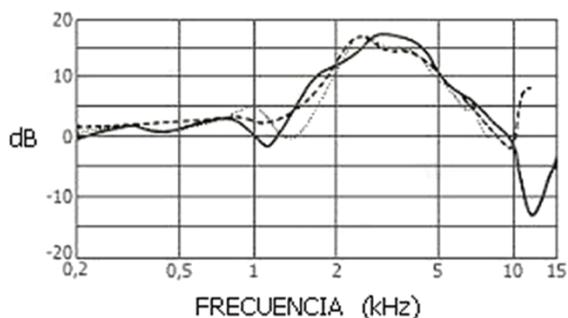
D. W. Batteau sugirió en el año 1967 que los sonidos reflejados sobre el pabellón auditivo generan retardos del orden de unos 300  $\mu$ s. A pesar de ser un tiempo extremadamente corto, son fácilmente «detectables» por el sentido auditivo, lo que permite valorar la distancia a la que se produce el sonido. Esta función es muy importante cuando estamos rodeados de objetos muy cercanos, donde nuestro sentido auditivo valora si el sonido está cerca o muy cerca de nosotros. Obviamente, no se puede precisar la distancia exacta a la que se produce un sonido cuando superamos unos metros de separación. Las frecuencias altas (por encima de los 4 kHz) son las más afectadas por este mecanismo. Por tanto, son las altas frecuencias las que en principio nos permiten localizar mejor la procedencia del sonido. Es decir, será más difícil de localizar un sonido de baja frecuencia y para detectar su procedencia, deberemos recurrir a los cambios de nivel sonoro, moviendo la cabeza o nuestra posición.

### **2.1.1.2. Canal auditivo**

El canal auditivo suele tener una longitud de unos 2,3 cm y se puede considerar como un tubo con forma de doble Z tapado por un extremo, donde se encuentra el tímpano, y abierto por el otro extremo, donde se encuentra el pabellón auditivo. Acústicamente, su comportamiento es bien conocido; aparecerán unas resonancias con unas longitudes de onda que serán múltiplos de  $\lambda/4$  de la longitud del tubo. Con una longitud media de unos 2,3 cm, nos aparece una resonancia sobre los 3.800 Hz. Las diferentes anatomías humanas harán que tanto la longitud como el diámetro del conducto auditivo tengan pequeñas variaciones y en consecuencia, la frecuencia de resonancia del conducto no presente exactamente el mismo valor para todos los individuos. La resonancia del canal auditivo está bastante documentada por diversos trabajos.

En la figura 2.5 se puede observar la respuesta en frecuencia obtenida comparando el sonido que llega al tímpano respecto al que llega al pabellón auditivo (función de transferencia del sonido exterior al tímpano) en tres estudios. Se observa la resonancia del conducto auditivo situada sobre los 3,8 kHz. Por lo general, la longitud, el diámetro y la forma del conducto auditivo son las principales diferencias fisiológicas.

El resultado común en todos estos estudios es la resonancia que aparece cercana a los 4 kHz. Por otro lado, las paredes interiores del conducto auditivo están recubiertas de múltiples pelos y de glándulas que desprenden una sustancia (cerumen) para atrapar el polvo y otros objetos pequeños y evitar que puedan llegar al tímpano. Este recubrimiento con cerumen es el que da una cierta absorción en el interior del canal auditivo, bajando la Q del sistema resonante. Esta absorción acústica introduce una pérdida en la amplitud de la resonancia y el pico es más amplio. A pesar de la pérdida, el canal auditivo sirve para enfatizar unos 17 dB la amplitud de la respuesta del oído a las frecuencias medias.



**Figura 2.5.** Respuesta en frecuencia del oído externo (nivel sonoro frente al tímpano respecto al exterior). Trazo de puntos, Wiener Ross (1946); trazo discontinuo, Shaw (1974), y trazo continuo, Mehrgardt Mellert (1977).

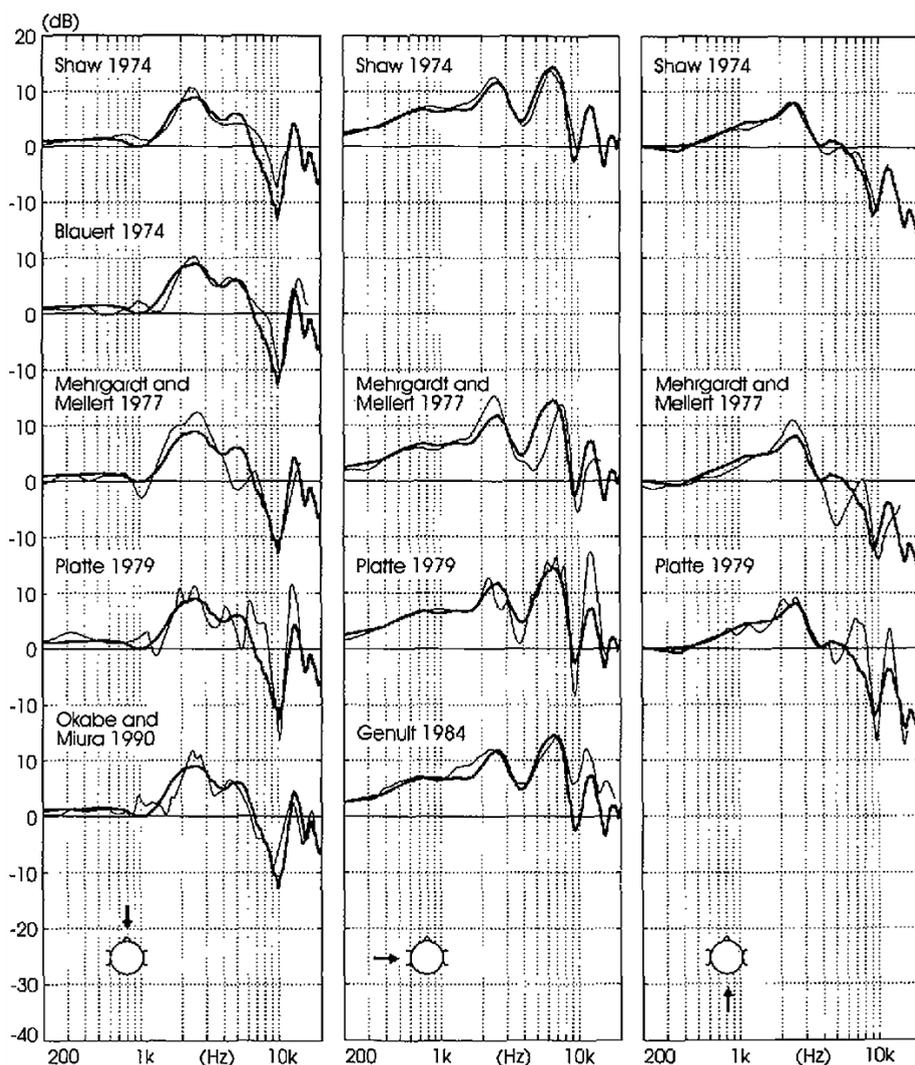
La incidencia del sonido sobre el oído externo modifica esta función de transferencia. Y esta alteración, a su vez, hace que el sonido que percibimos tenga unos matices distintos, en función de la dirección de procedencia. La figura 2.6 muestra la función de transferencia del sonido exterior al tímpano (HRTF del canal auditivo), obtenida por diversos autores y con diferentes direcciones del sonido incidente.

El sonido que llega al oído con distintas direcciones presenta ligeras diferencias con respecto al contenido de frecuencia y la fase. A la señal sonora original, se añaden reflexiones e interferencias introducidas por el pabellón auditivo, que permiten al sentido auditivo localizar la procedencia del sonido.

### 2.1.1.3. *Función de transferencia relacionada con la cabeza*

La función de transferencia del oído varía con el acimut de la señal incidente sobre el pabellón auditivo. Esta función de transferencia se llama HRTF (Head Related Transfer Function). Representa el filtrado introducido por el conjunto formado por el pabellón auditivo, los hombros, la cabeza y parte del torso de las personas en el proceso de audición. La obtención de una función HRTF estándar es motivo de investigación de muchos laboratorios que tratan de encontrar una función HRTF universal. Teóricamente, esta función permitiría reproducir mediante dos auriculares o dos altavoces un sonido grabado en un entorno anecoico y situarlo en cualquier punto del espacio tridimensional, dando una sensación de sonido en tres dimensiones.

Es decir, con dos altavoces situados delante de un oyente en configuración estéreo se podría situar la fuente sonora en cualquier punto del espacio. La dificultad radica no solo en la obtención de la propia función, sino en la reproducción a través de los altavo-



**Figura 2.6.** Distintas funciones HRTF del canal auditivo, obtenidas por diferentes autores para una incidencia de sonido frontal, lateral izquierda y posterior.

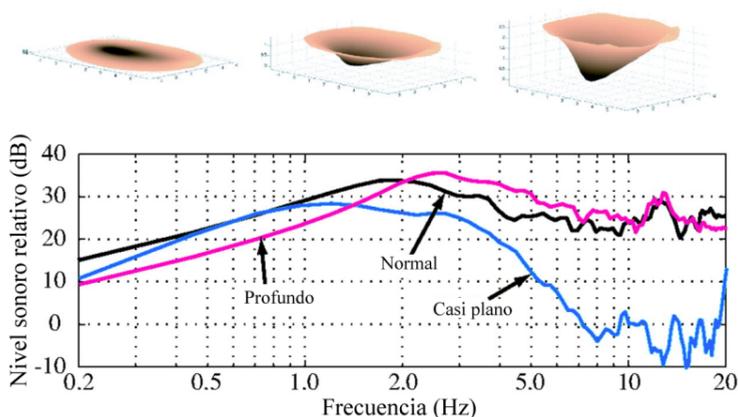
ces, que imponen una serie de restricciones como el fenómeno de los caminos cruzados (*cross talk*). Las diferencias fisiológicas entre los individuos hacen que la función HRTF sea diferente para cada individuo y por tanto, el sonido 3D debe particularizarse para cada persona. Debe distinguirse entre el concepto de sonido 3D y el sonido multicanal, que no es lo mismo. Este último consigue situar el sonido en una zona del espacio mediante la colocación de diferentes altavoces repartidos por la sala alrededor del oyente.

El oyente escucha el sonido procedente de un altavoz o conjunto de altavoces y asocia una dirección al sonido percibido, lo cual es técnicamente mucho más simple. Esta tecnología es la que se instala en la mayoría de salas de proyección de cine o *home cinema* avanzados.

La localización de las fuentes sonoras es importante en la vida cotidiana porque nos permite ejecutar muchas acciones de forma «automática». Por ejemplo, cuando andamos por una calle, reconocemos la posición y proximidad de los vehículos u otras fuentes de sonido del entorno sin necesidad de verlas. De manera cotidiana, si andamos por la calle y alguien nos llama, fácilmente nos giramos hacia el punto exacto donde hemos ubicado esa voz. Resulta muy interesante que, cuando andamos por una calle y queremos cruzarla fuera del paso de peatones, nos fijamos muchas veces del oído y no comprobamos con la vista que no vienen vehículos. En ocasiones, esta circunstancia es el origen de accidentes entre peatones y ciclistas, ya que los primeros no perciben la presencia de los segundos.

#### 2.1.1.4. Influencia del tímpano en la sensibilidad auditiva

El tímpano es el elemento con el que la onda acústica va a colisionar y va a transmitir la vibración sonora al interior del oído. Si este tejido no está en condiciones, la capacidad auditiva, tanto en sensibilidad como en frecuencia, se resiente de forma notable. El tímpano tiene una forma cónica en el extremo interior tocando al martillo, pero es toroide en el extremo exterior tocando al conducto auditivo. Otra particularidad de este tejido es que su tamaño es superior a la sección del conducto auditivo, por lo que está ladeado. La forma de esta membrana recuerda a la de un altavoz. Si se modifica la profundidad del cono, se varía la respuesta en frecuencia, como muestra la figura 2.7 (Fay, Puria, & Steele, 2006).



**Figura 2.7.** Influencia de la profundidad de la conicidad del tímpano sobre la respuesta en frecuencia de este.

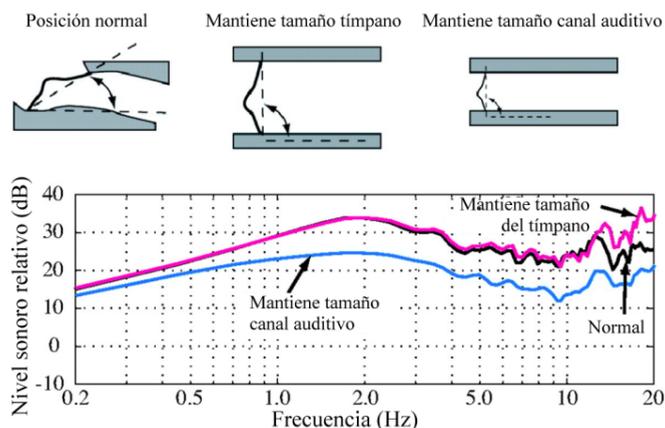
Como se puede observar, la respuesta del tímpano profundo es aproximadamente la misma que en el caso normal con una ligera pérdida en las bajas frecuencias y una ligera ganancia en las frecuencias medias. Sin embargo, el tímpano casi plano tiene una pérdida de 25 dB a altas frecuencias. El tímpano debe transferir energía acústica a los movimientos del martillo. El aire tiene una impedancia mecánica baja, mientras que la impedancia mecánica en el centro del tímpano (umbo) en contacto con el martillo es alta. El tímpano debe actuar como un transformador entre estas dos impedancias de lo contrario, la mayor parte de la energía que llega canalizada por el conducto auditivo se reflejará hacia el exterior en lugar de transmitirse hacia la cóclea. Las propiedades mecánicas del transformador del tímpano se derivan de su forma y de sus propiedades mecánicas.

Por un lado, la sección exterior del toroide es muy flexible y tiene una gran superficie. Esta flexibilidad proporciona la baja impedancia necesaria para adaptarse a la baja impedancia del aire. Por otro lado, la parte interna del tímpano es una sección cónica acabada en punta con muchas fibras radiales. Estas fibras son muy rígidas en la dirección necesaria para impulsar el umbo. Esta porción interna rígida del tímpano se adapta bien a la gran impedancia de la cadena de huesecillos. Entre estas dos regiones, el tímpano pasa suavemente de modos de vibración transversales de baja impedancia en la región toroide a modos de vibración en el plano de alta impedancia en la región cónica.

Cuando el tímpano se hace casi plano, su impedancia coincide con el aire, pero carece de la rigidez necesaria para impulsar el umbo. Este efecto es especialmente pronunciado en altas frecuencias, como se aprecia en la figura 2.7. En el otro extremo, el aumento de la porción cónica aumenta la rigidez del tímpano, lo que proporciona una mala correspondencia entre el aire y el tímpano. El tímpano casi plano tiene una respuesta a baja frecuencia muy similar a la normal, pero muestra unas pérdidas para alta frecuencia superiores a los 20 dB.

El tímpano se encuentra ladeado en el conducto auditivo, debido a que éste tiene un mayor diámetro que el conducto auditivo. La figura 2.8 muestra los tres casos analizados (Fay, Puria, & Steele, 2006).

Hay muy poca diferencia entre los dos casos analizados cuando se mantiene el tamaño del tímpano. Sin embargo, cuando el tímpano se hace más pequeño y el canal auditivo conserva su diámetro, se produce una reducción del área del tímpano. Esto da como resultado una pérdida de 10 dB en todas las frecuencias superiores a los 2 kHz. Se puede concluir que la inclinación del tímpano permite que un tímpano más grande encaje dentro de un canal auditivo de menor diámetro. Esto disminuye la presión acústica en el canal auditivo necesaria para producir vibraciones perceptibles en la cóclea y al mismo tiempo, optimiza la cantidad de espacio utilizado.



**Figura 2.8.** Influencia de la inclinación del tímpano respecto al canal auditivo.

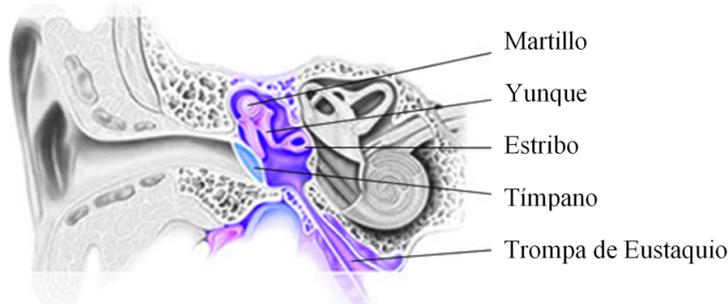
### 2.1.2. Oído medio

Helmholtz, en un trabajo publicado el año 1868, sugirió que el oído medio era el causante de diversas no linealidades en el proceso de la audición. Estas no linealidades llegan a la cóclea, las cuales según la teoría de la posición, aparecen como si fueran propias de la señal original. Asimismo, Wever y Lawrence publicaron en 1954 el trabajo, *Physiological Acoustics*, en el que demuestran que el oído medio en realidad trabaja de forma perfectamente lineal. En consecuencia, apuntan a la cóclea como el probable elemento generador o causante de las no linealidades del oído.

Los trabajos de Helmholtz sugieren que el tímpano influye sobre la efectividad de transformación del oído medio. Según esta idea, el producto de la banda de frecuencias aplicada por el desplazamiento debería ser constante. Por tanto, una banda de frecuencias mayor implicaría un menor desplazamiento. Posteriores experimentos han hecho abandonar esta idea. Békésy, en su trabajo *Experiments in Hearing* del año 1960, midió con la ayuda de una sonda con cabeza extremadamente fina los movimientos del tímpano a diferentes frecuencias. Los resultados de sus investigaciones son bastante diferentes de las propuestas de Helmholtz. Para frecuencias inferiores a los 2 kHz, el tímpano se mueve como un pistón rígido. Por encima de los 2,4 kHz, aproximadamente, la rigidez del tímpano baja con rapidez, y entonces el movimiento de la cadena de huesecillos está retardado respecto del movimiento de la membrana timpánica.

Las vibraciones producidas por las ondas sonoras que llegan al tímpano deben llegar hasta la cóclea. En su interior está el líquido endolinfático, a través del cual se estimulan las células ciliadas encargadas de enviar la información sonora al cerebro. El principal

papel del oído medio es la adaptación de impedancias entre un medio de propagación por vía aérea y una propagación del sonido a través de un líquido. Como se ilustra en la figura 2.9, la parte posterior del tímpano se comunica a través de la trompa de Eustaquio con el exterior a través del conducto nasal para igualar las presiones estáticas a ambos lados del tímpano. La trompa de Eustaquio permite que la presión atmosférica a ambos lados del tímpano sea la misma y con ello el tímpano permanece en su posición de equilibrio, independientemente de la presión atmosférica (o altitud) a la que se encuentre el individuo.



**Figura 2.9.** Detalle del oído medio.

Cuando una onda sonora llega al tímpano, este se desplaza en ambos sentidos, siguiendo las oscilaciones de la onda sonora. La cadena de huesecillos transmite las vibraciones captadas por el tímpano hacia la cóclea. La cadena de huesecillos actúa como un transformador de impedancias: se pasa de un medio de propagación gaseoso (aire) a un medio líquido (líquido endolinfático en el interior de la cóclea).

El oído medio por tanto, no es más que un transmisor y adaptador de impedancia mecánica de las vibraciones del aire hacia la cóclea. Es sorprendente constatar que, con niveles sonoros cercanos al umbral de audición, el desplazamiento del tímpano es del orden del diámetro de un átomo, setecientas veces inferior al diámetro de un pelo humano.

La presencia de mucosidad que en ocasiones obstruye la trompa de Eustaquio dificulta o impide la igualación de presiones. Esto hace que, ante un cambio de presión estática, producido por ejemplo por un cambio de altitud del individuo, la membrana timpánica queda desplazada de su punto de equilibrio. Al modificar la altitud, hay una variación de la presión estática y el tímpano queda desplazado hacia el exterior o hacia el interior. En estas circunstancias, la rigidez del tímpano aumenta y su sensibilidad auditiva es entonces menor. Además, la respuesta en frecuencia se ve alterada. Tenemos

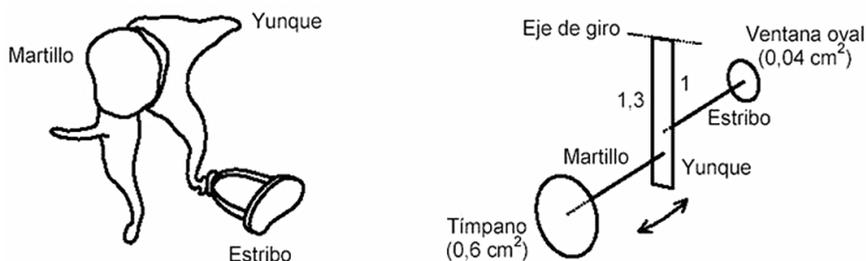
más dificultad en percibir las bajas y las altas frecuencias, pero aun así el oído permanece suficientemente sensible para permitir una comunicación. Tragando saliva, se abre de forma momentánea la trompa de Eustaquio y la presión estática a ambos lados del tímpano se iguala y se recupera la sensibilidad auditiva original. En caso de resfriado, este proceso no se produce por la presencia de mucosidad, y el individuo tiene la sensación de «sordera» o falta de sensibilidad acústica.

Muchos problemas asociados con la sordera por causas genéticas suelen tener su origen en la cadena de huesecillos. También un trauma acústico a consecuencia de un accidente o una exposición a un sonido de elevada intensidad pueden romper o alterar la cadena de transmisión mecánica o el tímpano, impidiendo que la información sonora procedente del exterior llegue total o parcialmente a la cóclea y después al cerebro.

### 2.1.2.1. La adaptación de impedancias

En términos de energía, solo el 0,1 % de la energía que llega por el aire se transmite a un medio líquido. Es decir, se pierde el 99,9 % de la energía, lo que supone una pérdida de 30 dB, que es una pérdida notable. Sin embargo, podemos escuchar sonidos de muy baja intensidad. Esto es posible gracias a que el oído dispone de diferentes mecanismos para compensar esta pérdida inevitable y amplificar la señal sonora para hacerla perceptible.

Para conseguir este propósito, el primer elemento está formado por la cadena de huesecillos. El área de la ventana oval respecto del tímpano facilita esta adaptación. La relación de impedancias entre el líquido endolinfático y el aire es de 4000: 1. La figura 2.10 muestra, a la izquierda, la posición de la cadena de huesecillos, y a la derecha, el diagrama mecánico del efecto transformador de impedancia. El papel del yunque (dibujado como una palanca vertical con punto de apoyo en la parte superior) es optimizar todo lo posible la transmisión mecánica en el paso de onda sonora en el aire a onda sonora en un medio líquido.



**Figura 2.10.** Izquierda: detalle del oído medio. Derecha: símil mecánico.

Sin esa adaptación, escucharíamos con 30 dB menos de sensibilidad. Aunque sin duda en ocasiones esto sería deseable, habría impedido la función primitiva de alertar de los peligros al humano en la prehistoria. Debido a la relación entre las superficies del tímpano (área  $S_1 = 0,6 \text{ cm}^2$ ) y la ventana oval (área  $S_2 = 0,04 \text{ cm}^2$ ), y debido a la interacción de la palanca que ofrece el yunque, donde los dos brazos de esta palanca tienen una longitud desigual ( $d_1/d_2 = \sim 1,3$ ), la amplificación de presión es teóricamente del orden de 26 veces (algo más de 28 dB). Estos 28 dB consiguen compensar casi la totalidad de los 30 dB que se pierden en una transmisión de una onda acústica de un medio aéreo a un medio líquido. La adaptación de impedancias es la que permite entre otras cosas, una radiación sonora eficiente de un altavoz o una buena absorción acústica de un material o estructura.

### 2.1.2.2. Respuesta en frecuencia del oído medio

La llamada *ganancia* del oído medio no debe entenderse como tal. En realidad, no disponemos de un amplificador en el oído, como lo conocemos vulgarmente. La cadena de huesecillos evita las pérdidas en la transmisión de las vibraciones que llegan por vía aérea procedente del tímpano a la ventana oval de la cóclea con transmisión por vía líquida, y eso, en lugar de una pérdida de 30 dB en la sensibilidad, se queda en una pérdida de 2 dB gracias a una óptima adaptación de impedancias.

La figura 2.11 representa la *ganancia* introducida por la transmisión mecánica entre el tímpano y la cóclea en función de la frecuencia. No obstante, hay que ser cauteloso en la ganancia total obtenida, ya que la función de transferencia de cualquier tipo de sistema mecánico depende de la fricción de las articulaciones óseas, la masa del tímpano/cadena huesecillos, la rigidez de las diversas membranas, ligamentos, volumen de aire, etc.

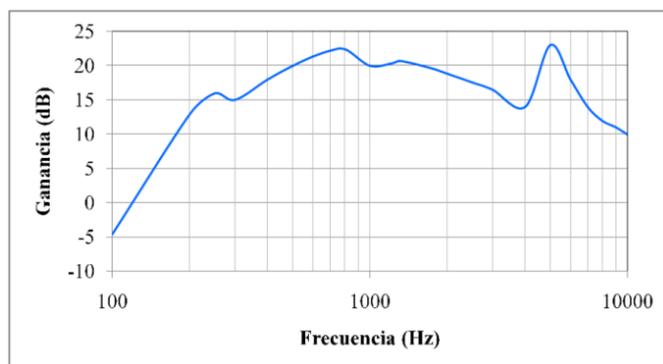
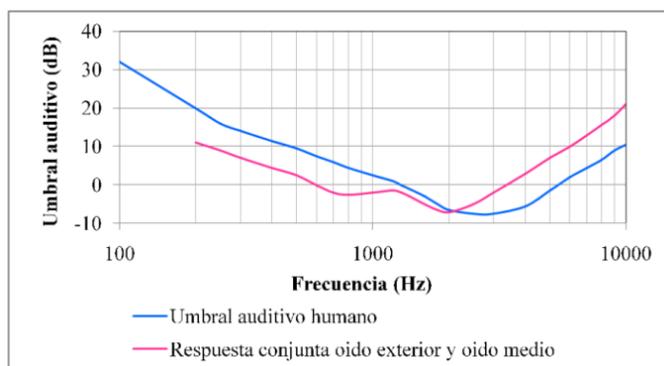


Figura 2.11. Ganancia introducida por la cadena de huesecillos.

Sin embargo, esta *ganancia* tiene un coste destacable: la respuesta en frecuencia del sistema no es lineal. Es decir, el oído humano no va a tener la misma sensibilidad para todas las frecuencias. El elemento causante de este defecto es sobre todo el oído medio, y en menor grado el oído externo. La respuesta del oído externo y medio conjuntamente se muestra en la figura 2.12. La línea de color azul muestra la respuesta total del oído humano, mientras que el oído externo y medio juntos ofrecen la respuesta en frecuencia en trazo de color rojo.



**Figura 2.12.** Umbral auditivo del oído humano frente a la respuesta conjunta del oído medio y externo.

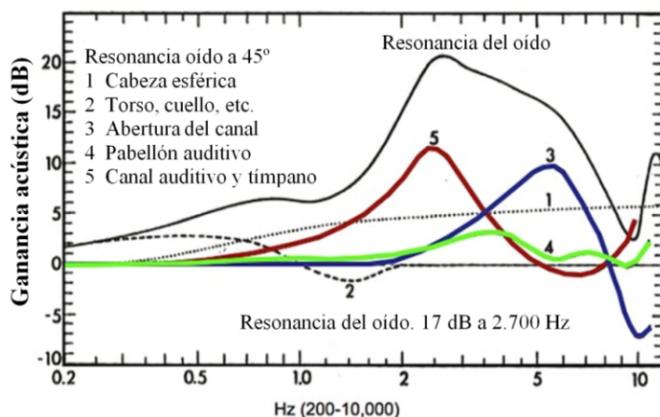
De acuerdo con lo expuesto, se puede concluir que:

- El oído externo y el oído medio son los que modelan la respuesta en frecuencia del oído, de acuerdo con la cantidad de energía acústica transmitida en cada frecuencia.
- El oído interno es un detector cuyo umbral para cada frecuencia es constante en casi todo el intervalo audible es decir, tiene un comportamiento lineal en frecuencia.

La figura 2.13 muestra con distintos colores las resonancias que introducen el canal auditivo y el tímpano, el pabellón auditivo, el torso y la cabeza. En color negro, la respuesta en frecuencia del conjunto, donde se produce una enfatización cercana a los 20 dB sobre los 3.000 Hz. En este modelo se considera a la cabeza como una esfera para simplificar los cálculos.

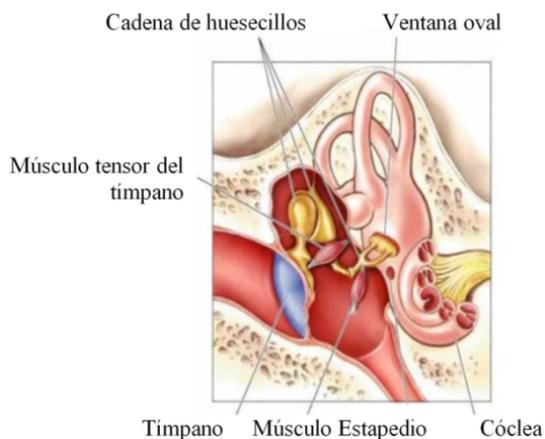
### 2.1.2.3. Mecanismo de autoprotección del oído medio

Cuando el oído capta señales sonoras con una intensidad superior a los 80 dB aproximadamente, entra en acción un mecanismo de autoprotección que tensa el movimiento del tímpano y del martillo.



**Figura 2.13.** Contribución teórica de los distintos elementos del oído, la cabeza y el torso a la respuesta en frecuencia total.

La figura 2.14 muestra la disposición de los dos músculos encargados de la protección del oído ante sonidos de intensidad superior a los 80 dB. Este mecanismo, a veces denominado *reflejo acústico*, se produce por la contracción del músculo estapedio y del tensor timpánico situados en el oído medio, provocada por los sonidos de nivel elevado, de media y baja frecuencia. Por un lado, el tensor timpánico aumenta la rigidez mecánica del tímpano para que cueste más desplazarlo (no aumenta su rigidez estructural).



**Figura 2.14.** Mecanismo de autoprotección del oído ante sonidos superiores a los 80 dB, con los músculos estapedio y tensor del tímpano.

Por otro lado, el músculo estapedio retiene los desplazamientos del estribo. Entre ambos, se consigue que la transmisión mecánica entre el tímpano y la cóclea tenga pérdidas. Con esto se disminuye la estimulación de las células ciliadas y se evitan daños internos. La función de este acto reflejo es proteger el oído interno de sobreestimulación ante cualquier sonido de elevado nivel, que incluye no solo los sonidos del mundo externo, sino también las vocalizaciones autogeneradas.

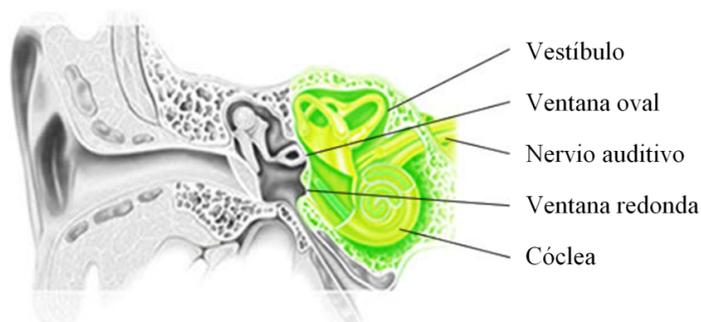
Este mecanismo de autoprotección conceptualmente es parecido al de un compresor de audio, donde el umbral se situaría en los 80 dB. Esto modifica la dinámica con la que se interpreta el sonido. Gracias a este mecanismo, el oído puede soportar niveles de presión elevados durante un tiempo limitado. Este mecanismo de autocontrol funciona para frecuencias inferiores a los 2 kHz. Pero esta protección tiene unas limitaciones:

- No protege para sonidos de larga duración.
- Protege únicamente las bajas y medias frecuencias (< 2 kHz.)
- No protege ante los sonidos de muy corta duración (como impactos, disparos, explosiones o similares) debido a la latencia del orden de 30 ms. Es decir, el mecanismo de protección se activa pasados 30 ms aproximadamente después de recibir el sonido. Un sonido de duración inferior no activará el mecanismo de autoprotección aunque tenga un nivel sonoro muy superior a los 80 dB.
- Permite reducir la percepción sonora de la propia voz al hablar. Esto es muy importante para los cantantes.
- Su activación es automática, aunque también se puede provocar voluntariamente en aquellas ocasiones en que una persona sabe que se va a producir un sonido de elevada intensidad.

### **2.1.3. Oído interno**

Su misión es pasar de una señal vibratoria proporcional a la señal sonora que llega al tímpano a señales eléctricas que se van a enviar al cerebro para que este las procese. Este complejo cambio se produce en la cóclea. Las células ciliadas se encargan de enviar un impulso eléctrico cuando reciben un estímulo vibratorio. El impulso eléctrico que generan es independiente del estímulo recibido. Este comportamiento se asemeja al de un convertidor analógico-digital.

Cada célula ciliada envía la información de impulsos eléctricos al cerebro a través del nervio acústico y este las procesa e interpreta en un complejo y todavía desconocido mecanismo. La figura 2.15 muestra un detalle de los elementos que forman el oído interno.



**Figura 2.15.** Detalle del sentido auditivo interno.

Como se ha comentado en el apartado anterior, la cadena de huesecillos desplaza la membrana oval de la cóclea. Estos desplazamientos sobre la membrana actúan sobre el líquido endolinfático en el interior de la cóclea, que es incompresible.

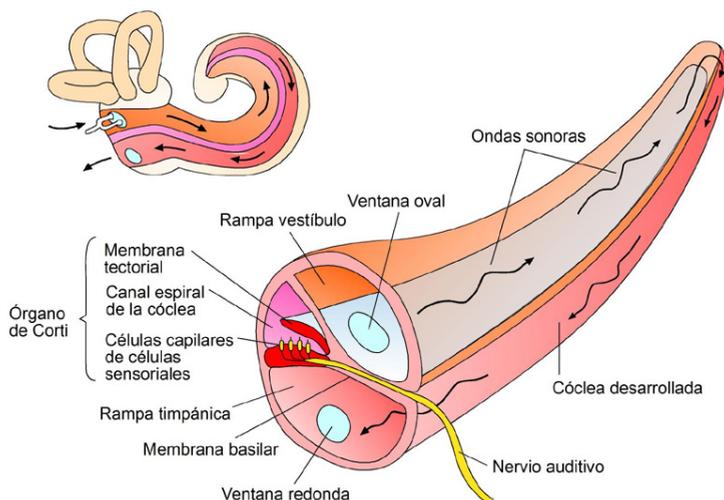
El líquido sometido a un proceso vibratorio por la percepción de sonidos complejos, con múltiples frecuencias y amplitudes cambiantes, presenta máximos y mínimos de presión acústica localizados a lo largo de la membrana basilar es decir, en toda la longitud de la cóclea. La cóclea alberga en su interior un conducto cerrado por sus extremos. Por un lado, tiene la membrana oval, que recibe las vibraciones del tímpano, y en el otro extremo tiene la ventana redonda, que cierra este tubo y que permite que el líquido en el interior de la cóclea pueda vibrar libremente.

### **2.1.3.1. Membrana basilar**

La membrana basilar tiene multitud de células ciliadas. Estas células tienen un cilio (pelo) que, cuando es excitado por una vibración, hace que la célula ciliada emita un impulso eléctrico. En la cóclea se pasa de una información de presión presente en el líquido a unos impulsos eléctricos que tienen una forma y una duración independientes del grado de estimulación mecánica recibida. Las células ciliadas actúan como un convertidor de señal analógico-digital. De la base de cada célula ciliada salen dos ramificaciones hacia el nervio auditivo, que llevarán por un lado los impulsos eléctricos del oído hacia el cerebro, que corresponden a la información sonora percibida y por otro, cada célula ciliada recibe del cerebro impulsos eléctricos, que permite al cerebro reagrupar a las células ciliadas en función de la complejidad de la señal sonora recibida.

La reagrupación de células ciliadas y algunas funciones que se realizan en el proceso de audición son hoy en día desconocidas. El mecanismo de la audición está ligado al procesado que hace nuestro cerebro; no es solo una cuestión de escuchar un sonido, sino de reconocerlo, interpretarlo y extraer la información. Ciertas particularidades del

sentido auditivo nos ilustran sobre la gran potencia de cálculo que realizamos diariamente sin darnos cuenta, como por ejemplo, seguir una conversación concreta inmersa entre otras cercanas o disfrutar escuchando una música. La figura 2.16 muestra un esquema simplificado de la cóclea, que normalmente hace 2,5 vueltas.



**Figura 2.16.** Oído interno. Detalle simplificado de la cóclea.

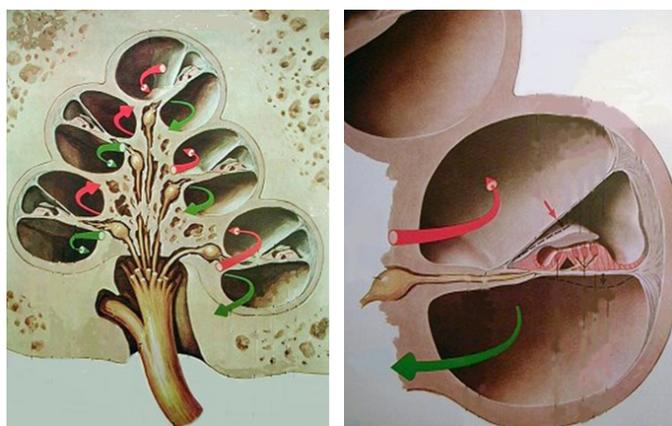
Las flechas indican la vibración que, procedente del tímpano, llega a la cóclea a través de la ventana oval. Este desplazamiento vibratorio mueve el líquido endolinfático, recorriendo toda la membrana basilar por ambos lados, hasta llegar a la ventana redonda. Esta sobrepresión está simbolizada por las flechas que indican el camino que sigue la onda acústica. Como el líquido endolinfático es incompresible, este desplazamiento llega hasta la ventana redonda situada al otro extremo de la cóclea que se desplaza en contrafase respecto a la ventana oval.

En la práctica, las señales sonoras que llegan al oído son complejas y tienen diferentes frecuencias con distintas amplitudes que llegan simultáneamente. Estas vibraciones producen máximos y mínimos de presión en distintos puntos de la membrana basilar, que después el cerebro interpretará como distintas frecuencias. La información es recogida por el órgano de Corti, que aloja a las células ciliadas, sensibles a los movimientos de la membrana basilar.

El órgano de Corti no tiene líquido en su interior, y es la membrana de Reissner la encargada de separar físicamente las cavidades del órgano de Corti y la cóclea. La figura 2.17 muestra a la izquierda, una sección de la cóclea donde se puede ver el órgano de Corti entre la rampa vestíbulo y la timpánica; a la derecha, se muestra un detalle de la

cóclea; en la parte inferior, la rama timpánica (flecha verde), y en la parte superior, la rama vestibular (flecha roja).

Las vibraciones transmitidas por el estribo sobre la ventana oval provocan vibraciones en el líquido endolinfático. Cuando estamos ante señales sonoras complejas (múltiples frecuencias y amplitudes), aparecen a lo largo del interior de la cóclea zonas con más presión y otras con menos presión acústica. Estos máximos de presión deforman la membrana de Reissner (figura 2.17) en unos puntos concretos que, a su vez, desplazan a la membrana tectónica (figura 2.18) que está tocando a las células ciliadas, y estas al ser estimuladas, envían un impulso eléctrico al cerebro a través del nervio auditivo.

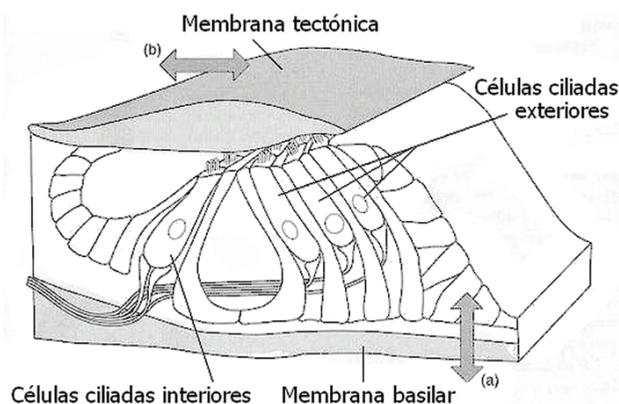


**Figura 2.17.** Sección de la cóclea donde se puede ver con flechas el movimiento oscilatorio del líquido endolinfático. A la derecha, se observa con más detalle la membrana de Reissner, indicada con una flecha roja pequeña.

La membrana tectónica actúa a modo de «palpador» mecánico que permite estimular a las células ciliadas cuando el oído detecta una presión acústica superior al umbral mínimo audible.

La membrana basilar vibra por acción de las ondas que llegan a la cóclea (movimiento a). Estas vibraciones hacen que la membrana tectónica que actúa como un «palpador» vaya excitando las diferentes células ciliadas (movimiento b).

La combinación de movimientos es lo que posibilita que las informaciones de sonido lleguen al cerebro. Nótese que los desplazamientos de las «partes móviles» del oído son extremadamente pequeños y, además, no quedan alterados por los movimientos suaves de la cabeza.



**Figura 2.18.** Detalle de la cóclea donde se observa la membrana de Reissner y la membrana tectónica encargada de estimular a las células ciliadas situadas en la parte inferior de esta.

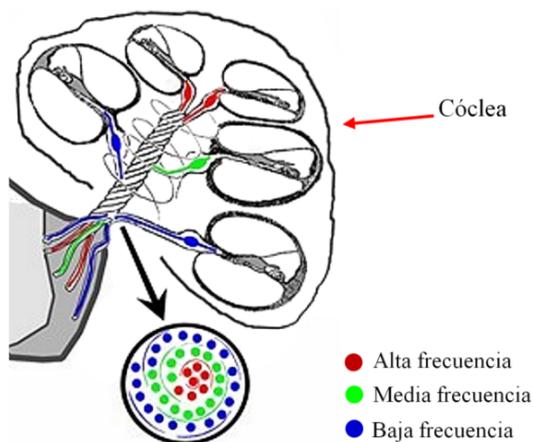
La membrana basilar es gruesa y estrecha por la parte de la base cercana a las ventanas oval y redonda, mientras que es delgada y ancha por la parte cercana al helicotrema o ápex. Sobre esta membrana se encuentran las células ciliadas. Esta forma permite que la parte gruesa y estrecha presente resonancias a frecuencias altas, mientras que la parte delgada y ancha presenta resonancias a bajas frecuencias. La posición de las células ciliadas sobre la membrana basilar determina a qué frecuencias van a enviar impulsos eléctricos al cerebro. La parte ancha es sensible a las bajas frecuencias y aloja una mayor densidad de células ciliadas que la parte estrecha sensible a las altas frecuencias.

### 2.1.3.2. El nervio auditivo

El nervio auditivo está formado por multitud de fibras nerviosas, cada una asociada a una célula. Las terminaciones correspondientes a las células de alta frecuencia se encuentran en la parte interior del nervio auditivo, rodeadas de las terminaciones nerviosas de media y baja frecuencia que las protegen. Esta especial disposición de las terminaciones nerviosas recibe el nombre de *distribución cocleotópica* y tiene por objetivo proteger a aquellas terminaciones nerviosas de alta frecuencia que existen en menor número, respecto de las más abundantes de baja frecuencia ante un neuroma acústico (figura 2.19).

Cualquier pérdida de estas terminaciones conlleva una pérdida de sensibilidad auditiva a frecuencias altas, mientras que la pérdida de terminaciones nerviosas de baja frecuencia no afecta a la sensibilidad a estas bandas, ya que se disponen de muchos más

elementos sensibles. El neuroma acústico ataca primero a la corteza del nervio acústico y por tanto, primero destruye las terminaciones superficiales, que son de baja frecuencia. Esto inicialmente no afectaría al sentido auditivo, salvo afectaciones muy importantes sobre la parte central del nervio auditivo.



**Figura 2.19.** Detalle del nervio auditivo que se inicia en la cóclea y de la distribución cocleotópica de las fibras nerviosas.

### 2.1.3.3. Células ciliadas

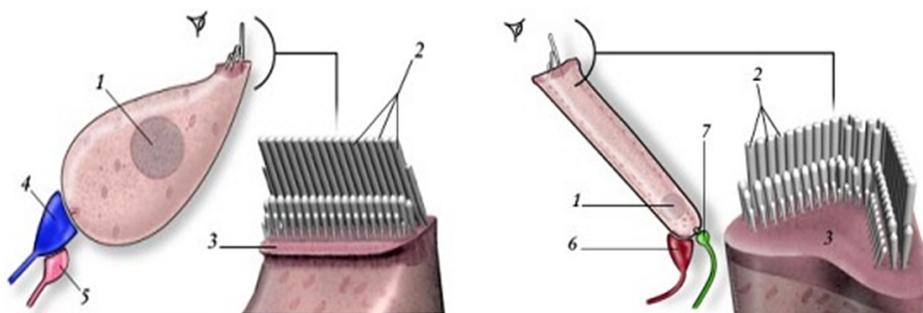
Sobre la membrana basilar se encuentran las células ciliadas que cubren la totalidad de la superficie. Existen dos tipos de células ciliadas: las interiores (CCI) y las exteriores (CCE). Las células ciliadas interiores son las que realmente dan información «sonora» al cerebro. En total, tenemos unas 3.500 células ciliadas interiores, una cifra ridícula si la comparamos con los millones de elementos sensibles a la luz de que dispone el ojo humano. La pérdida de CCI afecta directamente a la capacidad auditiva. El envejecimiento del cuerpo propicia que parte de estas células dejen de estar activas. Es lo que se conoce como *presbiacusia*, fenómeno al que están sometidas todas las personas y que hace que con la edad se pierda algo de sensibilidad y sobre todo, se reduzca notablemente la percepción de las altas frecuencias, mientras que las bajas frecuencias permanecen prácticamente inalteradas.

Las células externas CCE son las encargadas de permitir al sentido auditivo llegar a escuchar sonidos por debajo de los 60 dB. En total, hay unas 12.500 células exteriores que se encargan de amplificar las vibraciones percibidas por el tímpano. Este proceso se explica con detalle más adelante. Estas células son las causantes de un fenómeno por desgracia muy

frecuente entre la población: los acúfenos o *tinnitus*. Las personas que padecen de acúfenos perciben constantemente sonido en su oído, aunque no haya sonido externo alguno. Es un sonido similar al ruido rosa con un ligero enfatizado en algunas bandas de media frecuencia.

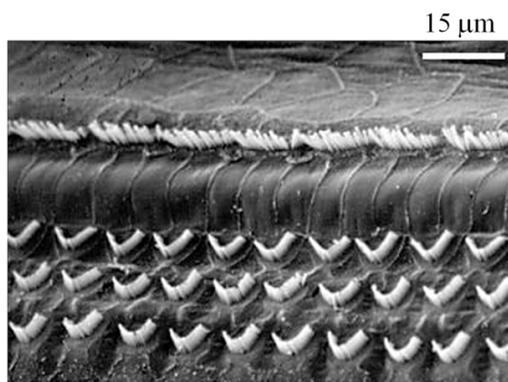
Este sonido se produce por acción de las CCE que están disparando impulsos de forma aleatoria y permanente a causa de un trauma acústico reciente o por razones genéticas, aunque el oído permanezca en silencio. La aleatoriedad de los impulsos emitidos produce esta sensación de sonido monótono parecido al ruido rosa. Esta patología se puede tratar con fármacos que «duermen» a las CCE, de manera que, si bien el paciente pierde sensibilidad auditiva, minimiza o deja de escuchar los sonidos internos. Sin duda, esta posibilidad de «desconectar» a las CCE podría ser de mucha utilidad cuando nos encontramos en situaciones que nos impiden poder dormir a causa de escuchar un sonido no deseado.

Cada célula se comunica con el cerebro a través de una terminación nerviosa en su base, la dendrita. Como se ha dicho anteriormente, existen dos vías de comunicación entre el oído y el cerebro: la vía aferente, donde los impulsos eléctricos se envían al cerebro, y la vía eferente, donde la célula ciliada recibe información del cerebro. La vía aferente envía información al cerebro, mientras que la vía eferente es la que permite al cerebro reagrupar las células ciliadas en función de la complejidad de la señal sonora a decodificar. La forma en que el cerebro decide la reagrupación de células es un mecanismo desconocido hoy en día. La figura 2.20 muestra una ilustración de cómo son las células ciliadas interiores (CCI) y las exteriores (CCE).



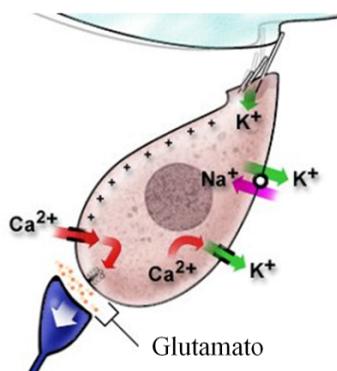
**Figura 2.20.** Derecha: célula ciliada exterior. Izquierda: célula ciliada interior.  
1: Núcleo. 2: Estereocilia. 3: Plano cuticular. 4: Extremo aferente radial (dendrita de tipo I).  
5: Extremo eferente lateral. 6: Extremo eferente medio. 7: Extremo aferente espiral (dendrita de tipo II). (Ilustración: Remy Pujol).

Los cilios de que disponen las CCI y las CCE presentan diferentes alineaciones. La figura 2.21 muestra una microfotografía donde se observan las tres hileras de CCE y una sola hilera de CCI.



**Figura 2.21.** Ampliación en la que se puede observar en la parte superior (color blanco) las CCI y las tres hileras de CCE (forma de V).

El desplazamiento de los cilios es de unos 100 pm, que equivaldría ampliando el cilio a la altura de 300 m de la torre Eiffel, a desplazar la punta de la torre 10 mm. Cuando la célula es excitada, envía un impulso eléctrico a través de su conexión con la dendrita. El impulso eléctrico que se genera obedece a una reacción química que se produce en el interior de la célula, como se muestra en la figura 2.22.



**Figura 2.22.** Acción del glutamato sobre la dendrita, destruyendo la conexión. (Ilustración: Remy Pujol).

La conexión «eléctrica» con la dendrita se realiza por el proceso de excitotoxicidad. La excitotoxicidad es el proceso patológico por el cual las neuronas son dañadas y pueden llegar a ser destruidas por las sobreactivaciones de los receptores de los neurotransmisores.

res, como el NMDA y el AMPAE. El glutamato es un aminoácido que está presente en la mayoría de las funciones normales del sistema nervioso central (SNC) y es el mayor mediador de señales excitadoras y de la plasticidad del sistema nervioso, pero también puede ser altamente neurotóxico. Debido a las múltiples acciones fisiológicas en las que interviene, su concentración en el espacio extracelular no puede superar determinados niveles. Por este motivo, la homeostasis de los sistemas glutamérgicos (metabolismo, mecanismos de liberación, receptores y transportadores) están finamente regulados. El glutamato debe estar presente en concentraciones adecuadas, en el momento y en el lugar correcto.

#### ***2.1.3.4. Pérdida temporal y permanente de la sensibilidad del oído***

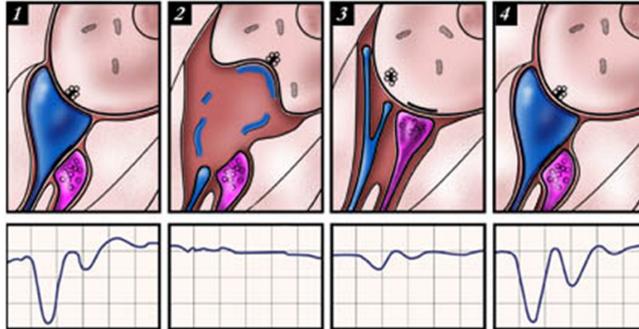
Cuando muchas células ciliadas son excitadas durante un período excesivo, los tejidos no pueden reabsorber el exceso de glutamato, de manera que aparece una concentración excesiva de este aminoácido. La consecuencia es que la dendrita queda temporalmente «desconectada» de la terminación nerviosa (figura 2.23). Cuando esto sucede, el sentido auditivo pierde sensibilidad.

Pasadas unas horas o días, si las concentraciones de glutamato se restablecen, la dendrita vuelve a conectar con la célula ciliada, restableciendo la transmisión de información. Este fenómeno se conoce como pérdida temporal del oído (TTS). Si esta «desconexión» tiene una duración excesiva, la terminación nerviosa no puede restablecerse y entonces se pierde irreversiblemente la conexión con la célula ciliada. El oído, entonces, padece una pérdida de sensibilidad permanente (PTS).

Esta pérdida suele ser gradual y no es perceptible al principio. Cuando el sujeto se da cuenta de que ha perdido sensibilidad auditiva, el proceso está demasiado avanzado y ya es demasiado tarde. La figura 2.23 muestra el proceso de recuperación de la dendrita después de sufrir un trauma acústico. En esta figura, la secuencia 1 muestra que la conexión entre la CCI y la dendrita funciona perfectamente. En la secuencia 2, se observa cómo, a consecuencia de sufrir un trauma acústico (sonido de intensidad elevada, accidente), la dendrita ha desaparecido. Nótese que aún quedan las terminaciones nerviosas, pero que estas no «tocan» a la célula ciliada y por tanto, no hay comunicación eléctrica posible en ningún sentido. En esta situación, el oído pierde sensibilidad auditiva. En la secuencia 3, un día después del trauma acústico y siempre que la agresión acústica haya cesado, las terminaciones nerviosas «contactan» de nuevo con la célula. En la secuencia 4, pasados cinco días, se restablece el funcionamiento «normal» de la dendrita completamente regenerada.

En la parte inferior de la figura 2.23, se ilustran los oscilogramas de los impulsos eléctricos que envía la célula ciliada. En las escenas 1 y 4 los impulsos llegan al nervio auditivo, mientras que en las secuencias 2 y 3 no hay impulsos que lleguen al nervio auditivo (pérdida de sensibilidad auditiva). El abuso, tanto en la escucha de sonido a nivel

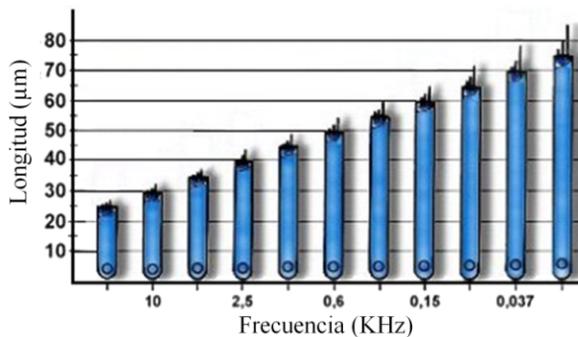
elevado como durante un tiempo excesivo, llega a castigar en exceso esta capacidad de regeneración y por último, se pierde de forma permanente la sensibilidad auditiva.



**Figura 2.23.** Secuencia que ilustra la «desconexión» temporal de la CCI a causa de un trauma acústico y su posterior recuperación. (Ilustración: Remy Pujol).

### 2.1.3.5. Detección de la frecuencia de un sonido

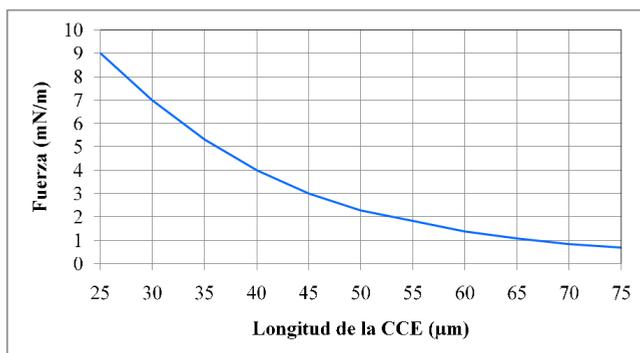
Las CCE son las encargadas de «amplificar» las señales vibratorias para ayudar a las CCI a que «disparen». Cuando estas células son estimuladas, se contraen y con ello se asegura de que las células interiores sean estimuladas y envíen el impulso eléctrico al cerebro. La longitud de las CCE depende de la banda de frecuencia a la que reaccionan: a mayor longitud, menor frecuencia, pero también menor fuerza. Estas características se pueden ver resumidas en la figura 2.24.



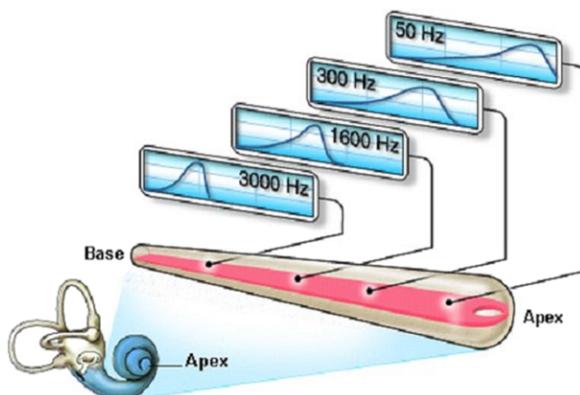
**Figura 2.24.** Longitud de las CCE del oído humano y su relación con la banda de frecuencias a la que son sensibles. (Ilustración: Remy Pujol).

Las CCE más cortas tienen una longitud de 25  $\mu\text{m}$  y trabajan a altas frecuencias, mientras que las más largas son de 75  $\mu\text{m}$  y trabajan a bajas frecuencias. La fuerza que pueden ejercer las CCE es inversamente proporcional a su longitud.

Las más cortas pueden hacer más fuerza, esto permite a las CCE reaccionar con mayor celeridad a las rápidas variaciones de las altas frecuencias y de esta manera ser captadas con mayor facilidad. La figura 2.25 muestra la fuerza que pueden desarrollar estas CCE.



**Figura 2.25.** Fuerza que pueda ejercer una CCE en función de su longitud.



**Figura 2.26.** Selectividad en frecuencia del oído.  
(Ilustración: Remy Pujol).

Con técnicas basadas en la utilización de materiales radioactivos situados sobre la membrana basilar (Békésy), se puede visualizar su desplazamiento cuando está sometida

a señales externas. Para bajas frecuencias, el desplazamiento máximo se obtiene en la parte más delgada y ancha (helicotrema), mientras que para altas frecuencias sucede lo contrario. La detección tonal de los sonidos se determina por la posición de las células ciliadas sobre la membrana basilar.

En la figura 2.26, las amplitudes de los desplazamientos de la membrana basilar se han dibujado iguales para todas las frecuencias para una mayor claridad. En realidad, a alta frecuencia las amplitudes de las vibraciones son mucho menores que a baja frecuencia.

# Capítulo 3.

## Percepción del sonido

### 3.1. Introducción

Existen dos teorías relacionadas con el fenómeno de la audición y que tratan de explicar cómo se produce este fenómeno: *a)* la teoría de la posición o de la resonancia y *b)* la teoría de la frecuencia. También existen otras teorías que son combinación de estas dos. Todas ellas tratan de explicar los fenómenos que permiten escuchar los sonidos y cuáles son los mecanismos que nos permiten discriminar unas señales de sonido de los otros.

#### 3.1.1. Teoría de la posición (o resonancia)

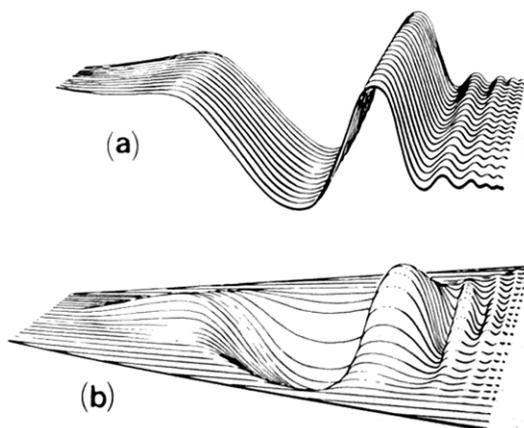
Esta teoría aparece aproximadamente a inicios del año 1600. Las versiones más modernas de esta teoría corresponden a la teoría de Helmholtz a finales del año 1800. Helmholtz relacionó la teoría de Ohm sobre la audición y las ideas de Müller. La teoría de Ohm indicaba que el oído lleva a cabo un análisis espectral de los sonidos periódicos y complejos. Esto permite al oído descomponer la onda compleja en sus componentes y observar las fases entre ellas. El principal problema de esta teoría es que no permite el análisis temporal. Como es conocido, el oído es sensible tanto a las evoluciones temporales como en frecuencia de la señal acústica. Müller defiende la idea del papel especializado de los diferentes sentidos. Por ejemplo, los sonidos son interpretados a través de las señales neuronales que, procedentes del oído, llegan al cerebro; la visión del ojo es posible por el estímulo de la luz o la presión sobre el globo ocular, etc.

La teoría de la posición propuesta por Helmholtz es relativamente muy simple. Presupone que la membrana basilar está formada por una serie de segmentos, cada uno tiene una frecuencia de resonancia concreta. Por este motivo, una señal acústica externa produce una excitación de las partes que tienen las mismas frecuencias de resonancia.

Los diferentes segmentos se encuentran distribuidos sobre la membrana basilar y su vibración indica la presencia de componentes en frecuencia en su banda. Debido a la interacción entre diferentes tonos, se producen distorsiones no lineales en el oído medio. Estas distorsiones son transmitidas a la cóclea, dentro de la cual los diferentes segmentos vibran con las frecuencias implicadas de las señales. De esta manera, la distorsión es percibida como una característica propia del sonido original.

Esta teoría tiene algunos aspectos que hacen dudar de su veracidad. En primer lugar, cuando alguna señal con componentes en frecuencia muy marcadas llega al oído medio, la teoría de la posición (o resonancia) supone que algún elemento dentro de la membrana basilar entrará en vibración, indicando la presencia de una componente en frecuencia. Pero, para que esto sea posible, es necesario que la membrana basilar esté tensada. Békesy demostró que la membrana basilar no está tensionada en absoluto; por tanto, es prácticamente imposible que pueda resonar a unas frecuencias concretas.

En segundo lugar, la teoría de la posición tampoco puede explicar el fenómeno de «restitución de la fundamental». Este fenómeno se produce, por ejemplo, con una señal acústica con tres componentes en frecuencia separadas 100Hz: 1.100 Hz, 1.200 Hz y 1.300 Hz. Al escuchar esta señal, se perciben los tonos a las frecuencias de 1.100 Hz, 1.200 Hz y 1.300 Hz. En principio, no deberíamos poder escuchar el tono de la fundamental de 100 Hz. Sin embargo, se puede percibir la frecuencia de 100 Hz aunque realmente no esté presente en la señal original. En la figura 3.1 podemos ver, de forma exagerada, una simulación de la deformación de la membrana basilar cuando es excitada con una señal vibratoria.



**Figura 3.1.** Movimiento de la membrana basilar.  
a) Movimiento libre. b) Movimiento con el contorno fijo (más real).

Otro aspecto en contra de esta teoría es que la percepción de pequeñas variaciones en frecuencia implicaría que los diferentes segmentos estarían sintonizados a frecuencias muy precisas. Pero resulta que un segmento que pueda discriminar pequeñas variaciones en frecuencia debería tener un factor de amortiguación más bajo es decir, podría vibrar más fácilmente y por tanto, esto haría que, una vez pasado el estímulo externo, la vibración del segmento alargaría su duración. Esta situación provocaría una reverberación interminable en nuestros oídos al percibir cualquier sonido aspecto que evidentemente, no sucede.

Asimismo, la teoría de la posición atribuye al oído medio las distorsiones que se producen. Diversos trabajos de investigación han revelado que el oído medio tiene un comportamiento totalmente lineal y que la mayor parte de las distorsiones no lineales son imputables a la cóclea.

### 3.1.2. Teoría de la frecuencia

Esta teoría propone que los mecanismos periféricos del oído no pueden llevar a cabo la discriminación en frecuencia, pero sí transmitir las señales al sistema nervioso central para que este las procese. Algunas teorías, como la de Rutherford propuesta poco después de la de Helmholtz, apuntan la similitud del proceso de audición con el proceso de comunicación vía teléfono. Por este motivo, también se conoce como *teoría telefónica*. Esta teoría apunta que la cóclea no es sensible en frecuencia por bandas, sino que es sensible a todas las frecuencias por igual. La tarea de las células ciliadas es simplemente transmitir todos los parámetros de la señal estímulo al sistema nervioso y que el análisis se efectúa después al más alto nivel.

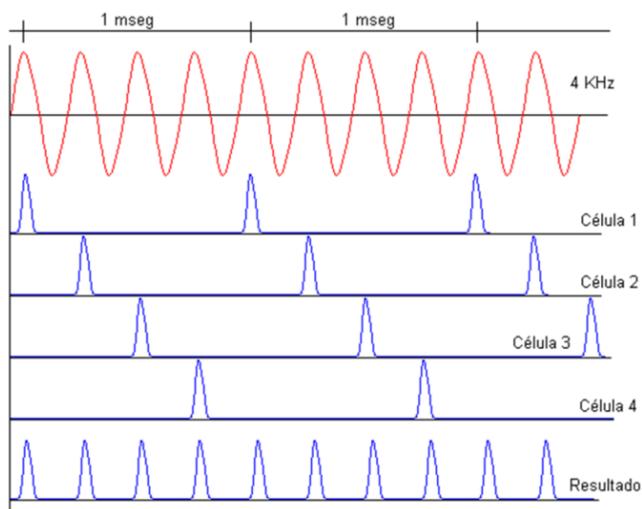
La célula ciliada únicamente puede responder de una forma binaria «todo o nada» a un estímulo exterior. La célula ciliada transmite información efectuando descargas con la misma periodicidad que la señal excitadora. La teoría de la frecuencia presupone que las fibras nerviosas pueden activarse tan rápidamente como sea necesario. Sin embargo, el número máximo de disparos o descargas por segundo que puede efectuar una célula ciliada es limitado. Esta limitación es consecuencia del tiempo de recuperación necesario entre disparos consecutivos. Entre dos descargas consecutivas, el tiempo mínimo es de 1 ms. Por debajo de este tiempo, la célula ciliada no puede enviar ningún impulso, a pesar de estar estimulada. A partir de este tiempo mínimo de reacción, se deduce fácilmente que la máxima frecuencia a la que puede trabajar una célula ciliada sola es de 1.000 Hz. Entonces ¿cómo podemos escuchar sonidos con frecuencias más elevadas? La teoría de la frecuencia no puede explicar este fenómeno.

El segundo problema con esta teoría es que, ante la presencia de zonas deterioradas en la cóclea, las altas frecuencias siempre se resienten más, de manera que se produce

una pérdida de la capacidad auditiva en la zona de frecuencias medias y altas. Este hecho no se puede explicar con la teoría de la frecuencia, ya que esta teoría afirma que la cóclea no tiene una respuesta diferente en función de la frecuencia, sino que responde por igual a todas ellas. Por otro lado, existen muchos estudios que demuestran una considerable selectividad en frecuencia a lo largo de la cóclea.

### 3.1.3. Percepción de la tonalidad del sonido

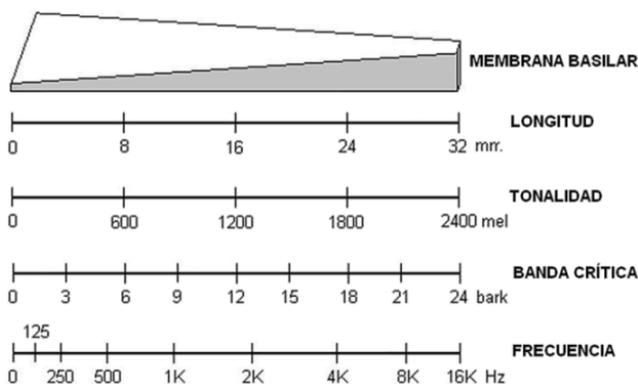
La sensación de la tonalidad de un sonido está asociada a la posición de las células ciliadas excitadas respecto de su posición sobre la membrana basilar. Una modificación importante de la teoría de la frecuencia fue introducida por E. G. Wever en el año 1949. En lugar de una célula ciliada que sigue la evolución de toda la señal, Wever propone que se unen grupos más o menos amplios de células ciliadas para seguir de una forma secuencial las evoluciones de la señal sonora. Es el llamado «principio vóley», según el cual diversas células ciliadas se coordinan para detectar las evoluciones de una única señal estímulo. Así, por ejemplo, para detectar una señal de 4 kHz son necesarias cuatro células, y cada una se descargará una vez cada cuatro períodos de la señal estímulo. Esta agrupación la decide el sentido auditivo. En la figura 3.2 se muestra un ejemplo gráfico de la explicación de este fenómeno. Teniendo en cuenta esta teoría, para poder escuchar las altas frecuencias, el oído dedica más células. Por ejemplo, para poder detectar una frecuencia de 10 kHz, se precisan de diez veces más células que para detectar una de 1 kHz. Esta teoría puede justificar por qué las frecuencias altas son las primeras que con la edad se dejan de percibir.



**Figura 3.2.** Explicación del principio «vóley» utilizado por las células ciliadas propuesto por E. G. Wever en el año 1949.

Con el paso del tiempo, las células se van degenerando y mueren: es la presbiacusia, fenómeno al cual está sometido el oído humano. En principio, la pérdida de células se produce de forma uniforme a lo largo de la membrana basilar. Al disponer de menos células ciliadas en las bandas de alta frecuencia, la pérdida de algunas células hace que proporcionalmente, no se disponga de un número suficiente para descodificar las altas frecuencias. Esto provoca que el límite audible superior vaya menguando con el paso de los años.

La sensación de tonalidad está asociada con la posición de las células ciliadas sobre la membrana basilar, como muestra la figura 3.3, que indica la equivalencia entre la escala tonal en Mel, la frecuencia en Hz y las bandas críticas en Bark respecto de la distancia de separación del máximo de vibración a la base de la membrana basilar. Podemos observar el carácter lineal con la distancia de las escalas en Mel y en Bark. En cambio, la escala de frecuencias es logarítmica.



**Figura 3.3.** Percepción de tonalidad en un sonido. Diferentes escalas para indicar el mismo concepto.

### 3.1.4. Percepción de la duración del sonido

La percepción de señales de corta duración no está exenta de particularidades. Los sonidos de corta duración pueden tener un carácter nocivo o molesto cuando los niveles sonoros máximos son elevados. A los sonidos breves y de corta duración se les llama *impulsivos*, ya que su origen principal es por el choque o la colisión de dos estructuras más o menos rígidas. Estos sonidos tienen una duración muy pequeña, y siempre bastante inferior a 1 s.

Se ha comprobado experimentalmente que dos impulsos recibidos dentro de un intervalo de tiempo inferior a los 50 ms no pueden ser discriminados por el oído, que

interpreta que hay un solo impulso. El oído hace una «integración» temporal de la señal y aunque realmente hay dos impulsos, percibimos un solo impulso de mayor duración e intensidad. Si las señales impulsivas están separadas entre ellas más de 50 ms, entonces se detectan los dos impulsos por separado.

Este fenómeno es bastante conocido en acústica arquitectónica. Dos reflexiones recibidas con un retardo superior a los 50 ms producirán un eco, mientras que, si estas reflexiones están por debajo de los 50 ms, no podrán ser distinguidas por el oído y no se distingue el eco. Con 50 ms el sonido recorre 17 m. a la temperatura ambiente de 22° por lo que, si una reflexión hace un recorrido de 17 m mayor que el sonido directo, tendremos un eco.

En algunos casos, cuando los impulsos son múltiples y se encuentran dentro de los 50 ms, la señal «suena» diferente, ya que a la señal original se suman reflexiones que hacen cambiar sus características cualitativas. No es posible distinguir cuántos impulsos hay realmente, pero se percibe que el sonido suena distinto, adquiriendo en ocasiones un carácter de sonido «metálico». Esta situación se puede producir con distancias cortas entre paredes paralelas separadas pocos metros de distancia. Los sucesivos rebotes originan múltiples reflexiones separadas pocos milisegundos y son las que originan el carácter metálico del sonido escuchado.

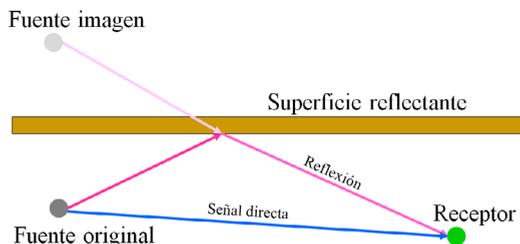
En general, para cualquier distancia, este fenómeno se llama *eco flotante* y afecta a las «colas» de la señal sonora. Este fenómeno se puede observar situándose entre dos superficies planas o superficies cóncavas y escuchar el sonido dando una palmada. Al sonido original de la palmada se añaden las sucesivas reflexiones entre las paredes que producen el carácter «metálico» del sonido, con reflexiones principalmente de medias y altas frecuencias. Si una de las superficies es cóncava (por ejemplo, el techo de un recinto deportivo), el efecto se concentra en el foco geométrico de la superficie cóncava, que suele estar en la parte central de la pista.

### 3.1.5. Efecto Haas

Este fenómeno permite variar la posición de la fuente de sonido. Fue descubierto por el Dr. Helmut Haas en 1949 y llamado también como *efecto de precedencia*. Establece que, para una disposición entre fuente sonora y oyente como la mostrada en la figura 3.4, el oído humano determina la posición de la fuente en función de la señal sonora que llega antes:

- Un sonido seguido de otro con un retraso inferior a los 3 ms hace que la posición de la fuente sonora quede alterada.
- Un sonido seguido de otro con un retraso entre 10 y 40 ms hace que la posición de la fuente sonora no quede alterada.

- Para retardos superiores a los 50 ms para voz y de 80 ms para música, se distinguen dos fuentes sonoras.



**Figura 3.4.** Explicación del efecto de precedencia.

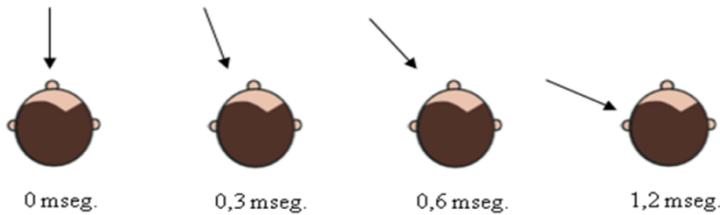
En la figura 3.4, el sonido directo siempre llega antes que la reflexión con la pared. Cuando este retardo es inferior a los 3 ms, la fuente sonora queda identificada (en el ejemplo, con vector rojo). Si el retraso se sitúa entre los 10 y los 40 ms, aproximadamente, la fuente sonora no se identifica y se sitúa entre la fuente real y la imagen. Si el retraso es mayor, se distinguen las dos fuentes. El efecto de precedencia permite localizar fuentes en ambientes reverberantes.

El efecto Haas tiene muchas aplicaciones en audio, por ejemplo para dar más profundidad a las grabaciones y ubicar instrumentos en la imagen estéreo. Para desplazar la imagen sonora de un canal en estéreo hacia L o R, normalmente se utiliza el control panorámico.

Este control actúa disminuyendo el nivel de uno u otro canal, de tal manera que la imagen sonora virtual se ladea hacia el lado izquierdo o derecho (L-R) para un observador situado en la parte central L-R. La limitación de este sistema radica en que el nivel radiado por un canal disminuye y resulta problemático para panorámicas cercanas al 100 %, donde genera una situación no deseable, ya que el sonido procedente de un canal prácticamente desaparece. Cuando la zona de escucha es amplia, una parte de los oyentes notarán una disminución del nivel sonoro de uno de los canales. Se puede evitar este problema si en lugar de un panorámico se introduce un retardo de 1,2 ms en un canal, para conseguir un panorámico de hasta el 100 %, pero sin alterar los niveles sonoros radiados por ambos altavoces en estéreo. La figura 3.5 muestra, mediante una flecha, la procedencia sonora en un sistema estéreo percibida por un oyente con solo añadir un retardo en el canal derecho (R):

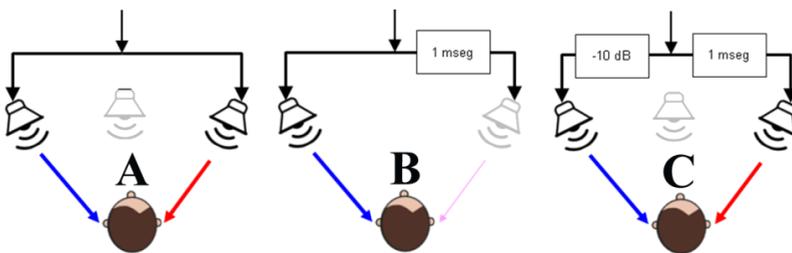
- Sin retardo (0 ms), la imagen sonora es frontal, llega el mismo nivel del canal L y R.

- Con un retardo de 0,3 ms sobre el canal R, la imagen sonora se ladea ligeramente a la izquierda.
- Incrementando el retardo a 0,6 ms sobre el canal R, la imagen sonora está claramente ladeada hacia la izquierda.
- Con un retardo de 1,2 ms, se consigue un panorama próximo al 100%, la señal procede de la izquierda (el nivel radiado por Ly R es el mismo).



**Figura 3.5.** Variación de la panorámica estéreo introduciendo un retraso en el canal R. Las flechas indican la procedencia del sonido percibido por el oyente.

Este fenómeno se puede percibir perfectamente con auriculares, ya que cada oído recibe la información sonora de su canal. La reproducción mediante altavoces permite percibir el fenómeno en la zona donde hay la cobertura de L + R, es decir, la zona óptima para escuchar el estéreo. Las personas alejadas de esta zona seguirán teniendo el mismo nivel sonoro, pero sin poder observar el fenómeno del panorámico del estéreo. La figura 3.6 muestra que un retraso de 1 ms sobre un canal equivale a una reducción del nivel sonoro de 10 dB, pero sin tocar para nada los niveles sonoros radiados por ambos canales.



**Figura 3.6.** A. Señal estéreo nivel L = R, imagen virtual centrada. B. Señal estéreo nivel L = R, retraso 1 ms en R, imagen virtual 100% sobre L. C. Señal estéreo nivel L = R, retraso 1 ms en R, -10 dB en L, imagen virtual centrada.

### 3.1.6. Fenómeno de enmascaramiento

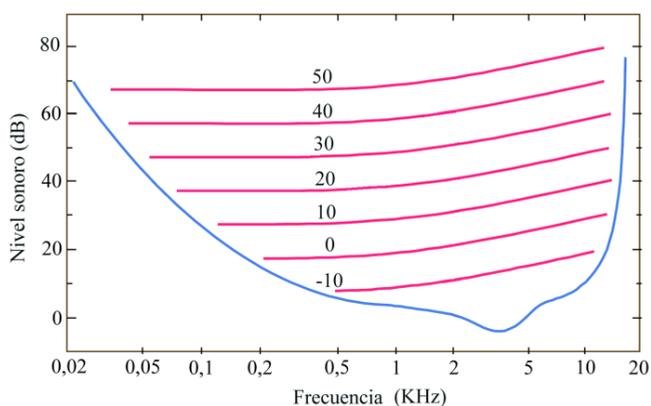
Es uno de los fenómenos más importantes en psicoacústica. Consiste en que algunos sonidos «camuflan» otros sonidos. Esta circunstancia impide que el sentido auditivo detecte la presencia de las componentes «tapadas».

Existen diversas formas de enmascaramiento:

- Enmascaramiento de tonos por señales de banda ancha.
- Enmascaramiento de tonos por señales de banda estrecha.
- Enmascaramiento de tonos por otros tonos.
- Enmascaramiento temporal.

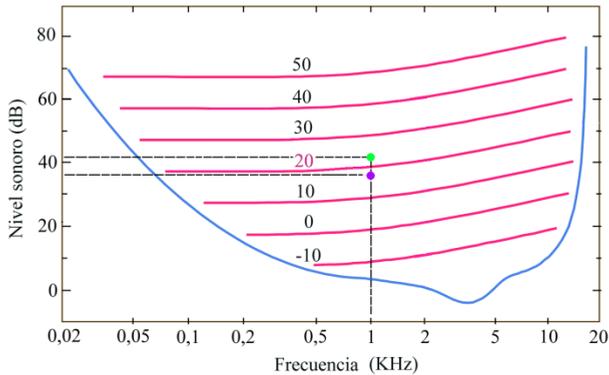
#### 3.1.6.1. Enmascaramiento de tonos por señales de banda ancha

Suele ser el caso más habitual. Las señales sonoras que podemos percibir diariamente suelen tener un contenido espectral amplio, es decir, con muchas frecuencias simultáneas. Ante la presencia de este tipo de señales sonoras de banda ancha, los niveles de sensibilidad auditiva se modifican, de suerte que se pueden producir enmascaramientos de componentes tonales. La figura 3.7 muestra el efecto enmascarante de una señal de banda ancha, como puede ser el ruido blanco en este caso. A mayor nivel de la señal, más capacidad para enmascarar. La curva azul muestra el umbral de audición normalizado. Los niveles de las curvas rojas corresponden al nivel de la señal enmascarante en dB.



**Figura 3.7.** Curvas de enmascaramiento con señales de banda ancha (en este caso, ruido blanco). (Zhang & Shrestha, 2003).

La figura 3.8 ilustra dos casos en los que la señal enmascarante tiene un nivel de 20 dB. El punto lila corresponde a un tono de 1 kHz con un nivel de 38 dB, el tono no puede ser detectado. Sin embargo, si subimos el nivel del tono de 1 kHz a 41 dB (color verde), entonces, al superar la curva de 20 dB de la señal de banda ancha, el tono de 1 kHz será audible.

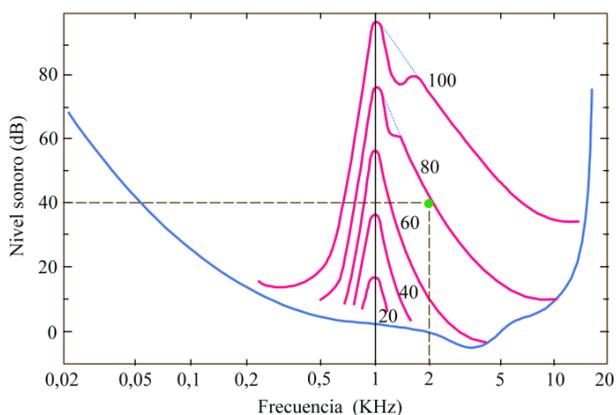


**Figura 3.8.** Sobre una señal enmascarante de banda ancha de 20 dB, el tono representado con el punto verde es audible, mientras que el tono representado por el punto lila queda enmascarado. (Zhang & Shrestha, 2003).

### 3.1.6.2. Enmascaramiento de tonos por señales de banda estrecha

Este fenómeno se produce cuando la señal enmascarante es de banda estrecha. Una señal de banda estrecha puede ser una señal de ruido rosa o blanco, filtrada por un filtro pasa banda (generalmente, de octava o tercio de octava). La señal enmascarante, pues, tiene múltiples frecuencias, pero limitadas dentro de la banda seleccionada. El efecto enmascarante es, por tanto, mucho menor que en el caso de la banda ancha, que es el más enmascarante de todos. Las curvas en rojo de la figura 3.9 muestran el efecto de una señal enmascarante de banda estrecha centrada en 1 kHz con un ancho de banda de 160 Hz.

El punto verde en la figura 3.9 muestra el caso de una señal de 2 kHz y una amplitud de 40 dB, que es enmascarada por la señal de banda estrecha centrada en 1 kHz y con un nivel de 80 dB o superior. Cabe destacar que para bajos niveles de señal enmascarante (20 dB, 40 dB) la curva es simétrica, mientras que para niveles de señal superiores las curvas no son simétricas. Nótese que las frecuencias superiores a la central presentan un efecto enmascarante más amplio (pendiente más suave) a la derecha correspondiente a la alta frecuencia. Este efecto es conocido como enmascaramiento ascendente no lineal.



**Figura 3.9.** Curvas de enmascaramiento para una señal centrada en 1 kHz y de 160 Hz de ancho de banda. (Zhang & Shrestha, 2003).

### 3.1.6.3. Enmascaramiento de un tono por otro tono

Este fenómeno se produce cuando se reproducen distintos tonos simultáneamente. A nivel general, las componentes de baja frecuencia tienen una capacidad enmascarante mayor que las altas frecuencias. Las vibraciones de baja frecuencia de la membrana basilar son de mayor amplitud, de manera que las células situadas en la zona cercana a la alta frecuencia pueden ser sometidas a desplazamientos de baja frecuencia que anulan parcialmente su capacidad de respuesta. Este efecto se traduce en que no podemos percibir los sonidos de medias y altas frecuencias cuando estamos ante señales de gran amplitud de baja frecuencia.

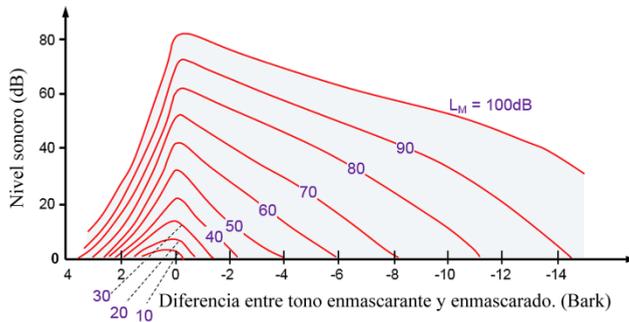
Es el caso que se produce cuando intentamos escuchar el sonido de media y alta frecuencia de un pájaro cantando en un árbol y pasa un autobús (sonido de baja frecuencia). El sonido del vehículo impide percibir el del pájaro. Suponiendo que el pájaro no deje de cantar, su sonido no se percibe, pero su información acústica sigue presente. Este fenómeno es el que aprovechan algunos sistemas de grabación digital domésticos ya en desuso (como el MD, DCC) o actuales (como el MP3) para eliminar información redundante. Con esta estrategia se reduce drásticamente el volumen de datos para almacenar, permitiendo ficheros de sonido más pequeños.

Pueden darse tres situaciones distintas:

- El tono es completamente enmascarado por el tono enmascarante.
- Ambos tonos se modulan entre ellos.
- Ambos tonos se distinguen.

A partir del gráfico de la figura 3.10, se distinguen tres situaciones distintas:

- Cuanto mayor sea el nivel del tono enmascarante, mayor intervalo de frecuencias pueden quedar enmascaradas.
- Los tonos cercanos en frecuencia pueden ser enmascarados fácilmente. Con mayor separación de frecuencia, el enmascaramiento es más difícil.
- Es más fácil enmascarar las altas frecuencias que las bajas frecuencias.



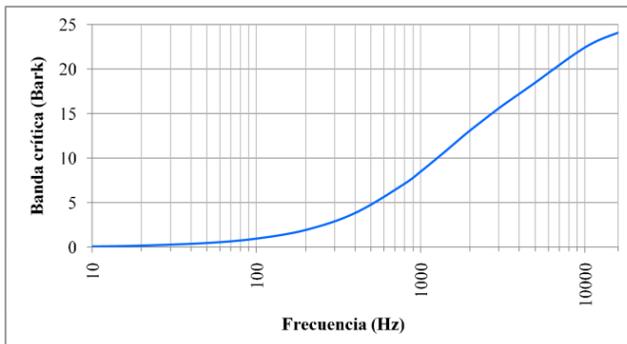
**Figura 3.10.** Curvas de enmascaramiento de tonos. (Zhang & Shrestha, 2003).

La relación entre frecuencia (Hz) y banda crítica (Bark) viene dada por la ecuación 3.1.

$$\text{Bark} = 13\arctan[0,00076 \cdot f] + 3,5\arctan\left[\left(\frac{f}{7 \cdot 500}\right)^2\right] \quad (3.1)$$

Donde F es la frecuencia en Hz.

La figura 3.11 muestra la relación entre frecuencia y banda crítica.



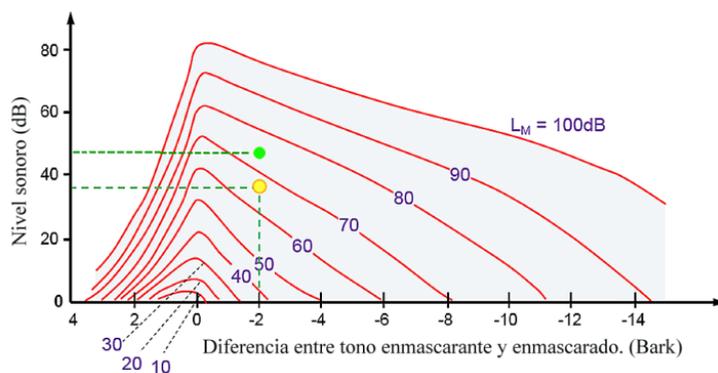
**Figura 3.11.** Relación entre frecuencia en Hz y banda crítica en Bark.

Veamos la aplicación práctica con un ejemplo. Supongamos que una señal sonora tiene dos tonos. El primero, a 1000 Hz con un nivel de 60 dB. El segundo, centrado a 1.370 Hz con un nivel de 38 dB. Hay que valorar si se produce enmascaramiento. En caso de producirse, siempre el tono de más baja frecuencia puede enmascarar al de alta frecuencia. En este ejemplo, el tono enmascarante es el de 1.000 Hz y el enmascarado es el de 1.370 Hz.

Primero deben calcularse las bandas críticas correspondientes de cada tono. Para ello, aplicamos la ecuación 3.1. El tono de 1.000 Hz da 8,5 Bark y el tono de 1.370 Hz da 10,58 Bark, por lo que la diferencia será:

$$\Delta Z = 8,51 - 10,58 = -2,07$$

La figura 3.12 muestra la posición (punto amarillo) del tono enmascarado.



**Figura 3.12.** El punto amarillo muestra el tono enmascarado del ejemplo.

A partir del resultado gráfico, podemos comprobar que el tono de 1.370 Hz con un nivel de 38 dB queda enmascarado por el tono de 1.000 Hz y 70 dB. Si ahora el tono de 1.370 Hz pasa a tener un nivel de 46 dB (punto verde), este sería audible.

### 3.1.6.4. Enmascaramiento temporal

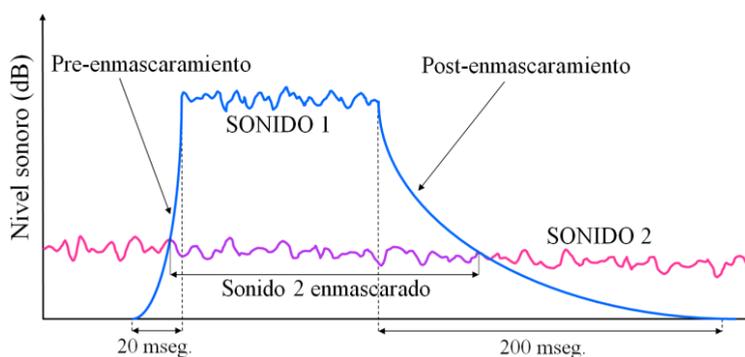
Este enmascaramiento se produce en el dominio temporal. En función de la duración de un sonido, este puede enmascarar otros sonidos cercanos en tiempo. El enmascaramiento temporal tiene tres partes, que podemos ver en la figura 3.13:

- Pre enmascaramiento. Fenómeno en el que se enmascara un sonido de prueba antes de que se active el sonido del enmascarador. Parece sorprendente, pero, por supuesto, los humanos no pueden escuchar el futuro. Cuando la señal sonora

empieza a crecer de nivel y llega al oído, se produce este efecto. El enmascaramiento previo solo puede ocurrir unos 20 ms antes de que comience el sonido de enmascaramiento. Este fenómeno en general se suele ignorar, ya que es muy breve y muy difícil de cuantificar.

- Enmascaramiento simultáneo. Fenómeno en el que se enmascara un sonido de prueba mientras se reproduce el sonido del enmascarador. Durante el enmascaramiento temporal simultáneo, la duración del sonido de prueba es muy importante. Cuanto más corta sea la duración del sonido, más silencioso se percibe.
- Pos enmascaramiento. Fenómeno en el que un sonido de prueba se enmascara después de que se apague el sonido del enmascarador. El pos enmascaramiento depende de la duración del sonido del enmascaramiento. Cuanto más breve sea el sonido del enmascaramiento, más rápido decaerá el efecto posterior al enmascaramiento. El pos enmascaramiento ocurre dentro de los 200 ms desde que termina el sonido de enmascaramiento. Transcurridos unos 200 ms aproximadamente, la audición vuelve a su estado «normal».

La figura 3.13 muestra gráficamente los conceptos de pre- y pos enmascaramiento que un sonido 1 produce sobre un sonido 2.



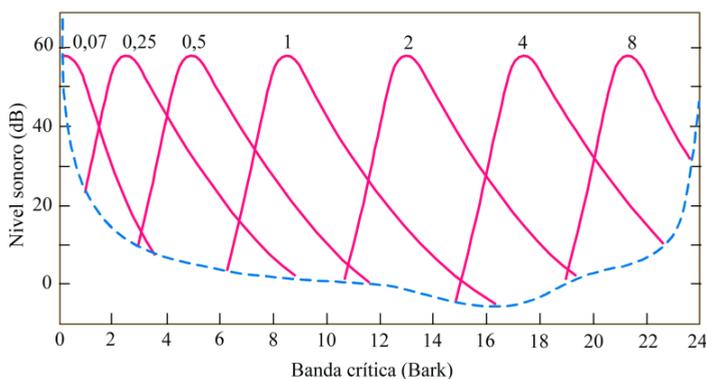
**Figura 3.13.** Pre- y pos enmascaramiento producido por un sonido.

Como se aprecia en la figura 3.13, el sonido 2 se escucha inicialmente, porque no hay otro sonido. La irrupción brusca del sonido 1 con un nivel superior produce un enmascaramiento sobre el sonido 2 que queda enmascarado, con una duración superior a la del propio sonido 1 (color lila), debido al pre- y pos enmascaramiento. El efecto más importante es el pos enmascaramiento y debe ser tenido muy en cuenta en la detección de la procedencia del sonido 3D, en las mediciones de sensibilidad auditiva con tonos y en la edición de efectos sonoros.

### 3.1.6.5. Banda crítica. Selectividad auditiva tonal

El oído humano puede detectar la presencia de distintas componentes tonales, siempre que estas se encuentren en distintas bandas críticas. El oído humano puede distinguir frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz, aproximadamente. Sin embargo, la capacidad para distinguir tonos individuales varía en función de la frecuencia. Para baja frecuencia se distinguen cambios de tonalidad de pocos hercios, mientras que para altas frecuencias los cambios de tonalidad requieren una variación mayor en frecuencia. El concepto de *banda crítica* fue propuesto por el Dr. H. Fletcher en 1933 y explica este fenómeno. La escala en Bark fue propuesta por el profesor E. Zwicker en 1961, en memoria del físico Alemán H. Barkhausen.

Se considera que el oído humano tiene 24 bandas críticas. Una banda crítica es como un filtro pasa banda, con una frecuencia central y un ancho de banda. El ancho de banda es constante de 100 Hz para frecuencias inferiores a los 500 Hz aproximadamente y para frecuencias superiores, el ancho de banda del filtro aumenta con un porcentaje de la frecuencia. Por este motivo, en acústica se utilizan los filtros de octava o tercio de octava, con los que se obtienen resultados similares a la percepción auditiva humana. La figura 3.14 muestra el patrón de enmascaramiento producido por ruido de banda estrecha a diferentes frecuencias discretas (KHz). La curva azul muestra el umbral auditivo estandarizado.



**Figura 3.14.** Bandas críticas para distintas frecuencias discretas entre 70 Hz y 8 kHz, producidas por ruido de banda estrecha. (Zhang & Shrestha, 2003).

Cuando dos tonos de distinta frecuencia se muestran simultáneamente, pueden suceder distintas cosas en función de su diferencia de frecuencias y la posición de la banda crítica.

### 3.1.6.5.1. Tonos muy juntos. Fluctuación

Si ambos tonos son muy similares en frecuencia y ambos se encuentran dentro de la misma banda crítica, no se pueden distinguir por separado y nuestro sentido auditivo lo interpreta como un batido en frecuencia. Cuando la diferencia es cercana a los 4 Hz, se llama *fluctuación*. El sonido resultante parece que tiene una pulsación. Cuando algunas personas escuchan estos sonidos en ambientes muy silenciosos, sin tener un referente claro, lo interpretan como variaciones de presión atmosférica que «bloquea» sus oídos, manifestando percibir una sensación ensordecedora a pesar de los bajos niveles sonoros.

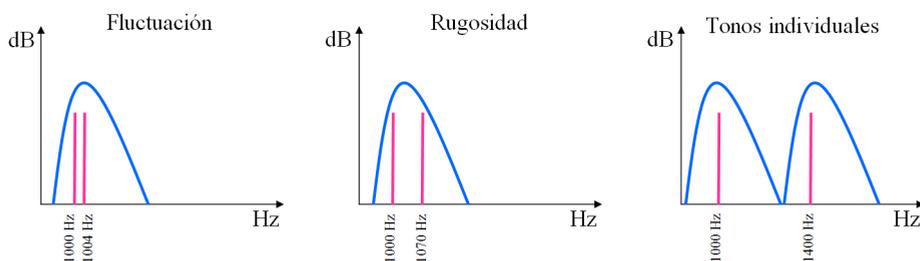
### 3.1.6.5.2. Tonos ligeramente separados. Rugosidad

Es una situación similar a la anterior. Ambos tonos están dentro de la misma banda crítica. Cuando los tonos reproducidos simultáneamente tienen una diferencia cercana a los 70 Hz, se genera un sonido «rugoso» en el que se percibe una rápida fluctuación del batido en frecuencia.

### 3.1.6.5.3. Tonos individuales separados

Cuando se encuentran suficientemente separados en frecuencia, se pueden distinguir ambos por separado, siempre que los tonos no estén dentro de la misma banda crítica.

La figura 3.15 resume los tres casos expuestos anteriormente.



**Figura 3.15.** La audición humana puede distinguir distintos tonos si están en diferentes bandas críticas.

## 3.1.7. Sonidos de baja frecuencia e infrasonidos

La definición de infrasonido considera aquellas frecuencias que están por debajo del límite inferior audible, alrededor de los 16 Hz. Desafortunadamente, esta definición es engañosa, ya que el sonido sigue siendo audible a frecuencias muy por debajo de los 16 Hz. Por ejemplo, se han realizado mediciones del umbral de audición hasta 4 Hz para

exposición en campo libre (cámara anecoica) (Watanabe & Moller, 1990) y hasta 1,5 Hz para escuchar con auriculares (Yeowart et al., 1967). Un ejemplo es el órgano de viento de la catedral de Jasna Gora, que puede emitir sonidos por debajo de los 8 Hz y las diferencias son claramente perceptibles cuando estos registros están o no presentes en la interpretación musical. Como es bien conocido, aunque se dice que la banda audible empieza a los 20 Hz, en la naturaleza nada tiene un inicio brusco, por lo que las frecuencias inferiores son perfectamente perceptibles.

En términos de percepción humana, el calificativo *infrasonido* debería ser evitado y reemplazarlo por *ruido de baja frecuencia* o *sonido de baja frecuencia*, con una indicación del intervalo de frecuencia en consideración. El infrasonido debe reservarse para investigaciones de sonidos atmosféricos de muy baja frecuencia, de origen natural o artificial, que es una disciplina bien diferenciada.

### 3.1.7.1. *Infrasonidos naturales*

Hay muchas fuentes naturales de infrasonidos: los terremotos, las erupciones volcánicas, las olas del mar, los tsunamis, el viento y cualquier efecto que provoque oscilaciones lentas del aire. Las fuentes artificiales incluyen explosiones, grandes procesos de combustión, ventiladores de baja velocidad y maquinaria. La figura 3.16 muestra el intervalo y los niveles de los infrasonidos naturales en comparación con el umbral auditivo. La indicación *running* muestra el nivel y el intervalo de frecuencia del movimiento arriba y abajo de la cabeza al correr. Como se puede observar (zona sombreada en gris), las bajas frecuencias no se pueden escuchar para frecuencias inferiores a los 4 Hz, salvo si se usan presiones acústicas muy elevadas (Leventhall G. , 2007). Los infrasonidos naturales quedan por debajo de la baja frecuencia.

Varios detectores de vibración y contacto residen en la piel, cubriendo diferentes intervalos de frecuencia (Johnson, 2001). Los corpúsculos de Pacini son los más sensibles, con un umbral de desplazamiento de unos 0,002 mm a unos 200 Hz. Su sensibilidad a frecuencias más bajas se reduce a aproximadamente 50 dB por década desde la sensibilidad máxima. Gracias a estas células, podemos detectar la presión y las vibraciones sobre nuestra piel, y tienen una importancia clave a la hora de detectar tanto posibles amenazas físicas como en aspectos tan cotidianos como la acción de coger o tocar objetos.

El desplazamiento umbral de 0,002 mm a 200 Hz es similar al desplazamiento de partículas en el aire de una onda sonora de 200 Hz con una presión de 94 dB (1 Pa), que es un sonido de intensidad notable. Dado que el desplazamiento de partículas en una onda de sonido de presión fija se duplica a medida que la frecuencia se reduce a la mitad (20 dB por década), es poco probable que las ondas de sonido inaudibles exciten los receptores subcutáneos. La sensibilidad a los infrasonidos, comparada con la sensibilidad del oído según ISO 223, se muestra en la figura 3.17 (Watanabe & Moller, 1990).

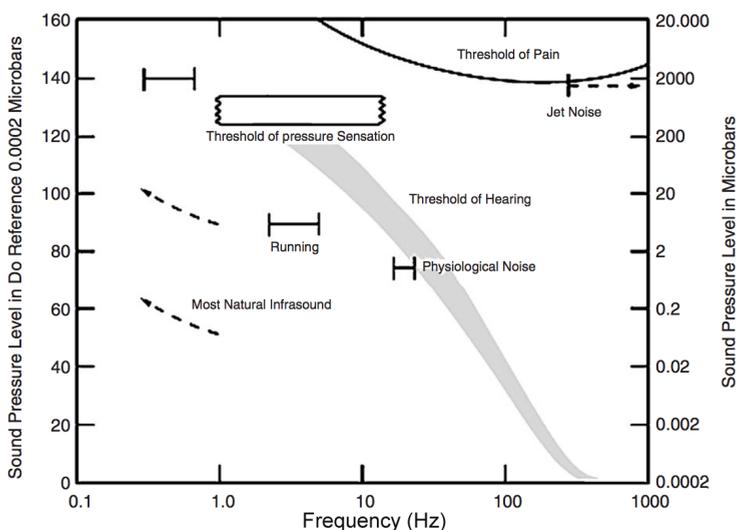


Figura 3.16. Infrasonidos naturales.

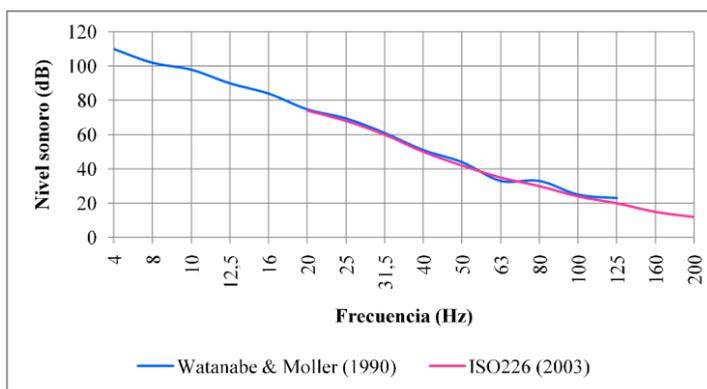
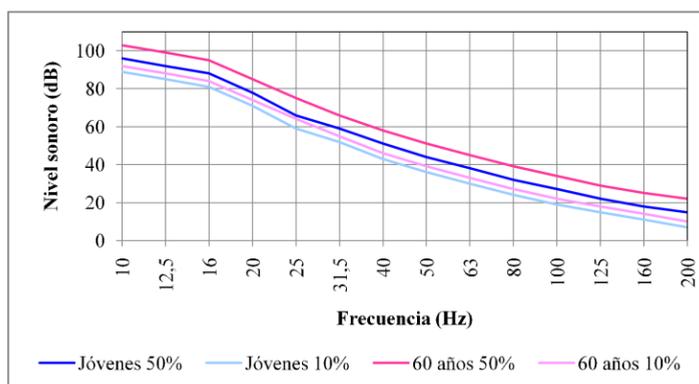


Figura 3.17. Umbral audible-perceptible para los infrasonidos y la baja frecuencia según Watanabe Moller y estándar ISO 226.

Se puede apreciar una coincidencia entre ambas curvas en las bandas (de 20 Hz a 125 Hz), aunque los umbrales para los infrasonidos se obtuvieron para una muestra mucho más pequeña que los umbrales estándar ISO. Sin embargo, ambos umbrales se obtuvieron utilizando jóvenes otológicamente normales. La suposición común de que el «infrasonido» es inaudible es incorrecta y surge de una desafortunada elección del descriptor. El infrasonido «real», en niveles y frecuencias por debajo de la audibilidad, es en gran parte un fenómeno natural.

Cabe destacar que los sujetos sordos experimentan vibraciones en el pecho en el mismo intervalo de frecuencia que los sujetos con audición normal y a pesar de ello, no escuchan los sonidos graves. La afirmación tan repetida de que «el infrasonido se puede sentir, pero no escuchar» no está respaldada por unas mediciones (Leventhall G. , 2007).

La sensibilidad auditiva se reduce con la edad, particularmente en las frecuencias más altas, hacia el extremo superior del intervalo audible. Las estadísticas de pérdida auditiva han sido estandarizadas según ISO 7029. La figura 3.18 muestra el umbral audible según ISO226 comparado con adultos de 60 años.



**Figura 3.18.** Umbral infrasonidos y baja frecuencia para jóvenes y adultos.

La figura 3.18 muestra, con color azul, la sensibilidad auditiva entre 20 Hz y 200 Hz según ISO 226 para jóvenes, mientras que con color rojo se muestran los resultados para personas con 60 años. Se comprueba que el 10% de los adultos de 60 años (color rosa) tienen una sensibilidad auditiva para infrasonidos y baja frecuencia, mejor que el 50% de los jóvenes participantes en el test (color azul).

La frecuencia más baja considerada en ISO 7029 es la de 125 Hz, que está en el intervalo de baja frecuencia, pero se ha comprobado que en esta frecuencia, el 25% de adultos de 60 años pueden tener un umbral de audición más bajo que la mediana de jóvenes de 18 años. Como también se demuestra en ISO 7029 que la pérdida auditiva se reduce a medida que se reduce la frecuencia, es probable que una condición similar se extienda a frecuencias más bajas. Los resultados muestran que el oído es el receptor más sensible para los infrasonidos y los sonidos de baja frecuencia. Si el sonido no se puede oír, no hay afección.

Sin embargo, a veces se informa de una sensibilidad inusual Feldmann y Pitten (2004). En este caso, una familia se quejó de ruidos nocturnos y los consiguientes efec-

tos en la salud, supuestamente causados por el ruido de una sala de calderas. Los niveles medidos fueron más altos en momentos de perturbación, pero muy por debajo del umbral medio. Por ejemplo a 10 Hz donde el umbral es 97 dB, un nivel medido de 35 dB causó perturbaciones, mientras que un nivel de 15 dB no lo hizo. Las mediciones de laboratorio separadas de los umbrales de baja frecuencia de los denunciante mostraron que estos estaban cerca de la mediana, dejando aún sin explicación el modo preciso de detección, aunque se observó que los niveles más altos, y la consiguiente molestia, estaban asociados con condiciones de viento. Las descripciones de los denunciante sobre el ruido y sus efectos sobre ellos incluían «frecuencia muy baja, zumbido, pulsaciones intermitentes, dolor en las piernas y en el área del estómago».

Los sonidos no deseados de infrasonidos y baja frecuencia producen efectos relacionados con el estrés en los oyentes. Las personas afectadas lo describen como un «zumbido» que normalmente no es detectable por los equipos de medición. El «zumbido» se escucha en varios países desarrollados y sigue siendo un misterio acústico, de modo que su origen puede no ser acústico, aunque la sensación que produce es la de un sonido (Leventhall, Benton, & Pelmear, 2003).

En ocasiones, se ha sugerido que las ondas electromagnéticas puedan ser la causa. Sin embargo, no hay evidencias de que dichas ondas produzcan la falsa sensación de infrasonidos y baja frecuencia. No obstante, hay constancia de que picos elevados de radiación electromagnética provocan efectos auditivos, como clics y zumbidos (Elder & Chou, 2003).

### **3.1.8. Interpretación del sonido**

La sensación sonora no depende únicamente del nivel de la señal y de su frecuencia. Los sonidos son, en general, señales complejas que varían en función del tiempo. Estas variaciones, junto a los aspectos cualitativos, son los que permiten una apreciación subjetiva para cada individuo. La audición humana puede considerarse como un proceso de reconocimiento de patrones, capaz de detectar ciertos patrones espectrales y estructuras de tiempo independientemente del nivel de presión sonora absoluta. Esto significa que la audición humana se adapta a un nivel de ruido básico y esencialmente solo captura el patrón relevante en el dominio del tiempo y la frecuencia. Por ejemplo, ante dos señales de ruido con el mismo nivel en dBA, uno de banda estrecha y otro de banda completa, nuestro sentido auditivo interpreta que el de banda estrecha suena menos.

El proceso de la audición humana parte de elementos objetivos para llegar a valoraciones subjetivas basadas en los aspectos que diferencian a un ser humano de sus homónimos, como la cultura, la lengua, el sexo, la experiencia, etc. A grandes rasgos, el proceso y la transformación de los sonidos se producen en tres niveles del cerebro:

- Como un acto reflejo. Cuando llega un sonido, en primer lugar se produce un acto reflejo, al que respondemos con un sobresalto si el sonido nos genera alarma o girando la cabeza si lo reconocemos. Este mecanismo es inherente al sentido auditivo y es el que alerta y alerta al ser humano de los peligros que le rodean. Es la reacción básica o más primitiva. El cerebro no sabe que un sonido ha llegado.
- En la corteza auditiva. Este proceso puede trasladarse a la corteza auditiva, donde el sonido se percibirá de forma consciente. El cerebro toma conciencia de que un sonido ha llegado. No ha interpretado la información que trae este sonido.
- Otras áreas del cerebro. Estas áreas permitirán que la percepción se llegue a hacer consciente y de ese modo, poder reconocer el sonido al relacionarlo con patrones que han sido almacenados previamente en la memoria (experiencia pasada). Tras la identificación, se producirá una respuesta voluntaria apropiada. El cerebro reconoce una voz, por ejemplo.

El proceso de decodificar el material acústico comienza en la vía auditiva primaria. Esta vía transporta el mensaje de la cóclea al área sensorial del lóbulo temporal, llamado *corteza auditiva*.

La primera parada del viaje se produce en el tronco del encéfalo, donde se decodifican las señales básicas del sonido, como la duración, la intensidad y la frecuencia. Posteriormente, el mensaje pasa por dos canales adicionales intermedios que desempeñan un papel importante para identificar la localización del sonido.

La siguiente parada se produce en el tálamo, una masa ovoide de sustancia gris situada en la base del cerebro. El tálamo integra los sistemas sensoriales del cuerpo, por lo que su función es esencial para que se inicie una respuesta motora (por ejemplo, una respuesta vocal).

La última neurona de la vía auditiva primaria conecta el tálamo con el córtex auditivo. En esta fase, el mensaje ya ha sido decodificado en su mayor parte. Sin embargo, es en la corteza auditiva donde la señal se identifica aún más, se memoriza y como resultado final, se produce una respuesta.

### **3.1.8.1. Sensaciones sonoras**

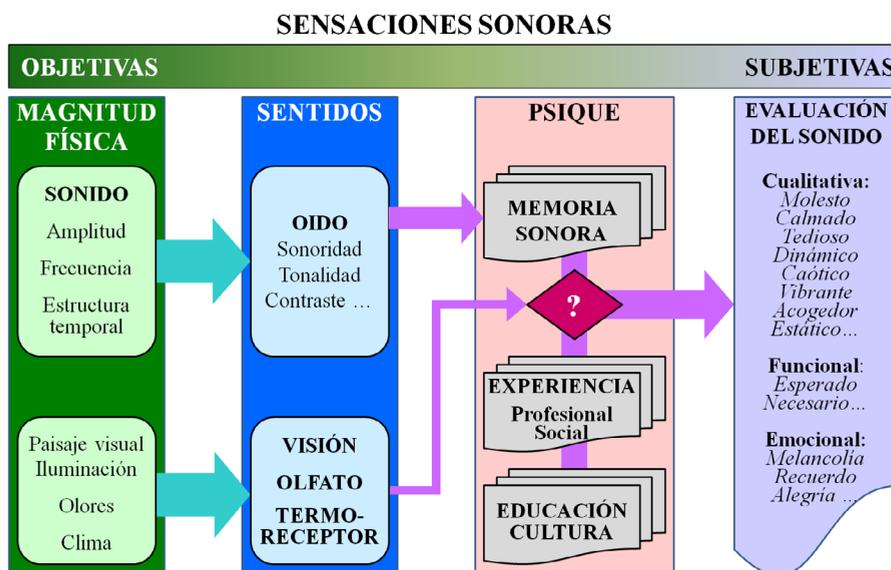
La percepción de los sonidos puede valorarse de distintas maneras. Los sonidos producen sensaciones sobre las personas. La figura 3.19 muestra esquemáticamente los elementos que influyen en la percepción sonora. A la izquierda, el sonido incidente en el oído que contiene elementos o características objetivas, y a la derecha, la interpretación o evaluación subjetiva final que el sonido produce.

Las sensaciones sonoras que produce un sonido pueden ser de dos tipos:

- **Objetivas:** todas las características físicas medibles del sonido.
- **Subjetivas:** todas las cualidades no medibles (de momento) del sonido.

Las señales externas, como el sonido, se pueden caracterizar por los tres parámetros básicos: amplitud, frecuencia y estructura temporal. Pero hay otras magnitudes físicas que alteran la percepción sonora, que son: el paisaje visual, la iluminación, los olores y la climatología presente durante la observación. Estas señales externas son captadas por los sensores específicos de los que disponemos. Por un lado, el oído que recibe los aspectos relativos a la señal sonora. Por otro lado, la visión junto con el olfato y los termo receptores complementan la percepción del entorno.

Los sonidos captados por el oído se transforman en señales eléctricas digitales y se envían al cerebro, que procesa dicha información basándose en el reconocimiento del sonido por comparación con otros sonidos escuchados anteriormente. El interrogante simboliza la decisión que se toma cuando se percibe un sonido y le damos una calificación o evaluación subjetiva. Esta decisión se nutre por un lado, de la información sonora en la memoria, y por otro lado, de la experiencia profesional, social, cultural y educativa que van a matizar la apreciación del sonido. Tras esta decisión, el sujeto emite un juicio subjetivo sobre su sensación al percibir un determinado sonido.



**Figura 3.19.** Proceso simplificado de la interpretación de los sonidos en función de las sensaciones que produce.

El lenguaje para describir estas sensaciones es subjetivo y tiene tres niveles. En un primer nivel está la valoración cualitativa que trata de describir la calidad sonora. En un segundo nivel está el aspecto o la cualidad funcional del sonido percibido. En este estado se decide si ese sonido era o no esperado, necesario, etc. Por último, el tercer nivel es el emocional, en el que se describe qué emociones nos proporciona el sonido percibido.

Un mismo sonido escuchado por personas con distinta procedencia geográfica o cultural va a producir distintas reacciones. Este es el motivo por el cual no es posible encontrar un indicador universal que valore, por ejemplo, el grado de molestia que un sonido puede producir sobre las personas. Si bien hay ciertos aspectos que pueden ser comunes (como el nivel sonoro, ciertas frecuencias, etc.), lo cierto es que en las valoraciones de los paisajes sonoros generalmente se producen respuestas dispares que dificultan obtener resultados definidos. En los paseos sonoros, las personas que participan en general pueden compartir la misma cultura y estilos de vida parecidos, pero siempre hay diferencias relativas a la experiencia profesional personal, las vivencias experimentadas y otras que introducen matices que propician distintas respuestas; es decir, no son grupos 100% homogéneos acústicamente.

#### *3.1.8.1.1. Magnitudes físicas*

Como señales de entrada al sistema auditivo, tenemos por un lado las magnitudes físicas conocidas (la amplitud, la frecuencia y la estructura temporal). Por otro lado, están las variables medibles (el paisaje visual y la iluminación en las cercanías, los olores que nos rodean y el clima). Todos estos elementos no solo contribuyen o alteran al propio sonido, sino que matizan nuestra sensación percibida.

#### *3.1.8.1.2. Sentidos*

Obviamente, la contribución más importante es la información que recibe el oído. Se produce un cambio de lenguaje en la valoración acústica de los sonidos percibidos. El oído no puede medir la amplitud ni las frecuencias de la señal y por eso «cambia» de lenguaje y usa términos cualitativos como: sonoridad, tonalidad, contraste, etc. Por otro lado, a través del resto de sentidos como la visión, el olfato y los termo receptores, se añade información que matiza la sensación sonora percibida. Estos dos tipos de sentidos envían información al cerebro, si bien el canal acústico es más importante que el canal sensorial.

#### *3.1.8.1.3. Psique*

En este bloque, el más desconocido, se interpretan los sonidos que adquieren sentido de acuerdo con un análisis multidimensional con todos los datos procedentes de los sentidos y la memoria adquirida, y donde hay tres grandes bloques:

- La memoria sonora, donde la persona ha almacenado a lo largo de su vida todo tipo de sonidos y que le sirve para reconocerlos rápidamente.
- La memoria donde se ubica la experiencia previa de la persona, según sus habilidades sociales desde su infancia y su orientación profesional.
- La memoria de la educación recibida, sus valores y principios éticos, su cultura, lenguaje, etc.

#### 3.1.8.1.4. Evaluación sonora

Las sensaciones, emociones e información que se extraen del sonido recibido tienen un gran componente de subjetividad, marcado por los aspectos de la psique de la persona, donde sus vivencias anteriores (memoria) desempeñan un papel fundamental en la valoración/interpretación de los sonidos. La evaluación sonora se hace en función de tres niveles:

- Nivel cualitativo: se describe con calificativos al sonido percibido. Esto no es una tarea fácil, porque calificar una cosa que no se ve, no se toca y no se puede almacenar resulta muy difícil. Esta calificación es la tarea más compleja y subjetiva en la valoración de un sonido.
- Nivel funcional: se valora si el sonido es esperado o necesario entre otros y resulta de vital importancia en determinadas situaciones. Esto requiere reconocer previamente el sonido y asociarlo a una acción. Por ejemplo: usando una herramienta de corte eléctrica, se espera un determinado sonido. Si este varía de una determinada manera, podemos «interpretar» que algo no va bien y tomar decisiones.
- Nivel emocional: se evocan los recuerdos que determinados sonidos despiertan en nuestra mente. No es el sonido en sí, que también, sino dónde o cuándo escuchamos ese sonido. Un niño pequeño se tranquiliza cuando reconoce la voz de sus padres.

#### 3.1.8.1.5. Reconocimiento del sonido

Estese produce en función de los tres bloques de datos de entrada:

- La memoria sonora: esta valoración es la de mayor peso y se matiza con los puntos siguientes.
- Las memorias de la experiencia social y profesional y de la educación y cultura: que tienen un peso notable en la decisión.
- La sensorial, de los sentidos complementarios como la visión (el que más influye en la percepción sonora) y el olfato y los termo receptores: que matizan en menor grado la decisión.

### 3.1.9. Influencia de la visión sobre la audición

Es uno de los fenómenos más importantes en cuanto a la valoración cualitativa de un sonido por una persona. Escuchar un sonido sin ver ninguna imagen no produce una valoración coincidente con personas expuestas a los mismos estímulos sonoros pero con visión. Este aspecto es muy importante en los *paseos sonoros* (llamados, en terminología anglosajona, *soundwalks*) a la hora de extraer resultados que puedan ser extrapolables al resto de la población.

La visión y la audición se influyen mutuamente. Podríamos decir que están disputándose constantemente la atención del cerebro. Por un lado, el sentido auditivo dispone de unas 3.500 CCI y unas 12.500 CCE para cada oído. En total, unas 16.000 células sensibles al sonido. Por otro lado, el sentido de la visión dispone de unos 130 millones de células *bastones* y 7 millones de células *cono*. Las primeras, sensibles a la luz y responsables de la visión periférica; las segundas, sensibles a los colores y a los detalles finos, ya que se encuentran en la mácula.

A pesar de la gran diferencia del número de sensores, la información de ambos órganos que llega al cerebro se interfiere mutuamente. Podríamos pensar que la visión siempre supera al oído; sin embargo, en determinadas circunstancias eso no siempre es cierto. El 90% de la información que llega al cerebro procede de la visión, mientras que solo el 10% procede del oído. El resto de sentidos (tacto, gusto, olfato) representa un porcentaje insignificante. El procesado del sonido es cien veces más rápido que el procesado de la imagen, por lo que aparece un retraso entre sonido e imagen en el proceso de reconocimiento de la información. Sin embargo, cuando vemos un objeto que cae, hay una total sincronía entre la imagen y el sonido. Esto es porque nuestro sentido auditivo introduce un retardo al sonido para sincronizar ambas informaciones. Esta circunstancia origina el concepto de permanencia. La permanencia es el tiempo que el sonido «se conserva» en nuestra mente. Para el sonido son cinco segundos, mientras que para la imagen es de un segundo.

El sonido no se procesa de forma racional. El sonido en la escala más alta del procesado evoca sentimientos y estos no son racionales. La música es el ejemplo más claro de este fenómeno. Por ejemplo, escuchar *El cant dels ocells* del maestro Pau Casals interpretado con violonchelo evoca sentimientos de recogimiento, de solemnidad, de tristeza. Sin embargo, la misma pieza interpretada con el mismo tempo, las mismas frecuencias, pero con un saxo, no produce las mismas sensaciones. Tanto el fenómeno de permanencia como el carácter irracional de la sensación sonora son las herramientas clave para el *branding* sonoro o sonido de marca, que utiliza conceptos como la *sonoridad periférica* que se trata en el capítulo 13.

#### 3.1.9.1. Los sonidos en entornos urbanos

Cuando paseamos por las calles de una ciudad, podemos ver diferentes objetos, vehículos, personas, árboles, etc., y podemos oír simultáneamente diversos sonidos como

voces, ruido de vehículos, sirenas, etc. La percepción cerebral integra eficaz y automáticamente estos estímulos no solo de forma primaria, como el color y la forma de los objetos, sino también a través de la modalidad sensorial: asociamos las voces con las personas o el ruido de un vehículo con un modelo concreto. Este proceso contribuye a establecer una coherencia sólida de las percepciones cognitivas de nuestro entorno. Nuestros sistemas de percepción en el cerebro integran de manera automática y eficiente estas entradas, no solo dentro de una única modalidad (por ejemplo, colores y formas en la visión), sino también a través de modalidades sensoriales (por ejemplo, la apariencia de las personas y sus voces). Este proceso contribuye a establecer percepciones coherentes y sólidas sobre nuestro entorno.

Un punto en común que tienen las ciudades es el ruido ambiental producido por el tráfico rodado en las calles. En función de la tipología de la calle, de su pendiente, del número de carriles, etc., el nivel de ruido puede ser en algunos casos notablemente elevado. Se habla de los *paisajes sonoros* de la ciudad en un intento de cuantificar diferencias en las sensaciones sonoras percibidas. Con el paso del tiempo, los nuevos residentes en una ciudad tienden a habituarse a los niveles de ruido a los que están sometidos. Establecer una conversación a pie de calle a determinadas horas puede resultar agotador. La principal fuente de ruido en las calles es el ruido de tráfico producido por los vehículos que transitan por ellas. El informe del Comité Wilson se considera el primer estudio acústico que consideró el problema de la contaminación acústica de forma global. Este estudio llegó a la conclusión de que el ruido producido por el tráfico rodado era la fuente predominante de la molestia generada por los vehículos en zonas urbanas.

Los niveles de ruido en las calles con más circulación pueden oscilar entre los 72 y 78 dBA, dependiendo de la tipología de la calle, la densidad de tráfico y, sobre todo, la tipología de los vehículos. Los grandes ejes viarios en las ciudades suelen tener perfil en U o en L, siempre que se encuentren inmersos en el tejido urbano. Las vías de circulación en el extrarradio suelen ser del tipo abierto. Para cualquier tipo de vía, el ruido generado por las motocicletas es normalmente el más molesto para la población. Durante los últimos años se ha reducido de forma apreciable la cantidad de motocicletas con escapes modificados, pero a pesar de ello, su presencia en las calles se percibe claramente.

Los vehículos que circulan por los distintos países de la Unión Europea deben cumplir con unos estándares con respecto al ruido emitido. Estos niveles máximos de ruido se definieron en la Directiva 96/20/CE (que ha permanecido inalterada desde su publicación) en 74 dBA para los coches. Recientemente, el Reglamento 540/2014 modifica la Directiva 2007/46/CE estableciendo unos nuevos límites máximos de ruido, que pasan de 74 dBA a 69 dBA previsto en tres fases que terminan en 2026.

La incorporación de los vehículos con propulsión eléctrica en la circulación urbana abre las esperanzas a que el ruido ambiental, que se ha mantenido casi constante durante

las dos últimas décadas, finalmente se reduzca. Los vehículos con propulsión eléctrica aportan muchas ventajas: menor ruido, cero emisiones (del vehículo), rendimiento superior, y además se consideran en general más respetuosos con el medioambiente.

Los desplazamientos a pie por las calles de una ciudad no han sufrido variaciones destacables en varias décadas. Podemos decir que los peatones no han cambiado en su conducta, aunque sí en la adquisición de determinados hábitos. El uso de dispositivos móviles conlleva una serie de riesgos. Hemos aprendido a convivir con estos riesgos porque pensamos que controlamos la situación. No obstante, la presencia de vehículos silenciosos supone un cambio de paradigma en un entorno urbano. El uso masivo de dispositivos móviles ha propiciado la aparición de nuevos hábitos que deberían corregirse y adaptarse al cambio que supone la electrificación del transporte.

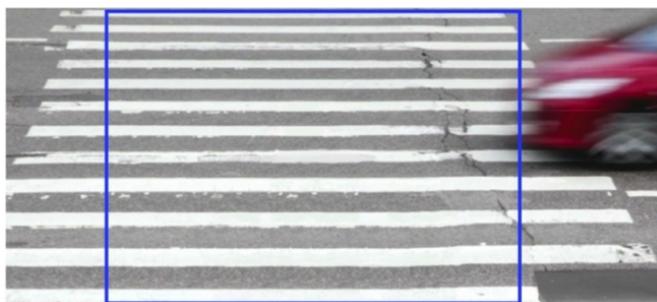
### **3.1.9.2. Hábitos acústicos de riesgo**

En los desplazamientos urbanos a pie, los peatones usan principalmente la visión para orientarse. Los sonidos percibidos por el oído dan mucha información sobre la cercanía de vehículos, aunque no se vean, complementando en estos casos a la visión. Con el paso de los años, los peatones han pasado de la sorpresa que produjeron los primeros vehículos de motor a estar familiarizados con el ruido de estos. En cierta manera, en los primeros años de la automoción, los peatones eran más conscientes del peligro. A lo largo de décadas de convivencia entre peatones y vehículos, se ha producido un cierto relajamiento por parte de los peatones sobre los peligros. Es muy habitual ver a un peatón que cruza una calle, a pesar de ver que se acercan vehículos, porque «sabe calcular» que puede llegar al otro lado sin ser alcanzado. En otros casos, los peatones cruzan una calle sin mirar, confiando en su oído, que no percibe sonido alguno que les haga sospechar de la presencia de un vehículo en las inmediaciones. La irrupción de la bicicleta y el patinete eléctrico en la circulación urbana ha supuesto, en un primer momento, un incremento de incidentes con los peatones, que no podían escuchar el ruido de la bicicleta o del patinete por estar camuflado por el ruido de los motores de combustión interna (MCI).

El uso de reproductores de música portátiles mientras nos desplazamos no es una novedad. Desde la aparición de *walkman* de Sony en la década de los setenta, el uso de dispositivos portátiles (MP3/MP4, iPod, *smartphone*) en las calles está mayoritariamente motivado por el deseo de «aislarse» o de no escuchar el ruido ambiental. Para conseguir este propósito, se recurre a reproducir música con un volumen suficientemente elevado como para «tapar» el ruido que llega principalmente del tráfico rodado, en las inmediaciones, o del medio de transporte donde nos encontramos. Con esto efectivamente, se consigue no escuchar el ruido, pero tampoco se pueden escuchar otros sonidos, como la voz de alerta de una persona, el ruido de un coche que se acerca a nosotros o, simplemente «reconocer» el entorno sonoro. Resulta bastante evidente que, si andamos por las

calles sin escuchar los sonidos generados por cualquier vehículo que circula a nuestro alrededor, se corre el riesgo de sufrir un accidente.

El uso de la música puede tener otras consecuencias, como disminuir o alterar la visión. Los niveles elevados de sonido alteran la visión estrechando el campo visual, de manera que se minorra la visión lateral y por consiguiente, se produce un aumento del riesgo de colisión en la circulación urbana (Hidaka, S., Ide, M., 2015). La figura 3.20, recrea un ejemplo de lo que supone este estrechamiento visual para un peatón que está inmerso en un nivel sonoro elevado y va a cruzar un paso de peatones. En este caso, se supone que el peatón va mirando al frente.



**Figura 3.20.** Imagen completa. Con nivel de ruido moderado, el peatón puede ver al vehículo acercarse por la derecha. Imagen dentro del rectángulo azul, muestra que la visión con nivel sonoro elevado se estrecha y el peatón no ve la proximidad del coche que llega por la derecha.

A este estrechamiento del campo visual (*tunnel vision*) producido por el nivel sonoro, ya sea de la música reproducida mediante auriculares o del ruido ambiente en la calle, hay que añadir la capacidad de distracción que tiene escuchar un sonido, ya que nos aporta un mensaje distinto al del ruido de tráfico en las calles.

Al fenómeno descrito se añade otro que agrava el riesgo de accidente: de noche el campo visual se estrecha (aunque no escuchemos música) y además, la visión es escotópica (sin color), que produce una visión lateral más deficiente. Si a estas circunstancias añadimos los efectos de escuchar música con un nivel elevado que todavía estrecha más el campo visual, el riesgo de tener un accidente aumenta notablemente. Estas circunstancias explican algunos accidentes en los que no se entiende que los conductores no se vieran mutuamente. Al menos uno de ellos no vio lo que acontecía a causa del estrechamiento del campo visual.

Atender una llamada telefónica con un móvil mientras se anda por las calles de una ciudad no es una cuestión inocua o exenta de riesgos. En muchas ocasiones, podemos

ver a personas que se mueven a un lado y otro mientras mantienen una conversación. Su andar es tanto más errático cuanto más importante o trascendente sea la conversación. Los gestos y las expresiones corporales denotan si se trata de una conversación tensa.

Este tipo de situaciones entorpece la libre circulación de los peatones por las calles y en algunas ciudades se ha optado por marcar en las aceras carriles específicos de peatones que usan móvil y otros que no lo usan. También se ha recurrido a advertir mediante señales de tráfico creadas *ad hoc*, de la presencia de personas pendientes de su dispositivo móvil, con el objetivo de evitar colisiones entre los mismos peatones (figura 3.21). Quizá no sean las soluciones más correctas, pero ponen en evidencia que existe un grave problema de circulación urbana a pie a escala global que las administraciones no saben bien cómo resolver.



**Figura 3.21.** A la izquierda, espacios habilitados para andar usando móvil, cellphone y no cellphone. A la derecha, una señal de advertencia a los peatones indicando la presencia de otros peatones pendientes del móvil.

Los dispositivos móviles permiten reproducir música con auriculares y también tener acceso a las redes sociales, entre otras cosas. La creciente «necesidad obsesiva» de estar permanentemente conectado a las redes sociales y estar al corriente de todo cuanto acontece en nuestro círculo de amistades requiere de la constante atención a este dispositivo. A diferencia de la escucha de música, esta acción, conocida como *texting*, se ha extendido rápidamente, sobre todo entre la población más joven. El *texting* añade un plus de peligrosidad, porque al hecho de andar por la calle escuchando música, generalmente a alto volumen y con auriculares, se añade la necesidad de prestar total atención visual a la pantalla del móvil mientras se anda y se escribe, y eso requiere de mucha más atención del cerebro a estos menesteres. Todo ello redundará en una nula atención a la circulación tanto de peatones como de vehículos por las inmediaciones.

Cuando andamos sin escuchar música con auriculares, pero escribiendo, la orientación y el reconocimiento del entorno acústico se realizan por los sonidos que vamos

percibiendo que en principio quedan en un segundo plano. A menos que percibamos un sonido imprevisto (como una bocina, el derrape de una rueda, el frenado brusco, etc.) que suponga un peligro, nuestra atención sigue inmersa en la conversación escrita. La figura 3.22 muestra unos ejemplos de *texting*.



**Figura 3.22.** Distintos ejemplos de *texting*. Las personas que van andando son completamente ajenas a lo que acontece a su alrededor.

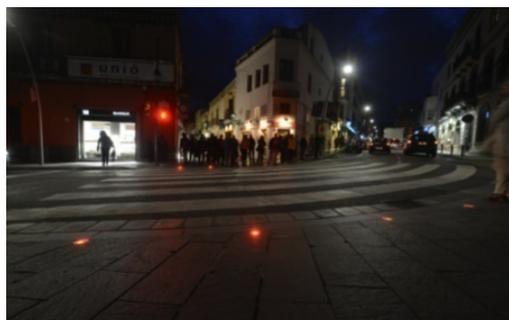
En principio, andar por la acera y enviar mensajes de texto cuando no se está cruzando la calle se considera seguro. Sin embargo, la realidad es que se pueden ver videos de personas que chocan con objetos, incluido el de una mujer que cae en una fuente de un centro comercial porque estaba demasiado concentrada en su dispositivo móvil para darse cuenta de hacia dónde se dirigía. Y esas colisiones pueden provocar lesiones y en ocasiones, la queja del afectado ante la presencia de ese objeto que ha provocado según él, el accidente.

Las primeras consecuencias del *texting* ya se pueden observar en algunas ciudades, donde algunos transeúntes colisionan con el mobiliario urbano por estar pendientes de su dispositivo móvil en lugar de mirar al frente, que sería lo deseable. Para dar solución a este problema, en algún caso se ha optado por cubrir mediante materiales blandos las farolas para que las personas absortas en las conversaciones escritas no colisionen con ellas, como muestra la figura 3.23.

En otras ciudades, como Nueva Jersey, se ha optado por sancionar a los *careless walking* con 85 \$ para tratar de disuadir a los que están pendientes del dispositivo móvil todo el tiempo mientras andan por la calle. Otras poblaciones han optado por poner LED en el suelo de los pasos de peatones para llamar la atención a los distraídos y alertar de la presencia de un semáforo, tratando de evitar accidentes (figura 3.24).



**Figura 3.23.** Protección de farolas en la ciudad de Londres con material blando para amortiguar las colisiones de los peatones absortos en el texting.



**Figura 3.24.** Ejemplos de indicadores LED en el suelo para tratar de hacer más visible el paso de peatones con semáforo de regulación a los distraídos con el texting. Izquierda: Sant Cugat del Vallès. Derecha: Escaldes-Engordany.

Esta circunstancia se produce en pasos de peatones de gran amplitud, donde el semáforo queda fuera del alcance de la visión. Aunque no se esté mirando a la pantalla del dispositivo móvil, al andar la visión suele mirar por donde vamos andando y eso facilita la detección de estas señales luminosas en el suelo. La tecnología LED permite una luminosidad muy notable, que no pasa desapercibida a ninguna persona que se acerque al paso de peatones, lo que redundará en una mayor seguridad.

### 3.1.9.3. *Influencia perceptual y cognitiva*

La visión desempeña un papel muy importante sobre la audición, tanto por efectos perceptivos como cognitivos que influyen en la valoración del sonido. Un ejemplo de la

influencia perceptual se produce cuando se incrementa la comprensión del mensaje en un 18% si podemos observar el movimiento de los labios de un locutor. La inteligibilidad acústica del mensaje se mantiene constante, pero la influencia de la imagen de los labios mejora esta inteligibilidad. Nótese que por medios acústicos no es posible obtener este *offset*, quedando los resultados por debajo de los reales. La figura 3.25 ilustra la interconexión entre la percepción visual y sonora en humanos.

Algunos trabajos muestran que la trayectoria de un objeto en la periferia de la visión se puede ver alterada por los aspectos espaciales del sonido. Este efecto puede alterar la visión de la posición real de un objeto en la periferia, lo cual puede ser peligroso en determinadas circunstancias como cruzar una calle.

Por otro lado, la visión también influye en la capacidad auditiva. Algunos trabajos sugieren que las personas con discapacidad visual posicionan mejor la procedencia de los sonidos que las personas con visión normal, pero tapando temporalmente los ojos. Sin duda, si el 90% de la información que llega al cerebro procede de la visión, la ausencia de esta beneficia a la sensibilidad del resto de sentidos. En consecuencia, cuando no estamos mirando el entorno por donde andamos, sino a la pantalla del móvil, se producen distintos efectos que producen una merma en la capacidad que tenemos para posicionar una fuente de sonido próxima a nosotros.

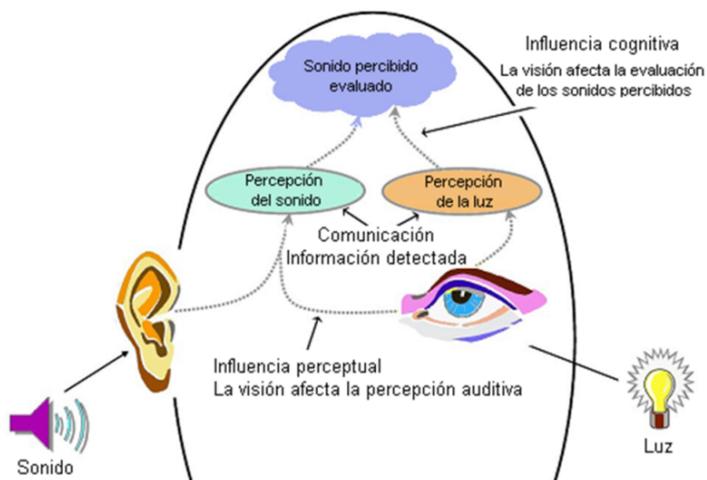


Figura 3.25. Interferencia mutua entre los sentidos de visión y del oído.

El cerebro humano no permite realizar tareas simultáneas que requieran total atención. Por ejemplo, no es posible escuchar música mientras se estudia. Muchos estudiantes utilizan la música para estudiar porque dicen que les ayuda a concentrarse. Parece

un contrasentido, pero lo cierto es que lo que distrae la atención en una tarea como el estudio no es el nivel sonoro, sino los desniveles sonoros. En las bibliotecas se tiende a tener un elevado nivel de silencio, en ocasiones quizá excesivo. El pasar de las hojas de unos apuntes o de un libro se puede llegar a escuchar con claridad y eso distrae al resto de personas que están cerca, generando incomodidad y falta de concentración. Una biblioteca muy silenciosa no es funcional, salvo para aforos irrisorios. En estos espacios, lo más importante es asegurar una excelente calidad acústica, con un tratamiento acústico efectivo para conseguir un entorno acústico acogedor, pero no con un silencio «absoluto».

En resumen, se pueden realizar tareas que aparentemente son paralelas o simultáneas. Por ejemplo, tocar el órgano requiere interpretar la melodía con una mano, los acordes con la otra, la expresión con un pie y el bajo con el otro pie. Son cuatro tareas sincronizadas. Realmente, nadie puede hacer una interpretación sin aprender antes la técnica. Ahí está la clave: la fase de aprendizaje permite esa simultaneidad de acciones. Lo mismo ocurre con la conducción de un vehículo: se llevan a cabo muchos movimientos sincronizados que para el novel, son imposibles de realizar satisfactoriamente. Percibir sonidos puede alterar también la capacidad de abordar tareas complejas que requieren atención. Por ejemplo, muchas personas apagan la radio cuando estacionan el vehículo, y no es para escuchar el contacto con el otro vehículo, sino porque el sonido de la radio distrae de la tarea de estacionar que requiere en general, de la máxima concentración. Por el mismo motivo, conducir un vehículo y tener un copiloto excesivamente preguntón puede originar accidentes. Tener que responder a las preguntas con algo más que un sí o un no conlleva mermar el grado de atención en la tarea de conducir el vehículo, aumentando el riesgo de no reaccionar ante un imprevisto y sufrir un accidente.

#### **3.1.9.4. Preferencias visuales y auditivas**

Diferentes estudios tratan de explicar por qué unas caras resultan atractivas para mucha gente y otras no: porque son fáciles de procesar por el cerebro. Eso quiere decir que no hay rasgos o detalles que requieran dedicar atención en observarlas. La figura 3.26 es la imagen virtual de una cara femenina. La atención visual inicial se centra en los ojos, la nariz y la boca, que resultan fáciles de recordar por el cerebro. Los detalles perimetrales están difusos, por lo que el cerebro no tiene que procesar estos datos que realmente no le aportan datos identificativos para reconocer una cara.

El cerebro identifica los sonidos analizando sus peculiaridades físicas distintivas, frecuencia, intensidad y características temporales. Estas son las características que percibimos como tono, volumen y duración. Una vez que el cerebro ha terminado su análisis de las características físicas del mensaje o sonido que recibió, construye una «imagen» de esa señal usando dichos componentes para compararla con imágenes acústicas guardadas anteriormente. Si encuentra otra igual, entonces entendemos lo que se dice o

reconocemos los sonidos que tienen significados importantes en nuestras vidas (voces, ruidos, etc.) de una manera rápida y simple. Si no reconocemos esos sonidos, entonces etiquetamos dicho sonido a una acción concreta o a un objeto determinado. El caso de la música es más complejo, puesto que las notas musicales y los instrumentos pueden ser los mismos en diferentes canciones; sin embargo, las sensaciones percibidas son distintas, ya que llegan en tiempos diferentes (distinta melodía, distinto ritmo, etc.).



**Figura 3.26.** Imagen de una cara que resulta fácil de procesar por el cerebro.

Con respecto a la percepción auditiva, los sonidos melódicos con cambios de tonalidad y de nivel suaves y sin brusquedades son más fáciles de procesar por el cerebro. Los sonidos más complejos con elevada variabilidad de nivel y espectral son más difíciles de procesar por el cerebro. De hecho, la complejidad de un sonido hace que nuestro cerebro dedique más atención. Un sonido que ya se ha escuchado anteriormente no requiere un análisis detallado por parte del cerebro una vez identificado, ya que se reconoce su origen. En estos casos, no hay señal de «alarma». Un sonido nuevo o inesperado siempre genera inquietud. Ante un sonido nuevo que no se reconoce, el cerebro busca algún sonido que se asemeje para tratar de obtener un patrón o modelo que le permita clasificar el ruido o sonido percibido. Podemos decir que nuestro cerebro está constantemente almacenando información sonora.

El reconocimiento de sonidos se hace de forma dinámica, en función tanto del ruido ambiental como de la tarea que realizamos. Ante acciones como por ejemplo un trabajo manual, carpintería, soldadura, construcción, etc., nuestro cerebro prevé ciertos ruidos que se van a producir, sin que por ello se desencadene una señal de «alarma». Estos sonidos previsibles siempre obedecen a un aprendizaje previo. Pero si en esas operaciones

aparece un nuevo sonido, por ejemplo, el chirrido de la sierra de una herramienta de corte, nos puede indicar que la máquina está trabajando mal y se puede romper la hoja con el consiguiente peligro, por lo que rápidamente el cerebro envía la señal de «alerta» para que tomemos una decisión: dejar de ejercer fuerza, equilibrar la máquina, etc.

### 3.1.10. El paseo sonoro

Uno de los sonidos que más está cambiando en las últimas décadas es el ambiente sonoro que hay en los lugares donde la gente puede estar, como las calles y plazas de las ciudades; es el llamado *soundscape*. Lógicamente, ha habido una evolución de la vida rural a la vida en ciudad y los ruidos en ambos casos eran y son muy distintos. La transición de la vida rural a la vida urbana puede ser caracterizada en cuanto al ambiente sonoro, como el paso del sonido Hi-Fi al Lo-Fi (alta fidelidad a baja fidelidad, en el sentido de calidad sonora). La causa es la pérdida de los sonidos y ritmos cotidianos que se pueden encontrar en los ambientes naturales y no en los ambientes urbanos. En los ambientes sonoros urbanos (Lo-Fi, baja calidad sonora) se producen, además, sonidos con informaciones acústicas que entran en conflicto con los sonidos que queremos o deseamos escuchar (Ipsen D., 2002).

Diariamente, tenemos nuevas experiencias sonoras. Si no detectamos nuevos sonidos, nuestra experiencia sonora diaria puede llegar a ser aburrida. En estos casos, en general se opta por dejar de prestar atención al sonido envolvente y no recordamos ningún sonido concreto. Nuestro sentido auditivo funciona perfectamente, pero es como si no se «grabara» ninguna información en el cerebro. La presencia de nuevos sonidos propicia la curiosidad auditiva y por tanto, capta nuestro interés, aunque si la información presentada es muy redundante, o cuando los sonidos nuevos son extremadamente complejos y no podemos reconocerlos, se pierde esa curiosidad.

El llamado *Soundwalking* («paseo sonoro») es un término creado por los miembros del World Soundscape Project en 1970, aunque no fue el pionero. Se trata de una práctica creativa y de investigación que implica escuchar, y a veces, grabar, el sonido mientras se desplaza andando por un lugar. Se ocupa de la relación entre los *Soundwalkers* y su entorno sónico circundante. Los paseos sonoros pueden ser individuales o en grupo y pueden ser grabados o no. El ritmo del caminar, la vestimenta, la climatología, etc., influyen en las propias percepciones de los sonidos. Valorar la calidad sonora en un punto es factible y técnicamente se puede analizar a partir de una grabación sonora en ese lugar.

Sin embargo, una valoración mientras el receptor se mueve implica que los sonidos de las fuentes sean estáticas o no, se desplazan, lo cual dificulta más su evaluación, porque su contenido espectral e intensidad varían constantemente y, sin imágenes que muestren el movimiento, la valoración sonora es más difícil. Evaluar un recorrido acústico en su totalidad es complicado y carece de sentido acústico. Diferentes situaciones acústicas

suceden a lo largo del tiempo que dura el trayecto y toda esa amalgama de sonidos y sensaciones, difíciles de describir, no permiten obtener una valoración única.

Si vamos de un sitio más ruidoso a uno menos ruidoso o viceversa, es posible que demos distinta valoración a ambos recorridos. Obviamente, los sonidos que iremos escuchando no siguen el mismo orden y la impresión del conjunto suele estar influida por los tramos o espacios con mayor nivel sonoro y los más recientes. El humano no puede integrar señales sonoras, como lo hace un equipo electrónico de medida. Además, como la memoria acústica es bastante deficiente, podemos recordar con mayor facilidad los episodios más diferentes vividos a lo largo del paseo sonoro y con estos recuerdos hacer una valoración del conjunto, aunque resulta muy difícil ponderar de forma equitativa los distintos episodios escuchados. El sentido auditivo reconoce y recuerda fácilmente patrones, tanto en frecuencia como temporales.

Las valoraciones subjetivas se pueden hacer en un punto concreto. El concepto de *paseo sonoro* debería obtenerse a partir de una serie de puntos discretos donde se realiza la evaluación y esas valoraciones que, obviamente son cambiantes, coincidirán con las impresiones de las personas. La grabación de sonidos con un equipo profesional es una herramienta que permite analizar objetivamente los sonidos y extraer conclusiones. Pero un paseo conlleva un problema con la captación microfónica, ya que aparecen componentes de baja frecuencia y saturaciones producidas por las oscilaciones del micrófono con el andar y además, se captan sonidos originados por el portador del micrófono que pueden influir notablemente. El micrófono debe estar estático en un punto para evitar estos problemas acústicos o utilizar los *binaural headsets*, que son dispositivos que permiten grabaciones binaurales de precisión, y llevarlos en la cabeza.

### **3.1.10.1. *Cómo reconocer un ambiente acústico comfortable***

Desde un punto de vista general, la situación en ambiente interior o exterior es lógicamente distinta. Para un ambiente exterior, hay que tener muy en cuenta que el entorno visual influye en gran medida sobre nuestra percepción sonora. Los niveles sonoros esperados para un ambiente que se considere «agradable» en un entorno urbano están siempre por debajo de los 45 dBA. Estos valores de nivel sonoro se pueden dar en calles de poblaciones con un tráfico muy moderado. Es fácil reconocer estos espacios. Basta con observar si al andar podemos escuchar nuestros pasos. No hace falta llevar calzado de tacón ni andar pisando fuerte. Si podemos escuchar nuestros pasos, el nivel sonoro se encuentra por debajo de los límites indicados. Niveles sonoros más bajos no suelen ser habituales cuando hay actividad humana en las cercanías. Obviamente, en parajes naturales o alejados de núcleos de población es posible tener niveles sonoros cercanos a los 35 dBA en ambiente exterior.

Para el ambiente interior, la situación es distinta. La influencia de la visión ya no es tan dominante, puesto que lo que nos rodea no tiene movimiento, como ocurre en un espacio abierto. Este detalle lleva asociada una mayor exigencia en los niveles sonoros. Los 45 dBA que en ambiente exterior se consideran muy agradables pueden no serlo en el interior de una sala, en función de lo que estamos haciendo. Descansar o dormir sería la situación más extrema, que requiere en principio, menor nivel sonoro. Para el resto de actividades en ambiente interior, los niveles sonoros se pueden considerar adecuados cuando se encuentran entre los 35 y los 40 dBA. Estos niveles no incluyen nuestra propia actividad, que generalmente también produce sonido.

Para decidir si un entorno es acústicamente confortable o agradable, solemos fijarnos en determinados aspectos del sonido percibido. El nivel sonoro en un punto es importante en la valoración del agrado o no de un sonido, pero no es un factor determinante, y hay otros elementos que pueden ser incluso más influyentes. El sonido debe «despertar» la curiosidad sonora para que nuestra percepción sea favorable, pero no en exceso, puesto que eso quizá desencadenaría una reacción adversa en forma de molestia. En un primer paso, la curiosidad sonora se sustenta esencialmente en dos parámetros: la variabilidad temporal del nivel sonoro y su contenido en frecuencia. El sistema auditivo tiene una capacidad innata que ya se ha comentado antes para «seleccionar» un orador entre muchas voces o «seguir» una determinada melodía entre otros sonidos.

Durante las últimas décadas, los científicos han identificado qué pistas usan o no los oyentes para el análisis acústico de la escena sonora. Es el llamado ASA (Auditory Scene Analysis). Se sugiere que este análisis precisa de un grado de atención por parte del sujeto, es decir hay una voluntad de escuchar un sonido u otro que llegan simultáneamente al oído. En este punto, hay dos hipótesis:

- El análisis de la escena sonora se produce automáticamente, proporcionando una capacidad de atención con sonidos preestablecidos, que son seleccionados.
- El grado de atención puede influir en el proceso necesario para la detección de los sonidos.

Hay dos aspectos que se deben tener en cuenta en la segregación de los sonidos. En primer lugar, el fenómeno de *streaming* auditivo, que es la capacidad de organización de los sonidos en función del tiempo. Es un fenómeno usado por los compositores musicales y que es la esencia básica de nuestra capacidad para «seguir» una conversación inmersa entre otras.

En segundo lugar, las diferencias de tonalidad entre oradores, que ayudan a distinguir una conversación de otra (Carlyon R.P., 2004). La facilidad que tiene el cerebro para «detectar y seguir» señales con frecuencias concretas es bastante notoria (Holmes E., 2017). Esta capacidad se ve modelada o reforzada por la formación musical que tenga

una persona en particular (Skoe E., Kraus N., , 2013). En todo caso, lo que resulta muy común entre las personas afectadas por un sonido no deseado mientras desean conciliar el sueño es la relativa facilidad que tiene el cerebro para detectar algunas características de ese sonido, como por ejemplo el ritmo musical.

Nótese que, incluso en períodos de somnolencia, nuestro sentido auditivo sigue funcionando, no desconecta nunca, lo que permite al ser humano estar en «alerta permanente» ante cualquier sonido no esperado o que avise de un peligro. Además, se da la circunstancia de que la percepción de un determinado sonido tiene un gran componente subjetivo, que hace que la reacción o valoración sea distinta para cada individuo. Dicha subjetividad se justifica esencialmente por la experiencia previa de cada persona en el desarrollo del tronco encefálico auditivo basándose en el análisis que este realiza de la parte física del sonido, la frecuencia, la amplitud, la evolución temporal y también del significado que producen dichos sonidos (Galbraith G.C., 2008) y no por el deseo de llevar la contraria o exagerar el problema, aspecto que en ocasiones, lamentablemente, también sucede.

# Capítulo 4.

## Medida de la sensibilidad auditiva

### 4.1. El test audiométrico

Como se desprende del Real Decreto 1316/86, una de las acciones preventivas más importantes (por no decir la única válida) para controlar el estado auditivo de los sujetos sometidos a niveles sonoros elevados es la realización de controles de su edad auditiva. En estos controles se pretende conocer cuál es el umbral de audición para cada frecuencia del individuo en ambos oídos. Estos controles, que se llaman *audiometrías*, se llevan a cabo para explorar la audición, tanto por vía aérea como por vía ósea.

La audiometría se realiza con un audiómetro, que es un instrumento que genera sonidos en unas bandas de frecuencia típicamente entre 125 Hz y 8 kHz (ISO 7029), con unos niveles sonoros regulables. Los audiómetros de alta gama abarcan desde 125 Hz hasta 16 kHz, dando una información muy valiosa y esencial de la sensibilidad auditiva a las altas frecuencias. La escala de intensidad sonora va graduada en pasos de 5 dB (aunque algunos modelos pueden llegar a utilizar pasos de 1 dB), siendo el nivel 0 de cada frecuencia el nivel de presión sonora del umbral auditivo a esa frecuencia que no se corresponde con el 0 dB SPL. Nótese que los niveles de presión son dBHL (dB Hearing Loss) y no dB SPL. Cuando se aplica un nivel de 0 dBHL a una frecuencia determinada, el nivel sonoro que recibe el paciente a través de los auriculares no es cero. Es el nivel sonoro considerado umbral, que, de acuerdo con los estándares, ya tiene la corrección de nivel impuesto por la respuesta en frecuencia irregular del oído. Algunos individuos pueden tener sensibilidad auditiva con valores negativos de dBHL, lo que significa que su capacidad auditiva es superior al estándar.

El equipo audiométrico más sencillo debe disponer de unos auriculares para las pruebas por vía aérea, un vibrador para las pruebas de transmisión ósea y un sistema de ensordecimiento. Aunque no es un elemento propio del audiómetro, debe considerarse la necesidad de disponer de una cabina aislada y tratada acústicamente donde llevar a cabo estas audiometrías. Esta necesidad viene impuesta por los bajos niveles de ruido

ambiental necesarios para realizar correctamente una audiometría. Si los niveles sonoros procedentes del audiómetro se ven superados o enmascarados por el ruido de fondo, la prueba no tendrá ninguna validez, dando una audiometría peor de la real. Desafortunadamente, en algunos centros donde se realizan exploraciones auditivas de control o supervisión, estas se realizan en entornos con un nivel de ruido excesivo. En ocasiones, el paciente está dentro de una cabina *ad hoc* para hacer el test, pero con la puerta abierta, mientras algunas personas pasan por delante hablando. Esto invalida los resultados, ya que el ruido ambiente altera la sensibilidad auditiva del individuo durante la exploración.

En estas pruebas se debe tener en cuenta que el valor del umbral de audición puede variar en función de la técnica de exploración: si estimulamos con un sonido que aumenta su intensidad (umbral ascendente), o con un sonido que disminuye su intensidad (umbral descendente), o con un sonido continuo intermitente. Además, deberemos considerar el hecho de que este umbral dependa del grado de atención o fatiga del individuo. Estos umbrales no se pueden considerar como valores fijos y absolutos, sino como zonas de probabilidad, ya que es frecuente encontrar diferencias en su apreciación.

Empezando la audiometría con niveles sonoros por debajo del umbral de audición normal y subiendo paulatinamente el nivel sonoro, llegará un momento en que el individuo tiene una sensación intermitente de audición: es el llamado *umbral de detección*. Si aumentamos 5 dB por encima de esta sensación, el sujeto oirá de forma continua. Este valor es el llamado *umbral ascendente*. La graduación del nivel de los tonos de un audiómetro es normalmente con una escala de 5 dB, que supone un compromiso entre funcionalidad, tiempo de la exploración y precisión de los resultados. Existen diversas técnicas que se describen a continuación; todas ellas en principio, igualmente efectivas para determinar el umbral auditivo.

#### **4.1.1. Audiometría por vía aérea**

El objetivo de estas mediciones es evaluar el estado auditivo cuando el estímulo utiliza únicamente la vía aérea para ser percibido. Se empieza el examen en el oído menos sordo con la frecuencia de 1 kHz y se hará buscando el umbral ascendente. Después, se continúan explorando las frecuencias mayores a 1 kHz y, por último, las frecuencias inferiores a 1 kHz. Se debe evitar prolongar excesivamente la duración de las pruebas, ya que los valores obtenidos dependen del grado de atención o fatiga del sujeto. Es recomendable utilizar para estas audiometrías estímulos sonoros pulsados (no continuos), así como repetirlos en diversos días para mejorar el grado de fiabilidad y validez de los resultados.

#### **4.1.2. Audiometría por vía ósea**

En el mecanismo de audición, además de la vía aérea, los estímulos pueden llegar al tímpano o a la cóclea a través de vibraciones transmitidas por vía ósea. Es por este

motivo por lo que también puede evaluarse este canal de audición. El procedimiento es idéntico al anterior, pero en este caso los auriculares son sustituidos por un vibrador que se debe colocar en el mastoideo, sin que exista ningún contacto con la oreja.

#### **4.1.3. La impedanciometría**

La finalidad de las audiometrías es evaluar la capacidad auditiva del paciente. Con ellas podemos conocer el estado del sistema auditivo, pero en ningún caso podremos diagnosticar el motivo de este estado. La impedanciometría tiene como finalidad detectar anomalías que puede presentar el sistema auditivo. Estas pruebas son mucho más delicadas y complejas de realizar.

#### **4.1.4. Métodos clásicos para hacer una audiometría**

Existen tres métodos llamados clásicos: método de los límites, método de ajuste y método del estímulo constante. Cada uno tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

##### **4.1.4.1. Método del límite**

En este método, el estímulo está bajo el control del experimentador y el sujeto responde siempre después de cada presentación o prueba. Por ejemplo, cuando se hace una audiometría, se presenta un tono de un nivel moderado para que el paciente lo pueda escuchar con seguridad. Cuando el paciente escucha el tono, debe notificarlo al examinador mediante un gesto o pulsando un botón en el interior de la cabina. La señal de prueba va decreciendo de forma discreta y a cada cambio el paciente debe responder si oye o no el tono. Cuando después de presentar el tono el paciente no contesta, significa que se ha llegado al umbral auditivo decreciente. Para evitar sesgos en las pruebas, es aconsejable que la cadencia en la presentación de los tonos no sea constante.

Una vez determinado el umbral para una frecuencia, debe repetirse el proceso, pero aumentando el nivel, partiendo de niveles muy bajos hasta que el paciente escuche el tono; en este punto, tenemos el nivel auditivo umbral subiendo. Ambos límites no son por lo general, coincidentes. Entre ambos niveles es donde realmente se encuentra el umbral auditivo absoluto del paciente. Los niveles no tienen por qué coincidir, ya que existe el concepto de mínimo nivel audible y máximo nivel no audible, que no son exactamente iguales. Generalmente, se escoge el valor medio entre ambos niveles.

Hay respuestas que pueden conducir a resultados erróneos. Por ejemplo, el paciente contesta que escucha el tono cuando realmente no lo está escuchando. Debe evitarse que el individuo tenga visión sobre el operador, ya que con sus movimientos puede condicionar la respuesta del sujeto. Existen diversas maneras de evitar o minimizar estos errores. Una que resulta bastante eficaz es no emplear siempre el mismo valor de partida, de

manera que el número de tonos aplicados varía cada vez y el paciente no «memoriza» cuántos saltos de nivel se deben producir hasta llegar a un umbral «aceptable». Otra forma de minimizar estos errores es emplear el mismo número de pruebas ascendentes y descendentes en cada test independientemente de la respuesta del paciente, esto lo despista e impide el engaño.

Los desniveles entre los sucesivos pasos no pueden ser excesivamente elevados, ya que se pierde la precisión. Con unos saltos de 10 dB por ejemplo, será más fácil obtener un nivel mínimo audible y también un nivel máximo inaudible probablemente coincidentes, pero con un error elevado. Emplear saltos más pequeños por ejemplo de 2 dB, ofrece teóricamente una mayor precisión, pero a su vez implica un mayor coste de tiempo y de cansancio del paciente. Además, encontrar el valor umbral exacto puede resultar más difícil.

#### **4.1.4.2. Método de ajustamiento**

En este método el estímulo lo controla el paciente y el nivel se modifica de forma continua, en lugar de hacerlo por saltos. El procedimiento para obtener el umbral auditivo es similar: primero, un proceso descendente hasta que el paciente deja de escuchar la señal, y después un proceso ascendente hasta que la vuelve a escuchar. El umbral es el valor medio entre ambos niveles. Los controles que son manipulados por el paciente no tienen ninguna indicación. Además, para evitar desviaciones, se sitúa un segundo control de nivel al cual únicamente el examinador tiene acceso, de manera que puede incrementar o disminuir el nivel de la señal de partida. Este control permite evitar que el paciente parta de unos valores preestablecidos del umbral. Por otro lado, en este método es más difícil el control de las pruebas y además, el paciente puede variar los criterios durante la realización de la prueba.

#### **4.1.4.3. Método del estímulo constante**

Este método consiste en presentar al paciente diversos niveles de un estímulo de forma aleatoria. A diferencia de los métodos anteriores, no se trata de un método secuencial, es decir los estímulos no se presentan de forma ascendente o descendente. El margen de niveles presentados al paciente está obtenido de pruebas previas, de manera que el verdadero valor estará dentro del margen prefijado. Una vez escogido un paso o salto entre niveles, estos son presentados al paciente en un orden aleatorio. Durante el experimento se presentan el mismo número de estímulos de cada nivel. Para determinar el umbral auditivo de un individuo por ejemplo, se presentan niveles entre 4 y 11 dB, sabiendo *a priori* que el verdadero nivel se encuentra dentro de este margen, y se envían al paciente de forma aleatoria tonos con un paso de 1 dB. Con las respuestas del paciente se evalúa cuál es el nivel que corresponde a un 50% de las respuestas, el cual se considera que

es el valor buscado. Este método es mejor que los anteriores, ya que ofrece una mayor precisión, aunque es poco eficiente, puesto que es necesario un gran número de pruebas en cada test. Además, el gran número de niveles en cada prueba necesita de un tiempo de prueba elevado y provoca fatiga en el paciente, lo que puede conducir a resultados erróneos.

#### **4.1.4.4. Procedimientos adaptativos**

En estos procedimientos, el nivel sonoro de los tonos que se presentan al paciente depende de la respuesta de este. Aparentemente, se podría considerar que todos los métodos utilizan procedimientos adaptativos. Realmente, la diferencia está en que el nivel puede ser superior o inferior al nivel presentado al paciente en cualquier momento. Los métodos comentados antes suben o bajan el nivel de forma sistemática hasta una respuesta positiva o negativa del paciente, dependiendo de la técnica. La ventaja de estos procedimientos es que no hay que saber *a priori* el umbral que se espera encontrar. El método traza una aproximación al nivel buscado de una forma rápida y bastante precisa, que hacen de este procedimiento eficiente y preciso.

#### **4.1.4.5. Método de seguimiento de Békésy**

G. Békésy describió en 1960 un método, publicado en *Experiments in Hearing*, en el que el nivel aplicado al paciente varía con una pendiente prefijada, por ejemplo 2,5 dB/s. La dirección de los incrementos la determina el paciente. Los incrementos se producen con un mecanismo que controla el paso o avance de los niveles. El sujeto es preguntado si escucha o no el tono presentado; en caso afirmativo, mantiene apretado un botón, mientras que si no lo oye, deja de apretarlo. De esta manera, se llega a una oscilación constante alrededor de un punto o valor que será el nivel umbral buscado. Este valor será el valor medio de la oscilación. Con este método son recomendables unos incrementos de nivel alrededor de los 2 dB/s. Incrementos mayores conseguirán acortar el tiempo de la prueba, pero con una mayor imprecisión.

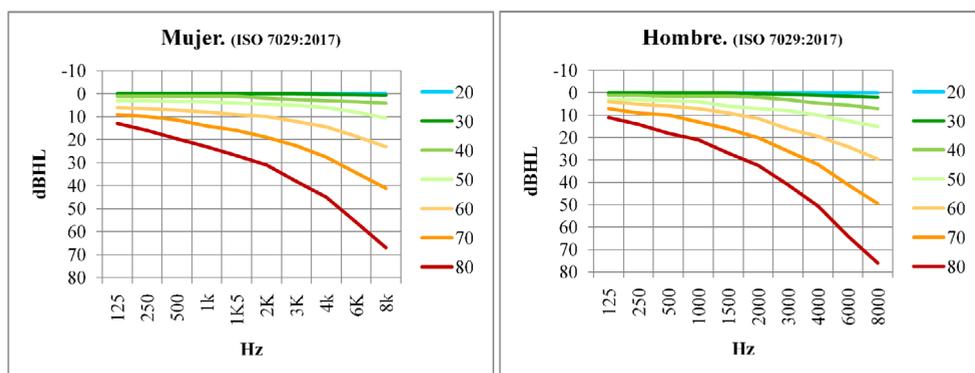
#### **4.1.4.6. Método up-down**

En este método, el nivel del tono va subiendo siguiendo unos incrementos. Este nivel decrece cuando el paciente responde afirmativamente que oye el tono. Se diferencia del método de los límites explicado anteriormente en que el análisis no se para cuando el paciente pasa de una respuesta negativa a una positiva y viceversa. El proceso se para cuando se llega a una situación de oscilación alrededor de un valor. El método es bastante preciso, aunque puede presentar desviaciones si el paciente detecta que las señales se aplican siguiendo una secuencia que pueda «memorizar».

#### 4.1.5. Resultados de un test audiométrico

Un test audiométrico indica cómo está la capacidad auditiva de una persona. Como el oído pierde sensibilidad con la edad, existen unas curvas de referencia, donde se indica para cada edad cuál debería ser la curva de sensibilidad auditiva. Estas curvas de referencia están estandarizadas con la norma ISO 7029:2017, como se muestra en la figura 4.1.

Se puede observar que las mujeres presentan una sensibilidad mayor que los hombres a partir de los 20 años. Estas curvas de referencia están hechas para las bandas de 125 Hz a 8 kHz. El margen extendido de alta frecuencia hasta los 20 kHz prácticamente solo se utiliza en investigación.



**Figura 4.1.** Curvas de referencia (ISO 7029:2017) para un oído «normal». A la izquierda, para mujeres, y a la derecha para hombres con edades de 20 a 80 años.

##### 4.1.5.1. Valoración de la capacidad auditiva. NTP 136

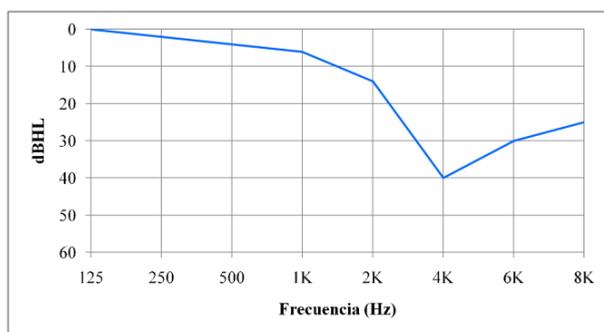
El objetivo de la Nota Técnica de Prevención 136 (NTP 136) es la valoración objetiva del grado de discapacidad auditiva de un individuo y por tanto, permitirle una interpretación primaria de una audiometría. En primer lugar, se trata de interpretar y valorar la audiometría, y en segundo lugar, cuantificar el grado de la pérdida auditiva. Existen tres tipos de pérdida auditiva, atendiendo a la forma de la curva audiométrica: la sordera de percepción, la sordera de transmisión y la mixta.

###### 4.1.5.1.1. Pérdida auditiva de percepción

Esta suele ser la forma más habitual entre la población sometida a niveles sonoros elevados a lo largo de su vida, normalmente de forma voluntaria. Los elevados niveles sonoros en las calles de algunas ciudades, frecuentar locales de ocio con elevados niveles sonoros en su interior, escuchar música con auriculares a elevado volumen y con bastante frecuencia son algunas causas de la pérdida auditiva.

Este tipo de pérdida auditiva se llama también *neurosensorial*, ya que la causa se produce en el oído interno, donde parte del tejido de células ciliadas interiores queda desconectado y no aporta información al cerebro. Todas las células ciliadas son afectadas por los niveles sonoros independientemente de su posición sobre la membrana basilar.

Sin embargo, la cantidad de células ciliadas situadas en las bandas de alta frecuencia es notablemente inferior respecto a las de bandas más bajas de frecuencia y por ello, la sensibilidad auditiva se pierde antes a altas frecuencias que a bajas frecuencias. La figura 4.2 muestra una audiometría típica con pérdida de percepción.



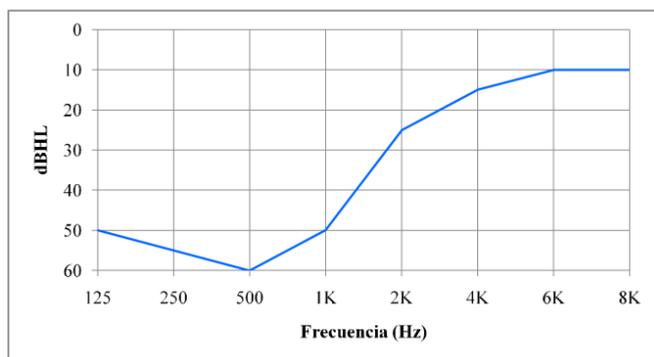
**Figura 4.2.** Perfil típico de una audiometría con pérdida por percepción.

#### 4.1.5.1.2. Pérdida auditiva por transmisión

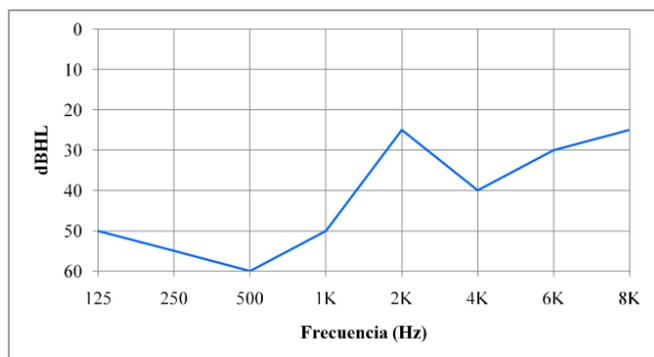
Este perfil obedece a un trauma acústico grave o una malformación congénita, donde la transmisión mecánica de las vibraciones captadas por el tímpano no llega a la cóclea. Puede haber diversas causas y para una de ellas puede haber ligeras variaciones en la forma de la curva audiométrica. La causa más habitual está relacionada con la cadena de huesecillos, que no transmite correctamente la información vibratoria a la cóclea. La rotura del tímpano a causa de un impacto sonoro de elevada intensidad reduce notablemente la capacidad de transmitir vibraciones hacia la cóclea. Obviamente, dentro de la gravedad, cada caso puede ser distinto y presentar sensibilidades en frecuencia ligeramente distintas en función del origen de la pérdida auditiva. La figura 4.3 muestra una audiometría típica con pérdida por transmisión.

#### 4.1.5.1.3. Pérdida auditiva mixta

Este perfil es una mezcla de los casos anteriores, de manera que el paciente presenta una audiometría muy característica y muy poco frecuente. La figura 4.4 muestra el perfil de una pérdida auditiva mixta.



**Figura 4.3.** Perfil típico de una audiometría con pérdida por transmisión.



**Figura 4.4.** Perfil típico de una audiometría con pérdida mixta.

#### 4.1.6. Sensibilidad auditiva de la población

Se pueden encontrar muchos estudios audiométricos realizados en distintas épocas, con distintos equipos y con distinta población. Toda esta diversidad de resultados dificulta las comparaciones entre ellos. A pesar de ello, en las últimas décadas se ha constatado que se obtienen distintos resultados en función de la procedencia de la población. Seguidamente, se muestran unos ejemplos de estudios audiométricos para mostrar resultados reales.

##### 4.1.6.1. Estudio audiométrico (Barti, 2000)

El estudio audiométrico se llevó a cabo entre estudiantes universitarios de Ingeniería con edades entre los 19 y los 28 años en el año 2000 en Barcelona (Barti R. , 2000). El

objetivo del estudio era determinar el grado de sensibilidad auditiva de población joven, extendida hasta la banda de 16 kHz. Saber cómo es el oído de los jóvenes es importante para conocer la influencia del ruido ambiente sobre la población. El ruido de tráfico en las ciudades, el sonido elevado en las discotecas o escuchar música mediante auriculares pueden producir disfunciones en el oído. Con este estudio, se hizo una encuesta de los hábitos acústicos, como el uso de reproductores de música, la frecuencia de estar en ambientes sonoros elevados, etc.

El estudio estaba motivado porque diversos estudios audiométricos realizados en la década de los noventa en Francia mostraban que la población joven tenía una capacidad auditiva bastante maltrecha, y esto hizo intervenir a las autoridades para evitar males mayores, promulgando la Ley 96-452 de 28 de mayo de 1996, que prohibió la venta en todo el territorio Francés de cualquier equipo reproductor que diera más de 100 dBA a la salida de los auriculares. Algunos fabricantes de estos equipos reproductores, conscientes de que un nivel excesivo podía llegar a ser perjudicial, ya incorporaban el sistema AVS (Automatic Volume System) desde principios de la década de los noventa, que no permite subir el nivel de la música por encima de un determinado valor.

Los audiómetros convencionales más usados habitualmente suelen trabajar entre los 125 Hz y los 8 kHz. Los resultados de un test audiométrico se representan siempre en forma de gráfico. Se dibujan dos curvas: una azul para el oído izquierdo y una roja para el oído derecho. Este gráfico indica el grado de sensibilidad de cada oído para cada frecuencia. Sin embargo, es en las altas frecuencias donde se puede detectar con mayor claridad si hay una afectación en la sensibilidad auditiva. Por este motivo, el estudio audiométrico se hizo con un audiómetro de alta gama que cubría las bandas de 125 Hz a 16 kHz. Las audiometrías se realizaron en una cámara sorda de pequeñas dimensiones con un ruido de fondo inferior a los 25 dBA. La figura 4.5 muestra en primer plano el audiómetro y la cámara utilizada para hacer las audiometrías.

Para conocer los hábitos y las costumbres acústicas de las personas sometidas al estudio, se les pasa una encuesta que deben rellenar antes de hacer la prueba. La encuesta se rellena en un entorno silencioso, que permite que el oído se vaya adaptando a los niveles sonoros más bajos antes de realizar la prueba. Además de la edad, el lugar de nacimiento y otros datos personales, se hacen las siguientes preguntas:

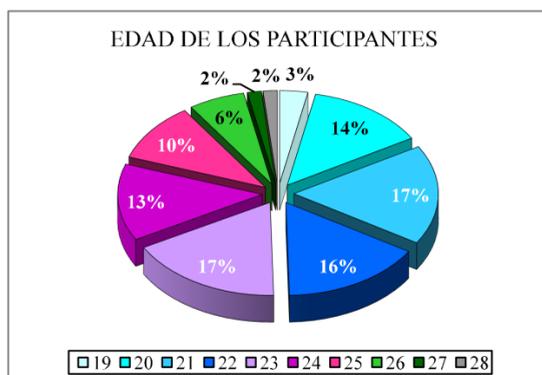
- Preferencia de estilo musical.
- Utilización de *walkman* o similares.
- Frecuencia con la que va a las discotecas.
- Si toca en algún grupo musical.



**Figura 4.5.** Audiómetro Maico MA52 con auriculares Telephonics TDH-39P y cámara sorda donde se realizaron las audiometrías.

- Medio de transporte utilizado preferiblemente.
- Antecedentes familiares de sordera. Accidentes sufridos.

Los participantes en el estudio audiométrico fueron jóvenes estudiantes universitarios de edades comprendidas entre los 19 y los 28 años. La distribución por franjas de edad se resume en la figura 4.6.



**Figura 4.6.** Distribución por edades de los participantes.

El 70% de las preferencias musicales de la mayoría de participantes se repartían entre la música rock y la música pop, como muestra la figura 4.7. El tipo de música *per se* no tiene por qué favorecer la pérdida de sensibilidad auditiva. No obstante, cierto tipo

de música requiere ser escuchada con niveles sonoros elevados, lo que sí puede ser causa de una hipoacusia.



Figura 4.7. Preferencias musicales de los participantes.

La escucha de música mediante reproductores portátiles y auriculares estaba muy extendida entre los jóvenes en el año 2000. Su uso y sobre todo, el nivel con el que se escucha el sonido pueden afectar en mayor o menor grado a la sensibilidad auditiva. La figura 4.8 muestra los hábitos de uso de estos dispositivos entre los jóvenes encuestados. Como se puede observar, el uso de estos dispositivos es mayoritario, con un uso frecuente o diario del 35% y 25%, respectivamente.

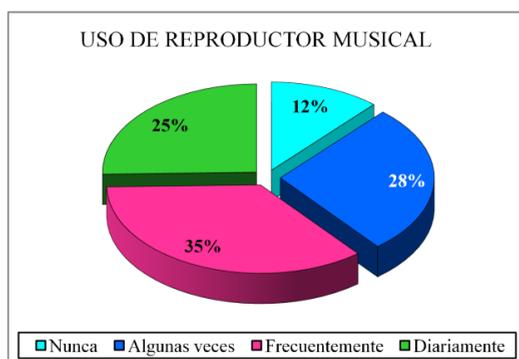
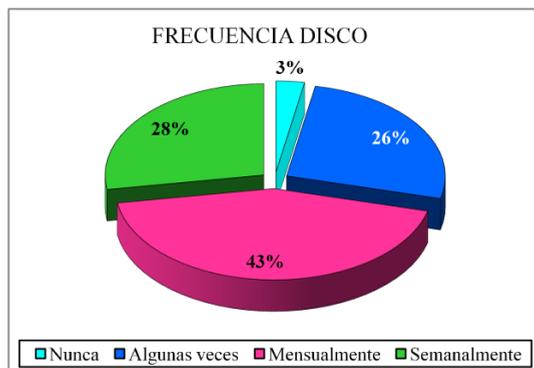


Figura 4.8. Porcentaje de uso de reproductores musicales.

Frecuentar ambientes sonoros elevados es un hábito de riesgo que puede comportar la pérdida parcial temporal o permanente de la sensibilidad auditiva. La figura 4.9 muestra la frecuencia con la que van a las discotecas o salas de fiesta entre las personas

encuestadas. Se constata que el 43% va a la discoteca una vez al mes, mientras que un 28% lo hace semanalmente.



**Figura 4.9.** Frecuencia en la asistencia a discotecas por parte de las personas que participaron en los test audiométricos.

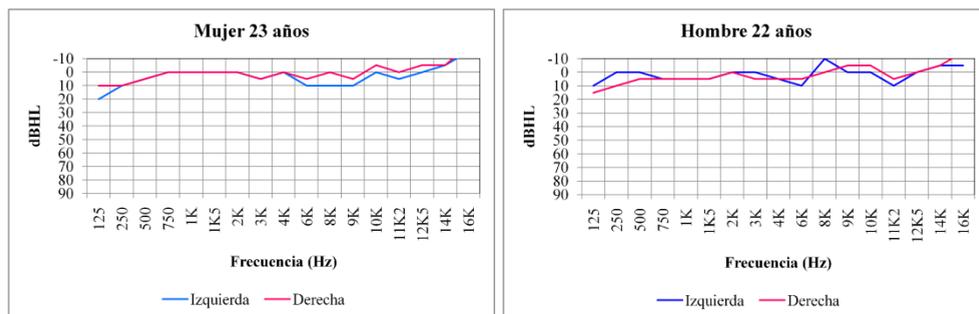
La ecualización utilizada en la escucha musical es importante para valorar la mayor o menor nocividad. Como se muestra en la figura 4.10, el 51% de los participantes aumentan más las bajas frecuencias respecto al resto de bandas. Solo el 17% de los participantes manifestaron que preferían enfatizar los agudos por encima del resto de bandas.



**Figura 4.10.** Preferencia en la ecualización musical de los participantes en el estudio audiométrico. La mayoría, un 51%, enfatiza los graves.

Este proceder es más conservador para el oído, pero resulta más preocupante en escucha con altavoces, dado que la energía de baja frecuencia es muy elevada y puede originar problemas de contaminación acústica.

En la figura 4.11 se muestra el resultado del test audiométrico de una chica y un chico de 23 y 22 años, respectivamente, que podemos considerar con una audición normal. En ambos casos, se trata de personas que no presentan ninguna patología en el oído. Los ejemplos mostrados son de los mejores que se encontraron de la muestra de participantes. En los casos similares de este estudio, se observa que la capacidad auditiva está ligeramente por debajo de la que correspondería por la edad.



**Figura 4.11.** Audiometría de dos jóvenes sin patologías auditivas.

Esta circunstancia también ha sido observada por diversos investigadores y es motivo de estudios y debates que han conducido, como resultado de dichas investigaciones, a una nueva propuesta de curvas isofónicas que sustituyen a las de Robinson y Datson del año 1956.

También conviene resaltar un hecho bastante conocido: la mayor capacidad auditiva de las mujeres a altas frecuencias respecto de los hombres, así como una mayor sensibilidad auditiva. Se puede afirmar que las mujeres tienen un oído con mejores prestaciones que los hombres. Los dos ejemplos escogidos corresponden a dos jóvenes que realizan una vida normal por su edad, es decir van alguna vez a discotecas, conciertos de música y les gusta escuchar música con frecuencia. Sin embargo, el estudio reveló que una buena parte de la muestra analizada presenta unos resultados bastante diferentes a estos, con patologías graves y muy graves. En la figura 4.12 se muestran dos de los casos más graves analizados por el autor. El punto común entre ambas personas es que tocan en grupos musicales con equipos electro amplificados.

En la figura 4.12 podemos observar a la derecha, la audiometría de un joven de 24 años que toca en un grupo de rock. El oído izquierdo presenta una pérdida media de sensibilidad de unos 35 dBHL respecto al oído derecho. Podría ser una casualidad, pero la causa probable de esta pérdida de sensibilidad es el altavoz que tiene a su izquierda cuando toca con el grupo musical. El desequilibrio en la sensibilidad entre los oídos es bastante frecuente entre músicos con equipos amplificados. Al margen de suponer un impedimento serio en la

composición musical, el desequilibrio le va a dificultar en gran medida la localización de fuentes sonoras y algunas acciones, como selección de una conversación entre otras, discriminar una voz del ruido, etc. Un ejemplo desgarrador para una persona con solo 24 años.

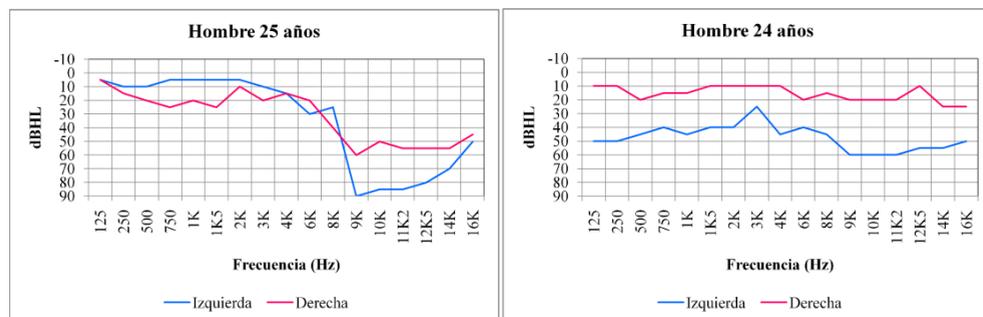


Figura 4.12. Audiometrías con patologías graves.

En la misma figura 4.12 se muestra, a la izquierda, la audiometría de un joven de 25 años que también toca ocasionalmente en un grupo, aunque se dedica más a la composición de música electrónica. En este caso, la audiometría muestra una sensibilidad más equilibrada entre ambos oídos. La sensibilidad auditiva está ligeramente por debajo de lo normal, hasta los 8 kHz. Sin embargo, a partir de esta banda, su sensibilidad auditiva cae en picado, con pérdidas entre los 50 dBHL y los 80 dBHL, impidiendo a esta persona dedicarse profesionalmente a la música, su pasión. Las personas con deficiencias muy graves como las mostradas no eran conscientes de su carencia hasta ver el resultado del test audiométrico.

Aplicando los criterios para calcular el grado de discapacidad auditiva, se obtiene que la sensibilidad auditiva de estos jóvenes se considera normal, sin ninguna afectación. Sin embargo, la realidad será muy distinta cuando tengan más de 40 años. Tendrán mucha dificultad para comunicarse con sus semejantes en entornos con algo de ruido ambiente. Con un grupo de amigos por ejemplo, estos probablemente puedan seguir todas las conversaciones sin dificultad, pero ellos no. Su sentido auditivo que no su oído, no les permite seleccionar el mensaje de voz y «eliminar» el ruido ambiente, gracias al procesado binaural.

Los dos casos anteriores eran jóvenes estudiantes de Ingeniería de Telecomunicaciones (especialidad Imagen y Sonido) y pretendían formarse en la creación y producción musical. Eran conocedores de que el oído debía cuidarse y no cometer excesos. Su pérdida de sensibilidad no se produjo por frecuentar discotecas o escuchar música con cascos a todo volumen. La causa de su pérdida auditiva fue su pasión por la música y no ser conscientes de las autolimitaciones que hay que saber imponerse.

Los resultados globales promediando todos los casos analizados, salvo los más graves, se muestran en la figura 4.13. Estos resultados están ligeramente por debajo de lo esperado por la edad de la muestra de participantes. Tanto para las chicas como para los chicos, se observa una ligera caída en la banda de 6 kHz, que indica que la mayoría de casos presentan síntomas de agotamiento acústico, más o menos avanzado según el caso. Este agotamiento deriva en un trauma acústico irreversible si no se cambian los hábitos acústicos. Este valle se desplaza en poco tiempo hasta los 4 kHz y empieza entonces la caída imparable y acelerada de pérdida de sensibilidad a altas frecuencias.

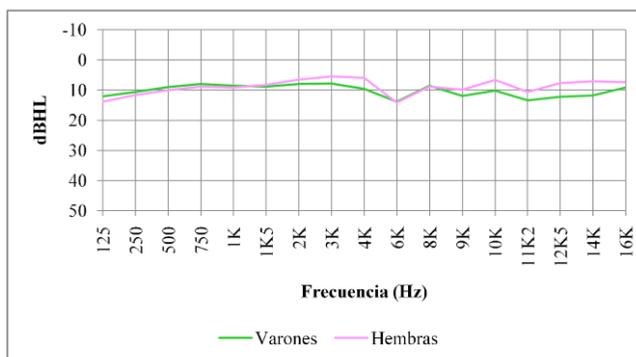
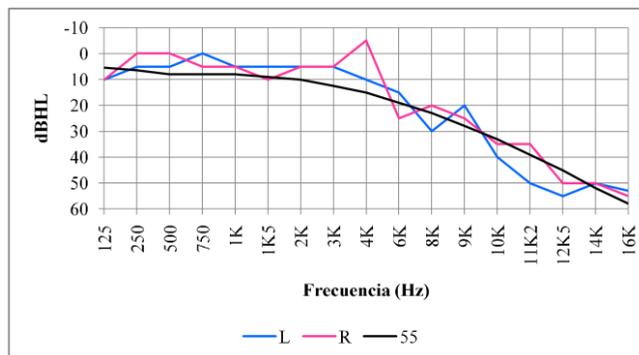


Figura 4.13. Audiometría media obtenida para ambos sexos.

En contraposición a las maltrechas audiometrías mostradas, la figura 4.14 muestra la audiometría de una soprano profesional de 56 años. La línea de color negro indica el perfil esperado para una persona de esta edad, y, como se puede comprobar, la audiometría supera ligeramente a la previsión. La soprano ha cuidado toda la vida su oído, evitando excesos. A pesar de tener un oído perfecto para su edad, y haber perdido sensibilidad en las bandas altas de frecuencia, cuando escuchó una grabación de una interpretación suya en formato *cassette* (esto sucedió en los años noventa), quedó horrorizada por la falta de agudos. A pesar de tener una pérdida de 40 dBHL en las bandas cercanas a los 10 kHz, no perdió los sonidos del órgano de viento, por tener un sentido auditivo «educado», siendo capaz de detectar matices sonoros que una persona más joven y con oído teóricamente «perfecto» no puede apreciar por la falta de experiencia y educación musical.

Esto muestra la gran importancia de la plasticidad del cerebro en la «educación» del sentido auditivo, que es vital para mitigar los efectos de la edad. Las personas con formación musical, siempre que sean prudentes con no abusar de niveles sonoros elevados, suelen presentar curvas audiométricas que siguen bastante bien los estándares de sensibilidad por la edad. Sin embargo, estas personas, a pesar de su pérdida de sensibi-

lidad auditiva «natural», presentan una capacidad de percibir matices sonoros que otras personas, incluso con mejor oído, no pueden apreciar.



**Figura 4.14.** Audiometría de una soprano profesional de 56 años comparada con la curva de sensibilidad auditiva correspondiente a una edad de 55 años.

El problema detectado en los casos mostrados no es un hecho aislado. La dificultad para estas personas no radica en la percepción de sonidos de baja intensidad, ya que, si se les habla en voz baja, pueden escuchar perfectamente la locución. Su verdadero problema radica en la dificultad de comunicación con otras personas en entornos ruidosos. Estar en el interior de un restaurante donde se grita para que te entiendan y no entiendes lo que te dicen es un síntoma claro de que hay una merma de sensibilidad auditiva. Esta «desconexión social» es imposible de superar para aquellas personas con patologías similares a las mostradas, que simplemente se quedan «aisladas» socialmente. Estamos, pues, ante un problema delicado al que mucha gente no presta la atención necesaria.

El test audiométrico convencional hasta la banda de 8 kHz da una idea aproximada de las posibilidades auditivas de una persona, pero no puede evaluar la capacidad de realizar una vida «normal». Solo el test audiométrico de alta frecuencia hasta la banda de 16 kHz permite evaluar con mayor realismo la discapacidad real que va a tener el sujeto.

La valoración porcentual del estudio audiométrico realizado a jóvenes estudiantes universitarios de edades entre 20 y 28 años en el año 2000 se resume en la tabla 4.1. Esta valoración se hace basándose en las posibilidades de hacer vida normal teniendo en cuenta las bandas de alta frecuencia y no con lo establecido en el RD 1971/1999. El Real Decreto valora la sensibilidad auditiva en las bandas de 500, 1000, 2000 y 3000 Hz, argumentando que es donde se encuentra la energía de la voz. Sin embargo, una cosa es escuchar unas voces y otra muy distinta es entender el mensaje que transmiten esas voces.

**Tabla 4.1.** Resultados del test audiométrico. Valoración global

| DEFICIENCIA    | NINGUNA-LEVE | GRAVE | MUY GRAVE |
|----------------|--------------|-------|-----------|
| Porcentaje (%) | 55,2         | 27,7  | 17,1      |

Como se puede observar, aproximadamente un 45 % de los jóvenes que participaron en las pruebas presentan algún defecto auditivo digno de mención. Un 17,1 % del total presentaban defectos auditivos que se pueden clasificar como muy graves. Sin embargo, solo dos individuos de la muestra analizada (0,005 %) presentaban «oficialmente» discapacidad auditiva. Nótese que con las audiometrías convencionales entre los 125 Hz y los 8 kHz no se detectan las importantes pérdidas auditivas a frecuencias superiores, que son el presagio del problema de pérdida de sensibilidad auditiva. Las audiometrías convencionales están contempladas en la norma ISO 7029 (2017) y sería recomendable actualizar el procedimiento, incorporando en los test la parte de alta frecuencia hasta los 20 kHz en aras de detectar más eficazmente la hipoacusia.

Las personas con pérdida auditiva prematura aparentemente pueden hacer vida normal. Pero un test audiométrico clásico no parece ser el mejor sistema para evaluar su discapacidad. Al margen de las pruebas por vía ósea, necesarias a partir de pérdidas de 40 dBHL para determinar realmente el grado de sordera, deberían hacerse las pruebas de inteligibilidad con ruidos enmascaradores. Estas pruebas son las que realmente marcan las diferencias. Escuchar unos tonos en un ambiente muy silencioso no significa que se pueda realizar una vida social de forma normal. Las audiometrías hechas con tonos puros no deberían ser interpretadas como valores absolutos del grado de discapacidad auditiva de una persona, sino como una aproximación.

#### 4.1.6.2. Estudio audiométrico (Rodríguez, 2015)

El estudio, llevado a cabo por el equipo del doctor A. Rodríguez y publicado en el *International Journal of Audiology* en 2015 muestra un extenso estudio audiométrico realizado entre los años 2009 y 2013 (Rodríguez, 2015). El examen auditivo se hizo mediante tonos puros para las bandas de octava de 125 Hz a 8 kHz. La muestra fue de 1.175 personas voluntarias, todos de la provincia de Madrid (España), residentes tanto en zonas urbanas como no urbanas. En total fueron 587 mujeres y 588 hombres con edades entre 5 y 90 años, que se dividieron en 10 grupos, con intervalos de 10 años, salvo el último grupo de edad más avanzada que fue de 75 a 90 años. Como es costumbre en estos estudios, ningún voluntario presentaba patologías auditivas. Los resultados se resumen gráficamente en la figura 4.15.

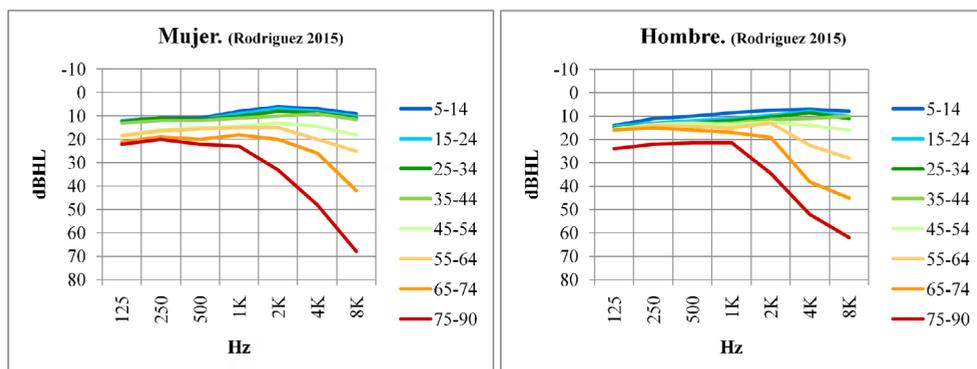


Figura 4.15. Resultados del umbral de audición.

Los resultados reflejan cómo con la edad, la sensibilidad auditiva va mermando. Es destacable que los casos de menos de 20 años que deberían tener una respuesta «plana» es decir, sin pérdida auditiva (0 dBHL), muestran claramente una disminución para todas las bandas. También es destacable que a partir de los 65 años aproximadamente se acentúa la pérdida auditiva a partir de los 2 kHz. Si se comparan los resultados de las edades de 20, 50 y 70 años (por claridad) con el estándar ISO 7029, se aprecia una desviación notable, especialmente a bandas frecuencias, como muestra la figura 4.16.

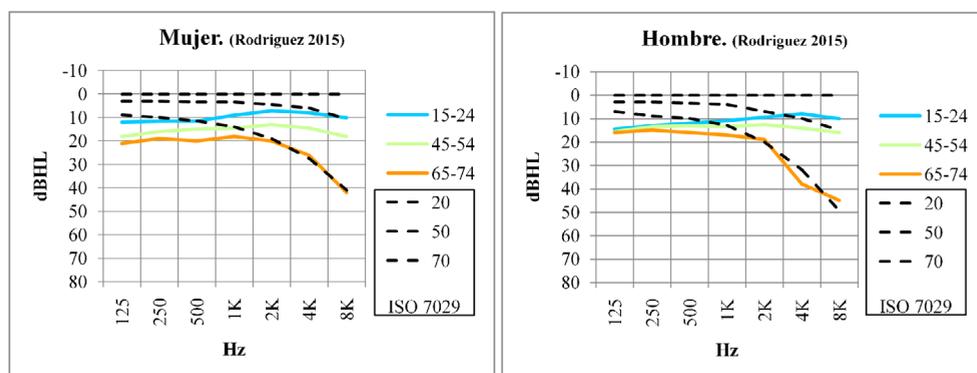


Figura 4.16. Comparación del umbral de audición con el estándar ISO 7029.

Las desviaciones siempre se pueden producir en los estudios experimentales, ya que las curvas son para una franja de edades y la distribución de pacientes dentro de esta franja no tiene por qué ser uniforme. Estas desviaciones entre los resultados experi-

mentales y la ISO 7029 se repiten en otros estudios realizados por otros profesionales en otras latitudes, como el que se muestra seguidamente.

#### 4.1.6.3. Estudio audiométrico (Engdahl, 2020)

El estudio fue llevado a cabo por el equipo del doctor Bo Engdahl y publicado en *Ear Hearing* en 2020, y en él se presenta un extenso estudio audiométrico realizado entre los años 2017 y 2019 (Engdahl, Heine Strand, & Aarhus, 2020). La muestra fue de 28.339 personas voluntarias, aptas para realizar las pruebas. El examen auditivo se hizo mediante tonos puros para las bandas de octava de 500 Hz a 8 kHz, siguiendo una secuencia automática: «Pulse el botón cuando oiga el tono». Se organizaron seis grupos de edades entre 30 y 80 años con un escalado de 10 años. Como es costumbre en estos estudios, los voluntarios no presentaban ninguna patología auditiva. Los resultados se resumen gráficamente en la figura 4.17.

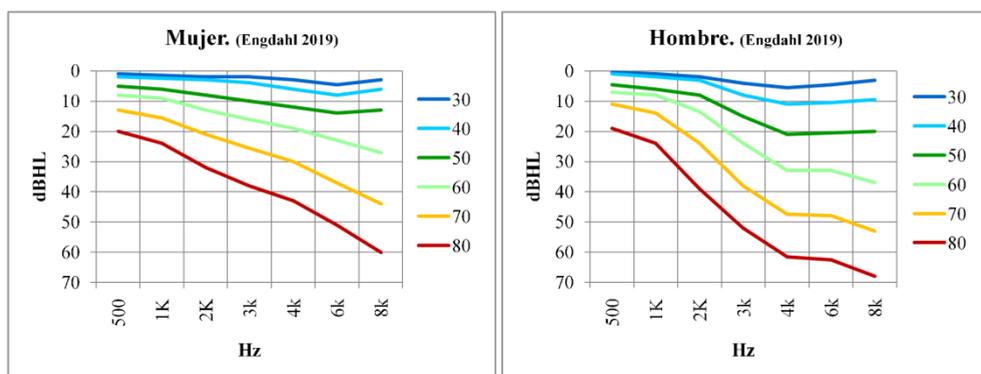


Figura 4.17. Resultados del umbral de audición para todas las franjas de edad.

Los resultados muestran que las mujeres tienen más sensibilidad auditiva que los hombres en todas las franjas de edad. Hay una característica destacable en los resultados de los hombres, en quienes se aprecia que hay una caída pronunciada sobre la banda de los 4 kHz a partir de los 40 años y que afecta a las bandas superiores. Esta caída es característica de haber sufrido una exposición a niveles sonoros elevados que, por las edades, probablemente sean entornos industriales.

#### 4.1.6.4. Estudio audiométrico (Wasano, 2021)

El estudio fue llevado a cabo por el equipo del doctor K. Wasano y publicado en *The Lancet Regional Health – Western Pacific* en 2021, y en él se presenta un extenso estudio audiométrico realizado entre los años 2000 y 2020 (Wasano, Kaga, & Ogawa, 2021).

La muestra fue de 11.681 personas voluntarias, que tenían que ser parlantes de japonés. La figura 4.18 muestra los resultados obtenidos. Analizándolos, se observa una similitud con las franjas de edad de los resultados del estudio mostrado anteriormente.

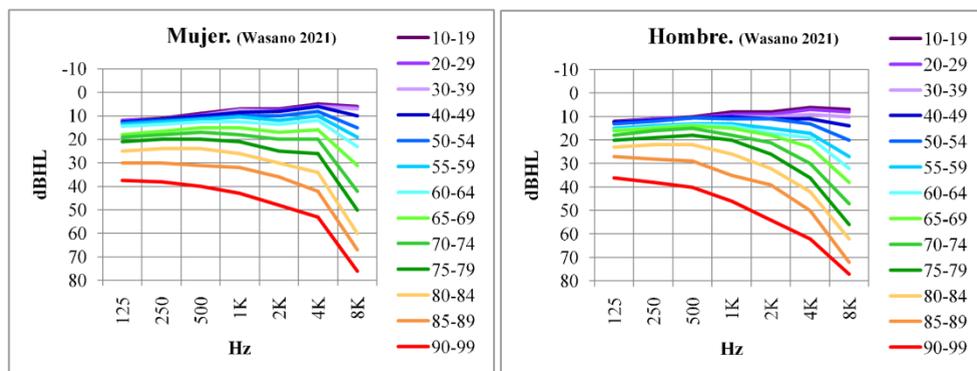


Figura 4.18. Resultados del umbral de audición para todas las franjas de edad.

Destacamos que los niveles de sensibilidad auditiva en la parte alta de las gráficas queda apreciablemente por debajo del estándar ISO 7029, como muestra la figura 4.19. Los resultados mostrados evidencian una cuestión ampliamente debatida y que muchos autores están exponiendo: no es posible encontrar un estándar universal para toda la población mundial. Por este motivo, la armonización de estándares tiene una gran dificultad.

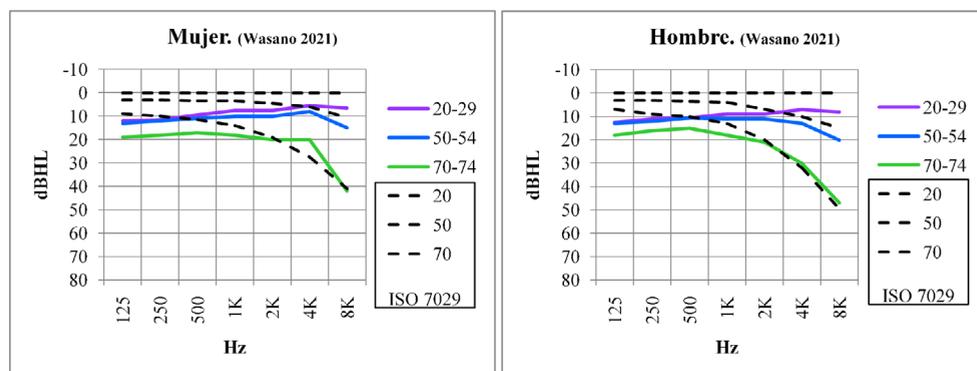
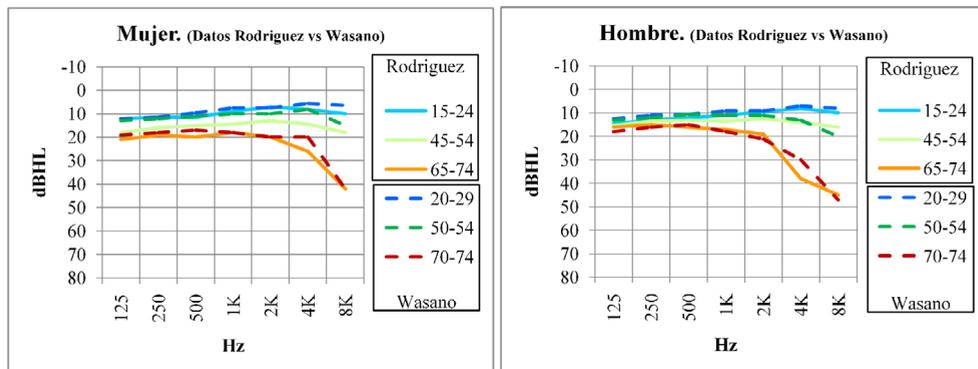


Figura 4.19. Comparación del umbral de audición con el estándar ISO 7029.

Abundando un poco más en los resultados mostrados en los estudios audiométricos anteriores, y comparando tres franjas de edades (de 20, 50 y 70 años), se observa que la sensibilidad auditiva de la población nipona es en general superior a la española, como

muestra la figura 4.20. El estudio de Wasano concluye que se observa una mejora de la sensibilidad auditiva de la población nipona analizada.



**Figura 4.20.** Comparación del umbral de audición para las edades de 20, 50 y 70 años entre los resultados de Wasano y Rodríguez.

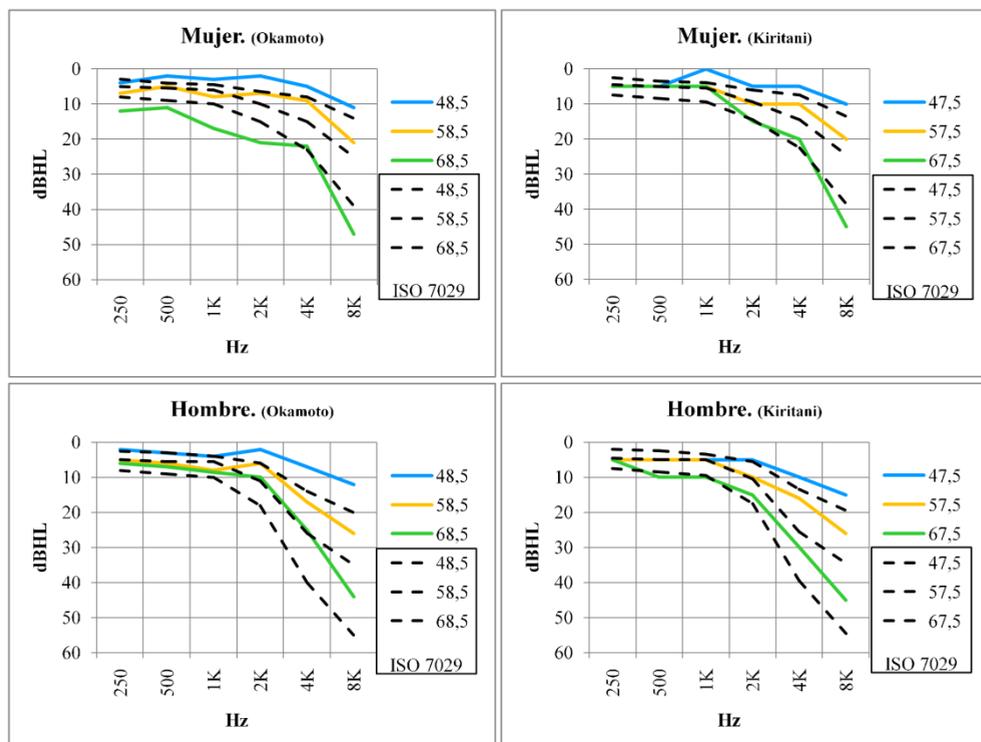
A esta conclusión llegan otros estudios, como el de K. Kurakata y T. Mizunami en 2005, basados en los trabajos del equipo de M. Okamoto (1989) y del equipo de N. Kiritani (1992). Apuntan en sus conclusiones que socialmente se han producido cambios importantes en la sociedad japonesa y a nivel demográfico hay un aumento en la longevidad, que supera los 80 años. También apuntan a un descenso generalizado de la sensibilidad auditiva de los jóvenes japoneses.

La figura 4.21 muestra las conclusiones del trabajo de K. Kurakata y T. Mizunami en 2005.

El estudio compara el promedio de tres franjas de edades: 48,5, 58,5 y 68,5 años. Esta conclusión no es categórica, ya que la franja de edades tiene en algún caso una mayor dispersión. No obstante, una de las conclusiones de su trabajo apunta que las nuevas generaciones tienen una sensibilidad auditiva mayor que sus antecesores. Argumentan que una causa bastante probable sería el trabajo industrial que se hacía antiguamente con elevados niveles de ruido y que en las últimas décadas se ha eliminado.

Se observan una serie de coincidencias entre ambos trabajos. La tendencia para las tres bandas de edad es la misma y superan las previsiones de la ISO 7029. Solo hay un caso obtenido por Okamoto en la franja de mayor edad que queda por debajo de la ISO 7029. Es destacable que las mejoras son cercanas a los 10 dBHL. También es reseñable que la técnica de Kiritani utiliza un paso de 5 dB, mientras que en los datos de Okamoto es de 1 dB.

Como resultado, el gráfico con el salto de 5 dB es más brusco. El estudio de Okamoto se basa en 226 mujeres y 342 hombres, mientras que el trabajo de Kiritani se basa en 496 mujeres y 2.158 hombres.



**Figura 4.21.** Comparación de la mediana de las desviaciones del umbral de audición de los sujetos japoneses con las del estándar ISO 7029. A la izquierda, según Okamoto; a la derecha, según Kiritani.

# Capítulo 5.

## Características de la audición

### 5.1. Características sensoriales de la audición

Debe tenerse presente que, cuando se habla de la audición, se hace referencia tanto a la parte fisiológica del oído (comentada en el capítulo 3) como a la parte subjetiva. Si bien la parte fisiológica es más conocida en su funcionamiento, la parte interna de procesamiento de las señales en nuestro cerebro constituye uno de los puntos más oscuros. Ciertas características del sentido auditivo facilitan las apreciaciones que se puede hacer de un sonido. Por este motivo, es importante conocer hasta qué punto un sonido puede resultar molesto o no para una persona a partir de saber *a priori* cuáles son estas características.

#### 5.1.1. Adaptación y habituación del oído al nivel sonoro

La exposición del oído al ruido durante un período muy largo crea una cierta adaptación. Un estudio realizado hace unas décadas demostraba que el grado de insatisfacción disminuye, mientras que las condiciones de ruido no (Griffiths & Raw, 1989). El efecto fue permanente en un mínimo de 2 años en algunos casos y entre 7 y 9 años para la mayoría. Es decir, que en cierta manera los individuos se habituaban al ruido existente en una zona pasado un cierto tiempo. La habituación se puede producir fácilmente cuando la fuente sonora se considera «inherente» al origen de esta. Se trata de un ruido muy monótono (no constante) que aburre al cerebro y resulta fácil «desconectar». Por ejemplo, el ruido de una carretera o una autopista. En estos casos, durante el día hay un cierto nivel de ruido, pero al llegar la noche el nivel baja y esto coincide con los hábitos saludables de las personas.

Sin embargo, la habituación no es posible cuando la fuente sonora se produce especialmente de noche, como en el caso del ocio nocturno, entrando en conflicto con el descanso nocturno. En estas actividades, el sonido es mucho más pernicioso para el sentido

auditivo debido al carácter rítmico que nuestro cerebro puede detectar con muchísima facilidad.

La habituación puede ser psicológica o puede ser física, aunque realmente son ambas cosas. Por un lado, la rutina diaria de escuchar siempre el mismo ruido, con un nivel similar, produce una reacción de protección con respecto a la discriminación del ruido. La persona no está permanentemente atenta al nivel sonoro y llega a «desconectar» literalmente del ruido, de manera que, cuando la fuente para, es cuando nos damos cuenta del ruido existente hasta aquel momento y del que no éramos plenamente conscientes. Pero, unido a esta desconexión, nuestro oído dispone de un sistema que es similar al de la visión, de manera que se adapta en todo momento al nivel de ruido medio. ¿Qué significa esto? Pues que, si estamos en un entorno muy silencioso durante un tiempo prolongado, el oído externo llegará a presentar su máxima sensibilidad y por tanto, el tímpano presenta la mínima resistencia al desplazamiento. Si en estas condiciones un sonido inesperado de nivel elevado nos llega al oído, provocará una reacción de sobresalto.

En cambio, si estamos en un entorno más ruidoso, el mismo estímulo no producirá el mismo efecto. Sucede igual cuando sabemos que se va a producir ese sonido. Cuando el oído detecta niveles importantes de presión acústica de una manera prolongada, se auto protege, de manera que el tímpano queda tensado ligeramente. En este momento, la sensibilidad del oído es menor y, por tanto, también la sensación de sonoridad percibida, que a los pocos minutos es inferior. Es importante destacar que, cuando el oído está sometido a niveles elevados de presión acústica durante un período importante (diversas horas), internamente se tiene la sensación de que el sonido no es tan fuerte como al principio.

Se puede llevar a cabo una experiencia muy simple que puede ilustrar este efecto. Se trata de reproducir a través de unos auriculares (el tipo de auricular es indiferente) una música agradable a un nivel moderadamente elevado, pero solo por un canal, actuando sobre el control de balance del amplificador desviando la señal hacia L o R. Después de escuchar la música durante unos 10 minutos al volumen deseado por uno de los oídos, se para la reproducción y el control de balance se sitúa en la posición central. Esta operación no puede tardar más de 10 segundos. Una vez hecho esto, se reproduce el mismo fragmento dejando el mismo volumen, pero ahora por los dos canales a la vez. Se observa como el oído que no escuchaba música percibe un nivel sonoro más fuerte que el recibido por el oído de prueba. Este efecto de adaptación se conoce como *party effect*.

El grado de adaptación del oído puede llegar a los 30 dB, es decir, nuestro oído puede llegar a «atenuar» la percepción sonora unas ocho veces cuando está sometido a niveles superiores a los 80 dB. Este fenómeno es de vital importancia para los que controlan una mezcla de sonido, ya sea en directo, una grabación en estudio o una posproducción. Hay que dejar descansar el oído, parando cada 2 horas como mucho. Nótese que la res-

puesta en frecuencia del oído va a cambiar durante el proceso de mezcla o *mastering*, sin que nos apercebamos de ello en ese momento. El desastre se puede oír al día siguiente, cuando retomamos el trabajo, pero con nuestro oído recuperado. En muchas ocasiones, interminables sesiones de mezcla acaban desechadas.

### 5.1.2. Seguimiento y reconocimiento de conversaciones

El reconocimiento del habla es una de las tareas más sencillas que se puede realizar de forma natural y en cambio, resulta compleja y dificultosa de hacer con máquinas. Es evidente que es necesario un análisis de la señal para identificar a un locutor, pero a pesar de los análisis más finos, la identificación mecánica de la voz no garantiza nunca un 100% de aciertos y en caso de hacerlo, es con un vocabulario o un número de locutores muy restringido.

Una situación frecuente se da cuando se está hablando con un grupo de tres o cuatro personas en un entorno donde se producen simultáneamente otras conversaciones entre otros grupos de personas. En este ambiente, somos capaces de «seguir» voluntariamente una conversación que se produce a nuestras espaldas con un nivel de señal a veces mucho más bajo que el de otras conversaciones más cercanas y que además, quizás utiliza la misma lengua y también la misma banda de frecuencias. Cómo realizamos esta selección es un misterio. Realmente, este filtrado es el resultado de un aprendizaje previo durante nuestra infancia, que nos permite «seleccionar» una fuente de sonido entre otras. Por tanto, se trata de reconocer patrones de interferencia y asociarlos a un contenido. Cuando escuchamos una voz concreta entre otras locuciones y ruidos, nuestro cerebro intenta «seguir» la conversación. Para ello, utiliza técnicas de selección del espacio acústico, que permiten al sentido auditivo focalizar sobre una zona concreta. Sin embargo, esto solo es posible si las conversaciones se encuentran con ángulos suficientemente separados. Nuestro sistema auditivo realiza pues, una selección en el dominio temporal, no en frecuencia.

Sin embargo, este proceso no funciona siempre. Por ejemplo, cuando dos conversaciones están formando un ángulo inferior a los 30° aproximadamente, no es posible seleccionar la conversación a menos que estas presenten algunas diferencias notables de nivel, de idioma o de contenido en frecuencia. Cuando dos personas nos están hablando a la vez delante de nosotros, no podremos escoger una u otra. En cambio, si una está delante y otra detrás o al lado, sí. Este proceso se conoce como el *cocktail-party effect*. Cuando escuchamos conversaciones en nuestra lengua, este proceso es mucho más sencillo y se realiza casi sin esfuerzo. En un entorno ruidoso probablemente no se decodifican todas las palabras, pero el cerebro va reconstruyendo el mensaje, guiándose por el sentido de la frase. Este seguimiento o selección de locutor conlleva una decodificación del mensaje, es decir, realmente seguimos la conversación. La parte de decodificación es fundamen-

tal. Nótese que, al escuchar dos músicas simultáneas, se mezclan los sonidos irremisiblemente y es imposible que el sentido auditivo pueda seleccionar una u otra melodía.

Recientes trabajos de investigación intentan simular este efecto tan interesante de focalizar la atención sobre un sonido. Se parte de un preprocesador de la señal, donde se descomponen los dos canales de información en componentes analizados por bandas críticas. El análisis por bandas críticas permite seleccionar la señal del orador deseado, el cual presenta un patrón de interferencia característico. Si la señal de determinada banda queda disminuida por el ruido externo, entonces el sistema escoge alternativamente otra banda característica del orador para «seguirla». En el caso de existir muchos oradores, el sistema necesita saber la posición del orador respecto de su posición. De esta manera, se puede seleccionar la señal que presente el patrón de interferencia adecuado (ITD, ILD) con la dirección escogida. En definitiva, el sistema permite seleccionar una dirección preferente del sonido que llega a un receptor, y sería algo parecido a una antena acústica direccional.

### **5.1.3. Efecto distractor del sonido**

El efecto más obvio de la exposición al sonido de alta intensidad es la pérdida auditiva. Los altos niveles de ruido de fondo pueden ser una molestia y afectar a la salud humana. Sin embargo, el sonido ambiente también afecta a la concentración (Banberry & Berry, 2005) (Hockey, 1970). En el pasado, diversos estudios analizaron los efectos del ruido industrial y las contracciones musculares sobre la vigilancia simple y compleja. El ruido industrial de alta intensidad redujo los tiempos de reacción y movimiento al responder a tareas simples de vigilancia y disminuyó el rendimiento durante una tarea compleja de vigilancia (Button, Behm, Holmes, & Mackinnon, 2004). No está claro si los volúmenes altos de música, que pueden considerarse agradables o estimulantes, pueden tener efectos perjudiciales similares en la actividad humana.

Hay estudios que prueban que la música también puede distraer la actividad humana durante tareas específicas (Crawford & Strapp, 1994). Y también hay estudios que afirman que la música puede incluso distraer tanto como el ruido (señal no deseada o perturbación) (Furnham & Strbac, 2002). Algunos trabajos de investigación concluyen que el acto de escuchar música es capaz de distraer y deteriorar las prestaciones, como la comprensión de textos (Etaugh & Michals, 1975).

Sin embargo, escuchar música curiosamente puede facilitar actividades que requieren niveles de atención y concentración elevados, ya que pueden camuflar sonidos que generan distracción. Es el caso de los estudiantes que llevan a cabo una tarea que requiere concentración, como el estudio, mientras escuchan música. Es una situación que para los padres parece una contradicción.

La cuestión básica es el grado de atención que requiere la tarea que queremos hacer. Leer un periódico o una revista no requiere el mismo grado de atención que estudiar unos conceptos. Si la tarea requiere nuestra máxima atención, la música queda en un segundo plano y realmente no se escucha cuando estamos absortos en nuestro trabajo. Hay algunas tareas más mecánicas o repetitivas que no requieren toda nuestra atención y en estos casos, la música puede alterar nuestro grado de concentración.

#### **5.1.3.1. Influencia del sonido en la conducción de vehículos**

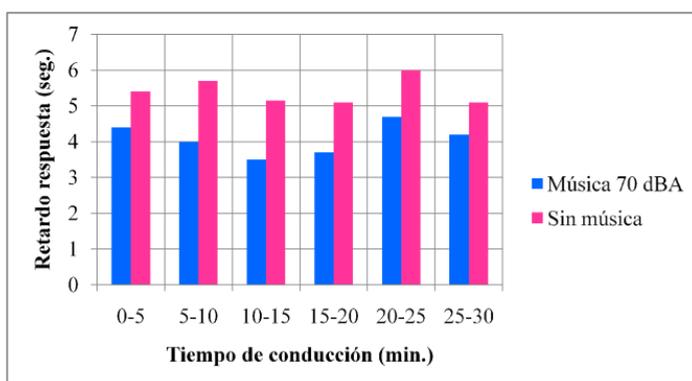
Uno de los estudios pioneros desarrollados por Brown (Brown I. , 1965) analizó los efectos de la música de fondo, el habla y el silencio durante el tráfico ligero y pesado. El estudio concluyó que la música podría reducir el estrés durante la conducción, disminuyendo la excitación emocional en circunstancias frustrantes, como el tráfico denso y congestionado. Se apuntó que escuchar música podía incluso tener un ligero efecto beneficioso sobre la actividad de control de un vehículo. Sin embargo, los primeros estudios encontraron difícil distinguir si la música de fondo demostraba un efecto positivo o negativo en el rendimiento de la conducción (Button, Behm, Holmes, & Mackinnon, 2004).

Algunos conductores manifiestan que escuchan música para pasar el tiempo o sentir compañía. Probablemente, la causa sea que en determinadas situaciones, y debido a la falta de estímulos externos, la conducción es muy monótona. Diversas investigaciones sugieren que los aumentos en la excitación mejorarían particularmente realizando tareas fáciles y menos en tareas difíciles. Por ejemplo, en tareas difíciles y complejas, un estímulo excitante adicional como un sonido fuerte podría aumentar la carga de trabajo mental por encima del nivel ideal, compitiendo así por la capacidad cognitiva necesaria para el desempeño de la tarea primaria (Beh H.C., 1999).

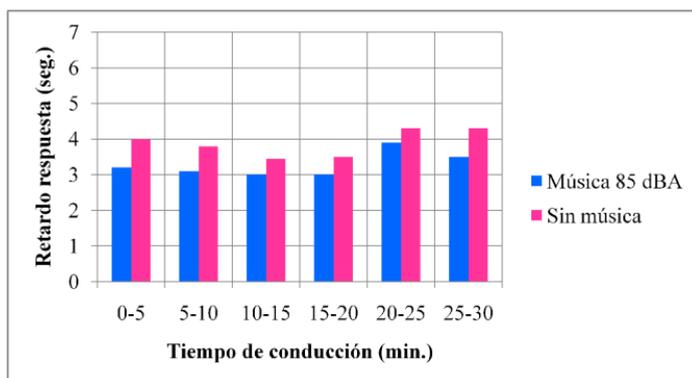
Curiosamente, para las tareas monótonas se puede esperar un aumento en el esfuerzo mental cuando el nivel de excitación está por debajo del ideal y cuando el conductor está bajo los efectos de la fatiga o el aburrimiento (Warm J.S., 2008). Este tipo de esfuerzo que se moviliza como consecuencia de la monotonía se denomina *esfuerzo relacionado con el estado* o *esfuerzo compensatorio* (De Waard D, 1997), lo que significa que los conductores tienden a invertir más esfuerzo en la tarea de conducción para mantener la concentración, a pesar de estar aburrido o fatigado. Según este razonamiento, asumimos que en tareas muy monótonas los aumentos en la excitación pueden conducir a una disminución del esfuerzo mental requerido para combatir el aburrimiento o la fatiga, lo que puede aumentar el grado de atención.

De acuerdo con estos argumentos, cabe preguntarse: ¿puede la música proporcionar a los conductores los niveles de excitación necesarios para realizar tareas de conducción aburridas y monótonas?

Para dar respuesta a esta cuestión, se llevó a cabo una prueba con dos grupos de personas jóvenes. Esta consistía en seguir un vehículo en un simulador, intentando en todo momento mantener la distancia de seguridad. Las pruebas se hicieron sin música y con música. Para evitar la influencia de las preferencias sonoras, cada participante pudo prepararse su propia lista musical. El primer grupo de personas escuchaba música con un nivel de 70 dBA, mientras que el segundo grupo lo hizo con un nivel de 85 dBA. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.1 y 5.2. La figura 5.1 muestra claramente una disminución en el tiempo de respuesta para seguir al vehículo de delante, cuando el conductor escucha música con un nivel de 70 dBA, respecto a la conducción sin música. En la figura 5.2 se muestran los resultados para el segundo grupo, con un nivel de música de 85 dBA.



**Figura 5.1.** Variación del retardo en la respuesta, sin y con música a 70 dBA (Ünal, de Waard, Epstude, & Steg, 2013).



**Figura 5.2.** Variación del retardo en la respuesta, sin y con música a 85 dBA (Ünal, de Waard, Epstude, & Steg, 2013).

Para el segundo grupo se observa la misma tendencia. Escuchar música reduce el tiempo de respuesta. Las mejoras no son tan grandes, lo cual puede ser debido a que los grupos son distintos y presentan distinto tiempo de reacción en las pruebas sin música.

Este hallazgo está en consonancia con estudios anteriores y demuestra que, en situaciones de conducción monótona, los conductores pueden seguir conduciendo con precisión y realizar una tarea secundaria (en este caso, escuchar música) sin que por ello se vea afectada la capacidad de conducción. Por otro lado, los hallazgos sobre el retraso en las respuestas a los cambios de velocidad del vehículo revelaron que escuchar música incluso mejoró este aspecto de la conducción, independientemente del nivel de volumen. De manera más específica, los conductores respondieron a los cambios de velocidad más rápidamente cuando escuchaban música en comparación con cuando no lo hacían, y este patrón fue constante a lo largo del tiempo.

La escucha *per se* es inocua para cualquier tipología de música y de nivel sonoro, si bien hay que tener en cuenta que, con elevados niveles sonoros, el campo visual se estrecha. Sin embargo, la escucha de la música es una tarea que requiere un grado de atención que depende de la actitud de la persona. Una actitud pasiva, donde simplemente se escucha la música, que nos acompaña y esta queda en un segundo plano, no requiere atención por parte del cerebro. Sin embargo, una escucha activa (cantando la letra de la canción, por ejemplo) sí que requiere una mayor atención y esfuerzo para recordar la letra y seguir el ritmo musical. Este esfuerzo extra merma la capacidad de atención de nuestro cerebro, propiciando una conducción más superficial, donde un imprevisto puede acabar en accidente. La conducción superficial se produce en aquellos itinerarios (generalmente, cortos) que el conductor ha realizado muchas veces, o en los largos viajes por autopistas con centenares de kilómetros recorridos. Los efectos de escuchar música sobre el rendimiento de conducción se pueden clasificar generalmente en dos tipos: distracción y excitación.

#### 5.1.3.1.1. Efecto de distracción

La distracción se refiere al desvío de la atención del conductor de la tarea de conducir, que es un proceso complejo que requiere un alto nivel de habilidades cognitivas, sensoriales y locomotoras. Al ser un estímulo competitivo para el conductor, la escucha de música en el vehículo podría aumentar la carga de trabajo mental del conductor y por tanto, afectar al rendimiento de la conducción. De hecho, conducir y escuchar música compiten por la limitada capacidad cognitiva del conductor (Ünal, de Waard, Epstude, & Steg, 2013). En condiciones ambientales y de tráfico adversas, como terreno montañoso y condiciones de poca visibilidad, la escucha de música podría aumentar notablemente la carga de trabajo mental del conductor y la discapacidad en la conducción podría magnificarse (Strayer & Johnston, 2001).

#### 5.1.3.1.2. Efecto de excitación

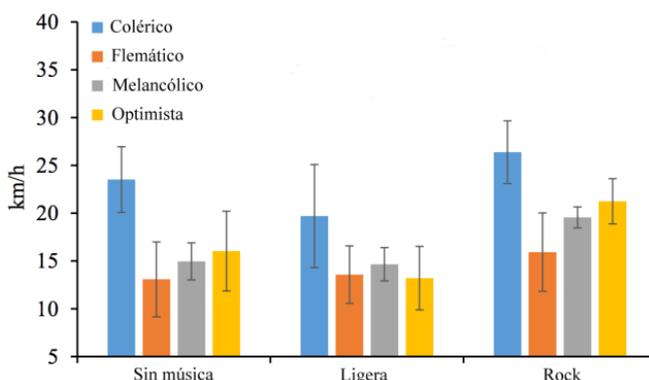
La excitación se refiere al nivel de alerta del conductor. Los niveles de excitación pueden variar desde dormidos hasta muy enérgicos. Escuchar música en el vehículo posiblemente podría aumentar el grado de excitación de un conductor. Tanto el rendimiento de conducción como el rendimiento fisiológico del conductor se pueden mejorar escuchando música. En particular, escuchar música durante la conducción fue eficaz para aliviar el estrés, calmar las emociones y evitar la somnolencia del conductor. Algunos estudios indican que el riesgo de colisión al conducir y escuchar música era menor que conducir sin escuchar música. Sin embargo, el grado de reducción del riesgo de accidentes puede variar según el escenario de conducción y las condiciones del tráfico.

#### 5.1.3.1.3. Influencia del carácter de la persona

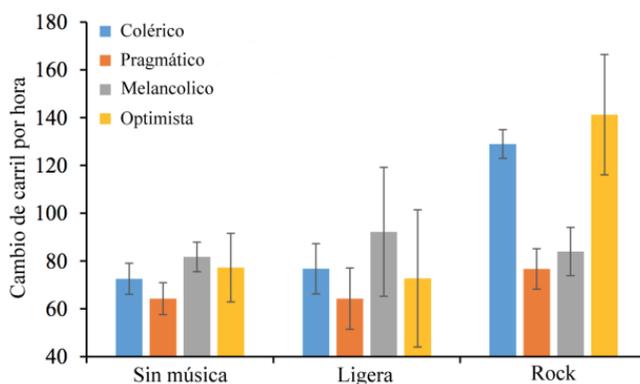
El carácter del conductor puede alterar el rendimiento de la conducción mientras escucha música. Hay cuatro tipos principales de temperamento en humanos: colérico, optimista, flemático y melancólico. En particular, los conductores coléricos tienden a ser más agresivos y tienen una mayor propensión a cometer infracciones de tráfico, como exceso de velocidad y adelantamientos peligrosos. Los tiempos de respuesta de los conductores optimistas en una emergencia son bajos. Sin embargo, los conductores optimistas tienden a ser menos pacientes, sobre todo en condiciones de tráfico y entornos viales monótonos, y es más probable que se distraigan con otras tareas secundarias (por ejemplo, hablar con los pasajeros). Los conductores flemáticos tienden a ser más obedientes a las normas de tráfico, pero tienen tiempos de reacción más largos en caso de emergencia. Por el contrario, los conductores melancólicos tienden a ser reacios al riesgo (Xiao, Qin, Wang, & Hai-Qiong, 2014). Por tanto, se cree que el efecto de heterogeneidad influye en la asociación entre la escucha de música, la excitación, la emoción y el rendimiento y la distracción de la conducción debido a la intervención del temperamento del conductor.

El tipo de música escuchada y el carácter de la persona influyen en la capacidad de reacción y en la conducción de un vehículo (Huiying Wen, 2019). La figura 5.3 muestra la desviación típica de la velocidad del vehículo en función del tipo de música escuchada y el carácter del conductor. Se consideran dos tipologías de música: ligera y *rock*. Se puede observar que la música ligera presenta una menor desviación respecto a la velocidad límite para el carácter colérico y el optimista, mientras que la música *rock* supone un claro incremento de la desviación del límite de velocidad para todos los tipos de carácter del conductor.

Se observan pocas diferencias en la frecuencia de cambio de carril (figura 5.4) entre la conducción sin música y con música ligera o *rock* para todas las tipologías de carácter del conductor. Sin embargo, se observa un incremento apreciable en algunas tipologías, como colérico y optimista, al escuchar música *rock*.



**Figura 5.3.** Variación de la velocidad del vehículo en función de la música y el carácter del conductor (Xiao, Qin, Wang, & Hai-Qiong, 2014).



**Figura 5.4.** Frecuencia del cambio de carril en función de la música y el carácter del conductor (Xiao, Qin, Wang, & Hai-Qiong, 2014).

La conclusión de este estudio es que la música *rock* en general, altera a la precisión de la conducción, propiciando una tendencia a circular a mayor velocidad y con cambios de carril más frecuentes, es decir una conducción más agresiva.

#### 5.1.3.1.4. Sistemas ADAS y ATIS de asistencia al conductor

La conducción de los vehículos se ha mejorado notablemente en las últimas décadas. Se observa que hay una clara tendencia hacia un mayor control electrónico de las funciones vitales del vehículo, que aseguran una maniobrabilidad y seguridad en la

conducción. Son sistemas que evitan que los neumáticos se deslicen, tanto en aceleración como en frenada; avisos de cambio de carril involuntario; aviso de somnolencia del conductor, etc.

Con el desarrollo de la tecnología de conducción automatizada, y en particular los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), el diseño de interacción hombre-máquina con el sistema de información en el vehículo ha evolucionado de lo que solía ser en décadas anteriores (K. Bengler, 2014). Desde el punto de vista del diseño, los primeros ADAS se centraban principalmente en las advertencias, con el objetivo de presentar solo la información más crítica. Esa información generalmente se comunica de manera clara para respaldar la toma rápida de decisiones a nivel operativo en una situación de emergencia.

A medida que la tecnología va evolucionando, la función principal de ADAS está cambiando gradualmente, pasando de alertar a los conductores a apoyarlos con información situacional para que el conductor pueda tomar una decisión y de esta manera, evitar situaciones de riesgo o límite. En este sentido, se pasa de los sistemas ADAS a los Sistemas de Asesoramiento de la Información de Tráfico (ATIS). Dichos sistemas apoyan la toma de decisiones en una etapa anterior (es decir, en el nivel táctico), en comparación con el nivel operativo (respuesta inmediata a la situación crítica). Por tanto, un ATIS proporciona información anticipada y por tanto, da a los conductores el tiempo suficiente para tomar una decisión antes de llevar a cabo cualquier maniobra.

Uno de los ejemplos industriales actuales es el autopiloto de Tesla: proporciona continuamente información sobre la ubicación del resto de usuarios de la carretera circundante en relación con el automóvil para ayudar a los conductores a tener un modelo mental de lo que este ve. Es un ejemplo típico para proporcionar información situacional que apoye la toma de decisiones del conductor en situaciones de toma de control ante un peligro inminente. El sistema ATIS trata de proporcionar la información necesaria para actuar con rapidez antes de llegar a la situación crítica.

Se han llevado a cabo muchos estudios para explorar cómo diseñar varios sistemas informativos utilizando sonidos, luces o pantallas visuales como portadores de la información. Con respecto a la información auditiva, investigaciones recientes muestran que este tipo de información puede mejorar la seguridad de la conducción, acortar los tiempos de respuesta y mejorar la precisión de las maniobras. Los estudios indican que las señales acústicas pueden captar la atención al proporcionar señales muy poderosas al sistema de percepción humano (Fabrizio, Romei, Freeman, Lavadas, & Driver, 2011).

Se han llevado a cabo estudios de simulación de conducción en los que se comparan cinco métodos de retroalimentación auditiva en escenarios de conducción autónoma y manual. Los resultados muestran que el método de presentación auditiva espacial es

superior a otros métodos de presentación de la información. Además, los conductores se sienten significativamente más seguros con la presencia de avisos sonoros que en ausencia de estos (Beattie, Baillie, Halvey, & McCall, 2014).

La parte acústica de los sistemas ATIS avanzados utilizan sonido 3D para posicionar la procedencia o la ubicación de otros vehículos cercanos al propio. Esta señal sonora se desplaza acústicamente siguiendo los movimientos del vehículo cercano. Esta técnica acústica de sonido 3D complementa al sentido de la visión y permite facilitar la toma de decisiones por parte del conductor sin necesidad de quitar la vista de la circulación.

Las pruebas efectuadas en cuanto a la precisión en la circulación en tres situaciones de riesgo, como las mostradas en la figura 5.5, indican que la información sonora recibida por el conductor mejora el grado de precisión de la conducción y en consecuencia, se mejora su seguridad (Wang, Liao, Lundgren, & Chen, 2020).



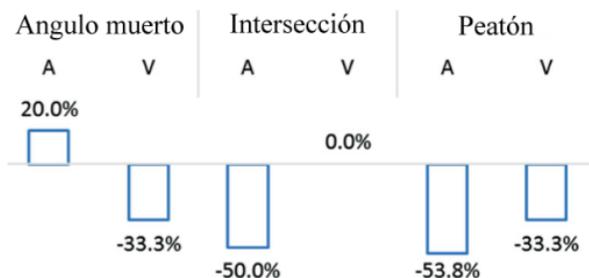
**Figura 5.5.** Escenarios con situación de riesgo potencial de colisión, para el vehículo *a*, con otros vehículos o con peatones (Wang, Liao, Lundgren, & Chen, 2020).

El primer escenario (ángulo muerto) recoge la situación en que se produce un cambio repentino de carril del vehículo *b*, justo en el momento en que el vehículo *c* queda en el ángulo muerto del vehículo *a*. Esta situación puede tener asociado un frenado del vehículo *b*, por lo que el vehículo *a* cambiará de carril para evitar la colisión sin ver al vehículo *c*.

El segundo escenario recoge el cruce simultáneo de dos peatones por un paso habilitado a ambos lados de la calle y que van a distintas velocidades.

El tercer escenario representa la situación en que un peatón parcialmente tapado por vehículos estacionados al lado derecho cruza inadvertidamente la calle por un punto no autorizado.

La figura 5.6 muestra las mejoras en el porcentaje del número de colisiones aplicando la técnica ATIS con avisos sonoros y visuales.



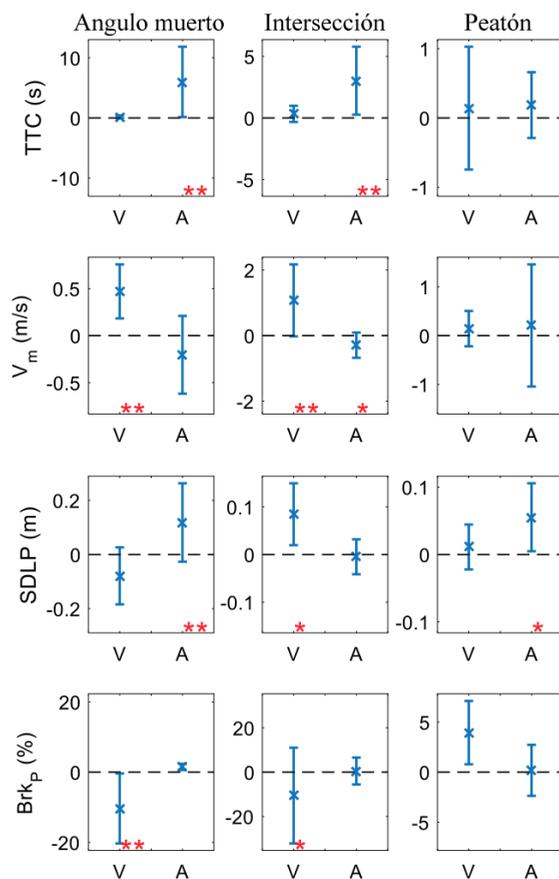
**Figura 5.6.** Variación del porcentaje del número de colisiones (Wang, Liao, Lundgren, & Chen, 2020).

Como muestra la figura, en el escenario del ángulo muerto, la información visual reduce en un 33,3% el número de colisiones, mientras que la información sonora parece que incrementa en un 20% el número de colisiones. En contrapartida, tanto en el escenario de intersección como de peatón, la información sonora reduce en un 50% y un 53,8%, respectivamente, el número de colisiones. Es bastante significativo que, para el escenario de intersección, la información visual no aporta ninguna mejora.

La figura 5.7 muestra los resultados obtenidos en las distintas pruebas.

En el escenario del ángulo muerto, las señales de aviso visual disminuyen el porcentaje de tiempo de frenado (BrkP) y, en consecuencia, aumenta la velocidad promedio durante todo el evento ( $V_m$ ). Al mismo tiempo, no hay cambios significativos en la rapidez con la que reacciona el conductor (TTC) o el rendimiento de mantenimiento de carril (SDLP). Esto implica que el ATIS visual ayuda a los conductores a conducir de forma más estable. Curiosamente, las reacciones a las señales sonoras son opuestas en el escenario de ángulo muerto. Los conductores reaccionan mucho más rápido (TTC), pero, al mismo tiempo, su rendimiento de control lateral disminuye (SDLP) es decir, conducen de una manera más abrupta. En resumen, el ATIS auditivo sirve mejor para involucrar a los participantes en una respuesta inmediata en comparación con el ATIS visual.

En el escenario de intersección, al igual que en ángulo muerto, las señales visuales ayudan a los conductores a mejorar significativamente su eficiencia de conducción desde el punto de vista de mayor velocidad media ( $V_m$ ) y menos distancia de frenado (BrkP). Sin embargo, el control lateral disminuye al mismo tiempo (SDLP), lo cual es un efecto no deseado. Por otra parte, las señales sonoras propician una reacción más rápida (aumento de TTC) y un mayor rendimiento de control lateral (SDLP). Significa que el ATIS auditivo hace que todo el evento de conducción sea más seguro y conservador.



**Figura 5.7.** Influencia de las señales de aviso acústicas (A) y visuales (V) (ATIS) para distintos escenarios (Wang, Liao, Lundgren, & Chen, 2020).

En el escenario de peatón, no se puede encontrar ningún efecto significativo de las señales visuales. En cuanto a las señales sonoras, el control lateral aumentó significativamente (SDLP). En esta situación particular, eso puede considerarse beneficioso, ya que tenemos un peatón saliendo de un lugar tapado parcialmente entre dos vehículos y la forma más eficiente de evitar una colisión es alejarse. Quizá se deba a esta rápida reacción que el ATIS auditivo redujo el número de colisiones en este escenario en particular.

La información visual es ideal para mostrar lo que acontece cerca del vehículo. Sin embargo, esta información debe agregarse a la visual de la conducción, que cuando se circula en entornos no familiares o con condiciones climatológicas adversas se encuentra muy sobrecargada.

Por el contrario, la información sonora llama mucho más la atención, lo que resulta útil si los otros usuarios de la carretera implicados están tapados detrás de otros vehículos o en puntos ciegos. En una situación extremadamente compleja, los sonidos también se pueden utilizar para llamar la atención sobre el peligro más inmediato.

Por otro lado, hoy en día sabemos poco sobre el diseño de los sonidos informativos perfectos. Obviamente, no deben quedar enmascarados por el lenguaje o la música en el interior del automóvil, pero tampoco deben ser demasiado ruidosos o molestos. La semiótica de estos sonidos debe ser clara e inconfundible por parte de la mayoría de la población. Es probable que estos sonidos requieran una fase de aprendizaje y habituación por parte del usuario para obtener el mejor rendimiento. Lo peor que puede pasar con los sistemas como el ATIS es que el conductor oiga sonidos y no sepa interpretar su significado.

#### *5.1.3.1.5. Influencia de la música en la conducción*

La música reproducida con un nivel bastante moderado (55 dBA) proporciona una condición de conducción óptima en comparación con el silencio y la música reproducida a 85 dBA (Spinney, 1997). Además, los conductores mejoran su conciencia y rendimiento cuando se exponen a música que se encuentra en un intervalo de su propio nivel de comodidad subjetivo (Turner, Fernandez, & Nelson, 1996). Este nivel sonoro lo selecciona el conductor en función de su estado de ánimo, del tipo de música que desea escuchar y de la velocidad media de la circulación y del tipo de ruta.

#### *5.1.3.2. Influencia del uso del teléfono móvil en la conducción*

La distracción en la conducción es un importante factor de riesgo de traumatismo por accidente de tránsito. Existen distintos tipos de distracciones; por lo general, estas se dividen en distracciones que tienen su origen dentro del vehículo (como, por ejemplo, sintonizar la radio o utilizar el teléfono móvil) y distracciones externas al vehículo (como mirar las vallas publicitarias o a la gente que va por la calle). Se entiende por distracción el desvío de la atención de todas aquellas actividades esenciales para una conducción segura hacia otra actividad diferente (OMS, 2011).

El teléfono móvil distrae a los conductores de dos formas: provoca distracción física y distracción cognitiva. La distracción física ocurre cuando los conductores tienen que coger su teléfono móvil (es decir, alcanzar, marcar, sostener) y al mismo tiempo conducir su vehículo. La distracción cognitiva ocurre cuando un conductor tiene que desviar parte de su atención de conducir a la conversación telefónica. Sin embargo, la capacidad de dividir la atención entre dos tareas simultáneas es limitada. Los teléfonos móviles pueden distraer al conductor de varias formas:

- Físicamente: en lugar de centrarse en las tareas físicas que requiere la conducción (dirección, cambio de marcha, intermitente, etc.), los conductores tienen que utilizar una o ambas manos para manipular el teléfono.
- Visualmente: los teléfonos móviles pueden distraer visualmente a los conductores de dos formas:
  - En primer lugar, los conductores deben apartar la vista de la carretera y centrarse en el teléfono móvil para poder utilizarlo.
  - En segundo lugar, mientras habla por teléfono móvil, incluso si los ojos de los conductores están enfocados en la carretera, literalmente «miran, pero no ven».
- Auditivamente: el foco de atención del conductor pasa del entorno de la circulación a los sonidos del teléfono móvil y la conversación. Esto se aplica especialmente cuando la conversación es trascendente.
- Cognitivamente: en lugar de centrar su atención y sus pensamientos en la conducción, los conductores desvían su atención y se centran en el tema de la conversación telefónica (Dragutinovic, 2005).

El uso del teléfono móvil disminuye el tiempo de reacción a un estímulo de frenado (Consiglio, Driscoll, Witte, & Berg, 2003), aumenta el riesgo de choque (Hunton & Rose, 2005) y distrae a los conductores de realizar maniobras críticas (Hancock, Lesch, & Simmons, 2003). Además, los tiempos de reacción retardados durante la conducción aumentan la gravedad del impacto en caso de colisión. El efecto del uso del teléfono móvil puede ser más crítico que simplemente escuchar un volumen alto de ruido o música, ya que se considera que hay un procesamiento más importante que requiere de mayor atención del cerebro, en detrimento de la atención a la conducción. El acto de conversar interfiere con el tiempo de reacción.

Probablemente, el estudio epidemiológico más famoso y citado con mayor frecuencia sobre los riesgos del uso de teléfonos móviles mientras se conduce es el estudio de Redelmeier y Tibshirani (Redelmeier, 1997). Los investigadores encontraron que el riesgo de colisión cuando se usaba un teléfono móvil era cuatro veces mayor que el riesgo cuando no se usaba un teléfono móvil. Los resultados del estudio también sugirieron que los sistemas «manos libres» no ofrecían ninguna ventaja de seguridad sobre las unidades portátiles. Se lograron hallazgos similares en otros estudios epidemiológicos (Laberge-Nadau, 2003).

Mantener una conversación por parte del conductor de un vehículo realizada en persona o por teléfono móvil supone un grave riesgo de distracción que provoca tiempos de reacción más lentos (Consiglio, Driscoll, Witte, & Berg, 2003). Nótese que los pilotos profesionales no escuchan música durante la competición. Puntualmente, pueden recibir indicaciones o explicar algún incidente a *boxes* cuando pilotan sus vehículos.

El sonido puede alterar la conducta y el grado de atención, lo que en determinadas circunstancias puede llegar a ser muy peligroso. Un ejemplo lo tenemos en la conducción de un vehículo automóvil. Mantener una conversación con los pasajeros mientras se conduce se podría considerar inocuo para la seguridad vial, pero realmente encierra un gran peligro.

Cuando las conversaciones son importantes o en una lengua que no es familiar, se tiene que hacer un esfuerzo extra para estar atento y no perder ninguna palabra, lo cual requiere una mayor concentración por parte del individuo. Esta mayor concentración implica, por lo general, desatender otras funciones (visión, manipulación, etc.). Para una conversación importante, el grado de atención emocional puede mermar notablemente el grado de atención en la conducción. Por otro lado, en una conversación en una lengua no familiar se suelen «perder» algunas palabras que no son entendidas con claridad y el cerebro no puede suplir esta carencia, ya que está «traduciendo» otras palabras. Entonces, sucede que fácilmente dejamos de entender parte de la frase y, lo más importante, con la concentración y el esfuerzo realizado, literalmente «no vemos» lo que tenemos delante.

Cuando escuchamos una conversación en una lengua nativa no precisamos de tanta atención, ya que el dominio de la lengua nos permite entender al interlocutor a pesar de haber perdido alguna palabra. Sin embargo, esto no significa que no sea peligroso. Cuando la conversación, a pesar de ser en nuestra lengua familiar, es trascendente o importante, nuestra atención se centra en la conversación y no en otras acciones. Eso nos impide llevar a cabo una tarea delicada, como conducir un vehículo, en óptimas condiciones de seguridad. En ocasiones, el conductor expresa coloquialmente un «¡cállense, que no veo!», en el sentido de que la conversación no deja al conductor del vehículo concentrarse en la tarea que está realizando en ese momento y que requiere de su máxima atención.

El cerebro humano no puede atender a dos cosas de forma simultánea que precisen de la máxima atención. En otras palabras, cuando estamos inmersos en una conversación importante y realizando otra tarea (conducir), nuestro cerebro precisa de más potencia de cálculo para descifrar la conversación, pensar en lo que se va a contestar y probablemente reconstruir las partes perdidas de la conversación, y desatiende por el momento otras funciones para disponer de mayor capacidad, igual a como lo hace un ordenador con un solo procesador. Esto ocurre en todas las conversaciones, ya sean telemáticas o presenciales con los pasajeros. Cualquier conversación que sea importante va a alterar el grado de atención del conductor en la conducción. Por este motivo, conducir y hablar al mismo tiempo es peligroso. El llamado «manos libres», que evita coger físicamente el teléfono móvil, no rebaja en absoluto el grado de distracción del conductor, que es exactamente el mismo y por tanto, el riesgo de accidente es idéntico.

#### *5.1.3.2.1. Acciones para evitar el uso de dispositivos móviles durante la conducción*

Los Países Bajos han comenzado a imponer multas tras la detección del uso de teléfonos móviles por una nueva generación de cámaras, es el primer Estado miembro de la Unión Europea en hacerlo. Desde noviembre de 2020, los conductores con un teléfono al volante pueden ser fotografiados con cámaras inteligentes. Si el sistema determina que el conductor tiene un teléfono en la mano, la foto se envía automáticamente a la agencia correspondiente, donde un oficial de investigación determinará si realmente existe una infracción. Las multas se pueden enviar automáticamente. Las cámaras toman fotografías de cada transeúnte. Pero la cabeza del conductor no está en la imagen porque las imágenes se toman en diagonal hacia abajo. El sistema captura las manos y la matrícula del conductor, y en todas las condiciones climáticas. Durante una fase de prueba, se registraron muchas infracciones: con dos cámaras en una carretera nacional y una autopista se registraron 400 conductores con un teléfono en la mano durante un período de seis horas.

La organización holandesa de investigación de seguridad vial SWOV ha publicado recientemente nuevas recomendaciones sobre la aplicación del uso de dispositivos móviles y advierte sobre los conductores que eluden la detección colocando el teléfono en su regazo o se distraen con los dispositivos de otras formas.

El gobierno del Reino Unido ha cambiado la ley en 2021 para garantizar que todo uso de un teléfono móvil mientras se conduce esté prohibido. Según la ley actual, está prohibido hacer llamadas telefónicas y enviar mensajes de texto mientras se sostiene un teléfono, pero muchas de las otras funciones que se llevan a cabo en los teléfonos inteligentes modernos no lo están. El nuevo cambio legal aún permitirá el uso de teléfonos con manos libres. Las investigaciones han demostrado que el uso de teléfonos con manos libres puede distraer tanto como usarlos en la mano, por lo que no está claro qué diferencia hará el cambio legislativo en las estadísticas de accidentes.

#### **5.1.4. Percepción musical**

La música forma parte de la cultura humana desde las primeras civilizaciones. Es una forma de expresar sentimientos y transmitir ideas y pensamientos a quienes oyen las notas musicales. Hay músicas que nos producen sensación de alegría, de excitación. Otras expresiones musicales pueden trasladarnos hacia sensaciones de languidez, de tristeza o de temor. No es solo una cuestión de notas, sino de cómo se interpretan (expresión musical) y del instrumento utilizado. Al pensar en cómo la evolución puede haber dado forma específica al sistema auditivo humano, debemos considerar que lo más característico es que los humanos usan el sonido para comunicar sensaciones cognitivas y estados internos, incluida la emoción. Tanto el habla como la música pueden considerarse de

esta manera y se podría llegar a decir que constituyen señales específicas de la especie. Una propiedad importante tanto del habla como de la música es que aparecen en la gran mayoría de los miembros de la especie bastante pronto en el desarrollo, siguiendo una secuencia relativamente fija y tomando como entrada sonidos del entorno inmediato. Por tanto, debe existir una arquitectura neuronal que permita que surjan estas capacidades.

Para poder concatenar eventos auditivos discretos de modo que el significado pueda codificarse o decodificarse, se requiere un sistema de memoria de trabajo que pueda mantener la información dinámicamente para su posterior procesamiento. Aquí puede residir una importante diferencia entre especies: los monos parecen tener una capacidad muy limitada para retener eventos auditivos en la memoria de trabajo en comparación con su excelente memoria de trabajo visual (Fritz, Mishkin, & Saunders, 2005). En cambio, los humanos tienen una excelente capacidad para mantener la información auditiva a medida que llega, lo que explica nuestra capacidad para relacionar un sonido con otro que se produjo muchos segundos o minutos antes (por ejemplo, una oración larga cuyo significado no es claro hasta la última palabra).

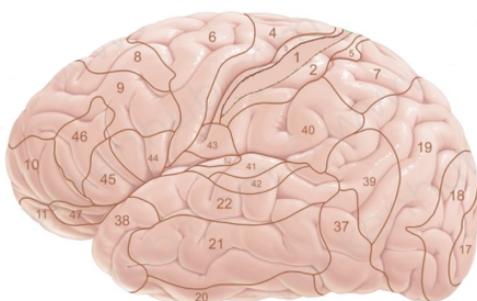
Tanto el habla como la música hacen uso de la variación del tono; pero su uso en la música parece tener algunas propiedades particulares que lo distinguen de su uso en el habla (Zatorre & Baum, 2012). En particular el tono, tal como se usa en la música en muchas culturas, tiende a organizarse como elementos discretos o escalas, a diferencia del habla, donde los cambios de tono tienden a ser continuos. Por tanto, la música requiere un sistema nervioso capaz de codificar y producir variaciones de tono con un alto grado de precisión.

Solo los humanos aprenden a tocar instrumentos musicales y solo los humanos tocan instrumentos en forma cooperativa en grupos. Algunos asumen que las habilidades musicales humanas desempeñaron un papel filogenético clave en la evolución del lenguaje y que el comportamiento de hacer música involucró y promovió funciones sociales evolutivamente importantes (como la comunicación, la cooperación y la cohesión social) (Wallin, Merker, & Brown, 2000). Tanto la música como el habla utilizan señales con contenido tonal; sin embargo, el procesamiento en el sentido auditivo es distinto. Comparando las informaciones musicales con las del habla en términos acústicos, no hay diferencia entre un fonema (mínima unidad de información del habla) y la calidad de un sonido musical. Ambos se caracterizan por dos parámetros físicos: el contenido espectral por bandas, que representan las diferencias de las amplitudes relativas de los distintos armónicos individuales (croma tonal), y la envolvente de amplitud de la onda sonora, es decir, la forma en que el nivel de un sonido va cambiando con el tiempo (nivel sonoro).

La percepción musical comienza con la decodificación de la información acústica. La información acústica se traduce en actividad neuronal en la cóclea y se transforma progresivamente en el tronco encefálico auditivo, como lo indican las diferentes propie-

dades de respuesta neuronal para la periodicidad de los sonidos, el timbre, incluida la rugosidad o la consonancia/disonancia, la intensidad del sonido, y disparidades interaurales en el complejo olivar superior (Geiler, 1998) (Langner & Ochse, 2006). El córtex auditivo primario (CAP) está involucrado en la transformación de características acústicas (como información de frecuencia) en percepciones como el croma y la altura tonales. El córtex auditivo (CA) desempeña un papel más destacado que la membrana basilar en la transformación de las características acústicas de un sonido en percepciones auditivas, como la transformación de información sobre las frecuencias de un sonido complejo, así como sobre la periodicidad de un sonido, en una percepción tonal (Zatorre R. , 1988).

Además, con respecto a las conocidas diferencias funcionales entre el hemisferio izquierdo y derecho del cerebro, varios estudios sugieren que el CA izquierdo tiene una mayor resolución de información temporal que el CA derecho y que el CA derecho tiene una mayor resolución espectral que el CA izquierdo (Zatorre, Belin, & Penhune, 2002) (Perani, y otros, 2010). El CA permite obtener información conceptual del sonido, con expresiones como ciertos aspectos cualitativos como: suave, rugoso, brillante, etc. El cerebro se divide en 47 zonas según Korbinian Brodmann, como muestra la figura 5.8. Cada área está especializada en el reconocimiento de determinadas funciones.



**Figura 5.8.** Áreas de la corteza cerebral según K. Brodmann.

Estas áreas son las que aparecen referenciadas en la figura 5.9, que muestra el proceso temporal de extracción de la información del sonido, los llamados objetos sonoros (Griffiths & Warren, 2004) (Nudds, 2010).

La figura 5.9 debe interpretarse desde la izquierda, por donde llega la información sonora de la cóclea, hacia la derecha. El primer bloque extrae la información más básica, con una latencia entre 1,5 y 10 ms. Sin embargo, no produce significado. El significado de los sonidos se puede obtener con un único tono corto, que puede sonar por ejemplo, «brillante», «áspero» o «aburrido». Esto se simboliza en la figura 5.9 con la conexión entre la extracción de características II y el «significado». Los dos primeros módulos de extracción de

características presentan una latencia temporal. A medida que avanzamos hacia la derecha, la complejidad del proceso de identificación y asimilación del sonido se hace cada vez más complejo. El tercer bloque permite tener información sobre los acordes, la melodía y los intervalos de tiempo, con una latencia de 100-200 ms. A un nivel de complejidad superior, llegamos al bloque de construcción de estructuras, donde se obtiene la armonía, el ritmo y el timbre, con una latencia entre 180 y 400 ms. Después de una anomalía sintáctica, o una estructura sintáctica inesperada, aparecen los procesos de re-análisis y reparación estructural, con una latencia entre 600 y 900 ms, aunque esta latencia suele ser menor para personas con formación musical, probablemente porque los músicos están familiarizados con las estructuras musicales. Por último, aparece el mecanismo que vitaliza el sistema nervioso autónomo. Estas reacciones pueden desencadenar un estado de ánimo (felicidad, alegría, etc.) y reacciones físicas de movilidad (relajación, tensión muscular, etc.). El sentimiento subjetivo requiere conocimiento consciente y por tanto, presumiblemente implica a diversas zonas del cerebro. Este proceso de vitalización, a su vez, puede influir en los procesos dentro del sistema inmunitario. Curiosamente, se ha sugerido que los efectos sobre el sistema inmunitario están relacionados con la actividad motora, como cantar o bailar (Kreutz, Bongard, Rohrman, Hodapp, & Grebe, 2005) (Quiroga, Bongard, & Kreutz, 2009).

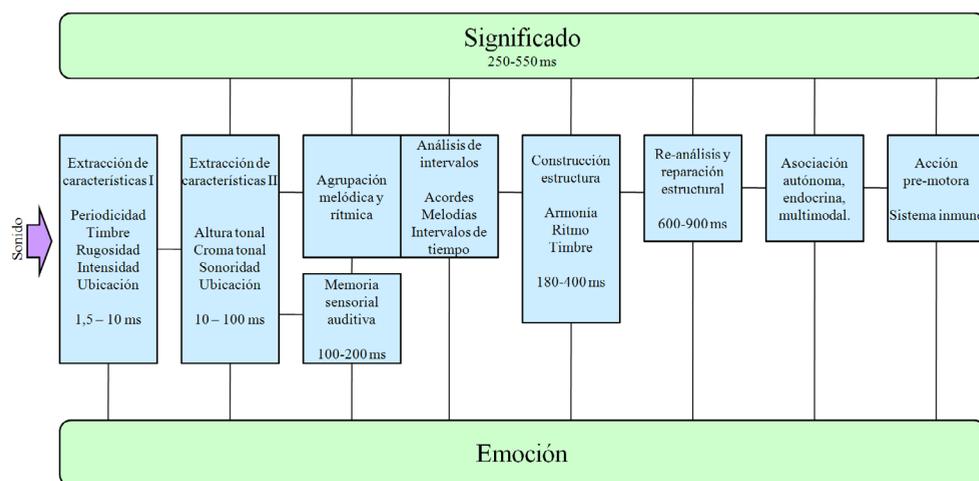


Figura 5.9. Modelo neurocognitivo de la percepción musical.

#### 5.1.4.1. Reacción del cuerpo humano a la música

El tipo de música, el momento y estado de ánimo de la persona pueden desencadenar reacciones sobre la llamada «vitalidad» corporal. La vitalización implica la actividad del sistema nervioso autónomo (es decir, la regulación de la actividad simpática y para-

simpática), junto con la integración cognitiva de la información musical y no musical. La información no musical comprende asociaciones evocadas por la música, así como reacciones emocionales (alegría, felicidad) y corporales (tenso o relajado).

Los efectos de la percepción de la música en la actividad del sistema nervioso autónomo se han investigado principalmente midiendo la actividad electro dérmica y la frecuencia cardíaca, así como el número y la intensidad de los «estremecimientos» y «escalofríos» (Orini, Bailón, Enk, Koelsch, Mainardi, & Laguna, 2010). La inducción al movimiento por la percepción de la música en la forma de bailar, cantar, zapatear, saltar, balancearse, asentir con la cabeza, etc., es una experiencia muy común (Panksepp & Bernatzky, 2002). Estos movimientos también cumplen funciones sociales, porque los movimientos sincronizados de diferentes individuos representan una actividad social coordinada. En particular, los humanos tienen la necesidad de participar en actividades sociales. Los efectos emocionales de dicho compromiso incluyen diversión, alegría y felicidad, mientras que la exclusión de este compromiso representa un factor de estrés emocional y tiene efectos nocivos para la salud.

En este sentido, la pandemia ha generado un aumento de los problemas de ansiedad y depresión, con un especial impacto en la salud mental de niños, jóvenes y adolescentes, con aumentos de frecuencia de autolesiones, intentos de suicidio y síntomas relacionados con trastornos por déficit de atención.

Hacer música es una actividad humana que involucra varias funciones sociales; nos ponemos en contacto con otros individuos, evitando el aislamiento social, se comparten experiencias y vivencias. La música involucra una empatía transversal, en el sentido de que los estados emocionales interindividuales se vuelven más homogéneos (por ejemplo, reduciendo la ira en un individuo y la depresión o la ansiedad en otro), promoviendo así la comprensión interindividual y la disminución de los conflictos. La música implica comunicación, incluso para los bebés en el seno materno, desde el sexto mes de gestación aproximadamente. Más tarde, también para los niños pequeños, la comunicación musical durante el canto de canciones de cuna y juegos entre padres e hijos es importante para la regulación social y emocional, así como para el desarrollo social, emocional y cognitivo (Fitch, 2006).

Hacer música también implica la coordinación de movimientos, lo que requiere la capacidad de sincronizar movimientos con un ritmo externo. La coordinación de movimientos en un grupo de individuos parece estar asociada con el placer (por ejemplo, al bailar juntos), incluso en ausencia de un objetivo compartido explícito, aparte de obtener placer de los movimientos concertados. Interpretar música también requiere cooperación, que implica un objetivo compartido y aumenta la confianza entre los individuos. En particular, participar en un comportamiento cooperativo es una importante fuente potencial de placer. Las personas que asisten a un acontecimiento musical están contentas no solo por el acontecimiento en sí, sino por el reencuentro con amistades.

#### 5.1.4.2. *Placer de escuchar música*

En general, se piensa que el placer que las personas experimentan con la música está relacionado con las emociones inducidas por esta, ya que las personas a menudo informan que escuchan música para cambiar o mejorar sus emociones (Juslin & Sloboda, 2001). El aumento de la actividad del sistema nervioso simpático está implicado en las respuestas y se cree que está automatizado, por lo que sirve como una medida confiable de excitación emocional. Para valorar la relación entre música y placer, se suelen medir algunos parámetros físicos de las personas, lo que permite establecer una correlación objetiva. Se suele medir la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria, la conductancia de la piel, la temperatura corporal y la amplitud del pulso del volumen sanguíneo para rastrear los cambios que corresponden a niveles crecientes de placer. Los resultados de diversos trabajos coinciden en una correlación positiva entre las calificaciones de placer y los aumentos medidos simultáneamente en la actividad del sistema nervioso simpático, mostrando así un vínculo entre los índices objetivos de excitación y los sentimientos subjetivos de placer.

Algunas combinaciones de sonidos resultan agradables para los humanos. La estética sonora resulta de especial relevancia para que el sonido o la combinación de sonidos (acorde) sean considerados agradables. Las recompensas estéticas a menudo son de naturaleza muy abstracta y generalmente involucran componentes cognitivos importantes. En particular, dependen en gran medida de la cultura y, por tanto, implican un papel fundamental para el aprendizaje y las influencias sociales. Estas características sugieren que pueden involucrar las regiones más complejas y de «orden superior» del cerebro que están más evolucionadas en los humanos.

Las experiencias previas pueden desempeñar un papel fundamental en la forma en que un individuo puede experimentar ciertos sonidos como placenteros o gratificantes. Aunque existe evidencia de algunas similitudes básicas en la forma en que las personas de diferentes culturas responden a ciertas señales, la naturaleza gratificante de los estímulos estéticos no es del todo universal, difiere significativamente entre culturas y entre individuos dentro de las culturas. Estas respuestas están relacionadas con la interpretación subjetiva del estímulo, que quizá esté relacionada con experiencias previas con un estímulo particular u otros estímulos similares. Se ha propuesto que todos los individuos tienen un «léxico musical», que representa un sistema de almacenamiento de información musical al que han estado expuestos a lo largo de sus vidas, incluida la información sobre las relaciones entre los sonidos y las reglas sintácticas de la estructura musical, específicos de sus experiencias previas (Peretz & Coltheart, 2003). Este sistema de almacenamiento contiene plantillas que permiten reconocer fácilmente fragmentos musicales sin necesidad de ser analizados y que le permite al humano entender y categorizar los sonidos musicales. Este mecanismo es similar al usado cuando escuchamos un sonido.

Si se escuchó antes, el sonido no se analiza y se reconoce gracias a un patrón sonoro anterior en la memoria. Esto permite al sentido auditivo hacer una cierta predicción de la nota o acorde esperado, lo que refuerza la sensación de placer.

Cuando un músico toca un instrumento, se requieren al menos tres funciones básicas de control motor: temporización, secuenciación y organización espacial del movimiento. La sincronización precisa de los movimientos está relacionada con la organización del ritmo musical, mientras que la secuenciación y los aspectos espaciales del movimiento se relacionan con tocar notas individuales en un instrumento musical.

### 5.1.5. Objetos sonoros

Cuando se habla de percepción sonora, cabe distinguir tres elementos diferentes, que habitualmente pueden confundirse entre ellos: el sonido, las fuentes de sonido y los objetos sonoros. El sonido es un fenómeno físico que se genera por la vibración de un objeto en un medio elástico, generalmente aire, que ayuda a que esta vibración se propague y llegue a los receptores. La fuente de sonido se refiere al elemento que genera el sonido, que suele ser el objeto que entra en vibración por alguna acción interna o externa. Las superficies de este objeto actúan como radiadores acústicos, generando una onda sonora. Un objeto sonoro, como un objeto se percibe, es una representación mental del sonido concebido como un objeto segregado de la escena auditiva general y que existe en el tiempo y en el espacio. Algunas de las descripciones neurocientíficas de los objetos definen los objetos auditivos como «objetos de orden superior».

Los objetos sonoros son secuencias de sonidos discretos (contables) o no discretos (incontables). Un objeto sonoro es una secuencia de sonidos que normalmente se experimentan como si hubieran sido producidos por una sola fuente (Nudds, 2010). No todas las secuencias de sonidos son objetos sonoros, la peculiaridad de los objetos sonoros radica en el hecho mismo de experimentar las secuencias como agrupadas.

La escucha suele tener lugar en un espacio y este espacio puede tener una gran influencia en cómo se entiende esta escucha. Entonces, ¿cómo podemos hablar de los cambios en la escucha impuestos por las circunstancias espaciales? ¿Cómo se ve afectado el contenido tímbrico por las características del espacio donde se reproduce? Para discutir estas cuestiones espaciales, el objeto sonoro se utiliza como unidad perceptual básica.

El objeto sonoro se define como un fragmento de sonido musical apto para el estudio en sí mismo. Un objeto sonoro puede abarcar una variedad de significados y características, lo que significa que puede mostrar muchas propiedades al mismo tiempo. La música no es solo un arte del tiempo, sino también del espacio, y la música nunca es «solo» espacial, sino siempre espacio-temporal. El término *audio espacial* se usa para describir la música que utiliza tecnologías de altavoces multicanal. Por ejemplo, la ex-

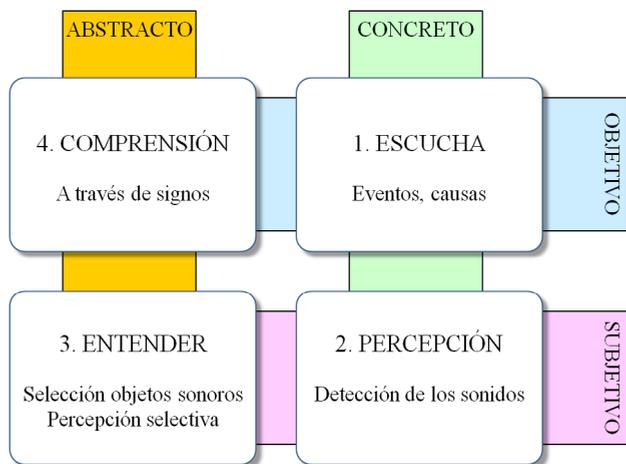
periciencia de un violinista tocando en el escenario de una sala de conciertos implica una localización del instrumento. La identificación o localización de un instrumento solo es posible en música «clásica» o con instrumentos naturales, donde la ubicación de cada instrumento en la orquesta o grupo es previsible. Además, en este tipo de música, la calidad de la sala (volumen, TR60, calidez, claridad, EDT, etc.) resulta un complemento fundamental que no puede obviarse para explicar los fenómenos de percepción sonora.

Las músicas electroacústica y acusmática se encuentran entre las únicas formas musicales en las que las propiedades espaciales son una exploración central. Los arreglos espaciales en las reproducciones estéreo tradicionales de *rock*, pop y géneros similares no tienen el mismo enfoque en las propiedades espaciales. En estos géneros, la experiencia espacial tiene una relación limitada hacia un espacio físico real. La música generalmente se graba en un estudio, un instrumento a la vez, con panoramización y efectos adicionales en la etapa de mezcla, para construir un espacio ilusorio en el que existe la canción. La escucha musical siempre es en estéreo, aunque en la música electrónica conceptualmente no existe el estéreo.

Para llegar al objeto sonoro, debemos suspender nuestro conocimiento del mundo circundante para hacer juicios subjetivos sobre lo que escuchamos. El fragmento musical está aislado de su causa y contexto. Como tal, el objeto no es un fin en sí mismo, sino un método de análisis para extraer múltiples características de un sonido ontológicamente complejo. La investigación sobre percepción espacial y audición espacial estudia cómo las personas entienden lo que escuchan en contextos espaciales desde el punto de vista de las señales perceptivas en planos horizontales y elevados y cómo localizamos las fuentes. Los espacios para la interpretación de música electroacústica pueden variar mucho y pueden plantear desafíos a las piezas de medios fijos e incluso a la electrónica en directo. Existen cuatro modos de escucha, que se resumen en la figura 5.10.

La mitad inferior (2 y 3) se concentra en la persona que percibe; la mitad superior (4 y 1), en sus objetos de percepción. A la izquierda (4 y 3), tenemos los dos sectores abstractos: el proceso de entender, que implica la selección de ciertas cualidades de sonido, y la comprensión de un significado a través de valores abstractos, un código, etc. A la derecha (1 y 2) tenemos los dos sectores concretos: escuchar, que es la percepción «cruda» del sonido, y la percepción sonora, que es el reconocimiento de la fuente del mundo real del sonido a través de las indicaciones dadas por este.

Ya sea que hablemos de escucha subjetiva o de valores y conocimientos que emergen colectivamente, la idea central en 3 y 4 es retener del objeto solo las cualidades que le permitirán relacionarse con otros, o ser referidos a sistemas significativos. Por el contrario, en 1 y 2, ya sea que hablemos de todo potencial de percepción en el objeto sonoro o de toda referencia causal en el evento, la escucha se vuelve hacia un dato en el mundo real.



**Figura 5.10.** Diagrama de los cuatro modos de escucha del sonido (Chion M. , 1983).

#### 5.1.5.1. *Conceptos morfológicos*

Los objetos sonoros son unidades ontológicamente complejas y pueden contener múltiples características y diferentes formas que a menudo no se pueden distinguir fácilmente. Al definir las percepciones del sonido, se estructuran cuatro modos de escuchar para determinar y permitir que los oyentes evalúen su modo de escuchar objetivo o subjetivo del tema sonoro en cuestión. En lugar de centrarse en la derivación de una sola característica, la escucha se divide en cuatro categorías principales, que a su vez se dividen en subcategorías de subjetivo/objetivo y abstracto/concreto con el objetivo de obtener comprensión y conocimiento sobre los sonidos (Schaeffer, 2017):

- Escuchar (objetivo/concreto)
- Percibir (subjetivo/concreto)
- Entender (subjetivo/abstracto)
- Comprender (objetivo/abstracto)

Para ser claros, los cuatro modos de escuchar no son modos de percepción aislados, sino que son interdependientes e interrelacionados (Kane, 2014). A estos cuatro conceptos se le añade un quinto, «la escucha tecnológica», que se produce cuando, al escuchar un sonido, se intenta descifrar qué tipo de acciones se han llevado a cabo para obtener ese sonido (Smalley, 1997). Aunque, evidentemente, se «escucha» el sonido, se hace un análisis basado en intentar reproducirlo, lo que anula nuestra capacidad de entendimiento. Cuando se escucha música en la que las fuentes están ocultas a la vista, quizá esta sea

una forma más sencilla de «comprender» la música, pero plantea un problema porque la tecnología es solo un medio para lograr un objetivo final, no un medio en sí mismo.

Esta división entre lo abstracto y lo concreto también influye en la separación del símbolo y la señal. Lo que estamos estudiando es el objeto sonoro en sí mismo, no un sonido que se reconstruye a partir de una señal. El acústico se preocupa por dos cosas: el objeto sonoro que escucha y la señal que mide. Desde su punto de vista erróneo, todo lo que tiene que hacer es bajar la señal física, considerar lo que escucha como su resultado y el objeto sonoro como una manifestación subjetiva.

En este sentido, hay que diferenciar sonido y fuente (sonora). Según Schaeffer:

- El objeto sonoro no es la señal física.
- El objeto sonoro no es un fragmento grabado.
- El objeto de sonido no es un símbolo anotado en una puntuación.
- El objeto sonoro no es un estado de ánimo.

La relación entre el sonido escuchado y la «sala» es un objeto que el oyente forma en su mente consciente mientras escucha música y surge como respuesta a una experiencia auditiva. La concepción de la sala se forma a través de una reducción de la información para acceder a las características destacadas directas de la experiencia auditiva. Mediante un enfoque intencional en nuestra escucha, extraemos características importantes sobre lo que escuchamos en la interacción entre el espacio y el sonido.

Pierre Schaeffer teorizó el objeto sonoro como una unidad intencional en la investigación musical, como un medio para analizar los sonidos en busca de sus propiedades más destacadas. Las circunstancias espaciales (sala) plantean cambios en nuestra escucha centrándonos en la experiencia auditiva y las circunstancias acústicas incontrolables que la rodean. Los elementos principales se basan en los cambios tímbricos de los sonidos, realizados por las reflexiones sobre las superficies de la sala. La perspectiva del oyente depende de su ubicación y el enfoque repetido en la necesidad de escuchar el sonido resultante en el espacio donde la fuente y el espacio se fusionaron en una sola entidad. Gran parte de la literatura acústica se ocupa de las salas de conciertos y se argumenta que, independientemente del espacio de interpretación, las morfologías impuestas por el espacio a la fuente tal como las perciben los oyentes deben considerarse como parte de la música.

# Capítulo 6.

## Efectos del sonido sobre el humano

### 6.1. Introducción

El sonido es una forma de energía, que con niveles elevados, puede producir y produce efectos perjudiciales sobre el cuerpo humano. Estos efectos tienen dos aspectos a considerar. Por un lado, se distinguen los efectos sobre distintos órganos del cuerpo humano que pueden ser perceptibles y medibles, y por otro lado, los efectos psicológicos, que son más difíciles de detectar, no son mensurables y en general son mucho más devastadores. Dentro de la afectación sobre los órganos del cuerpo humano, distinguimos las afecciones que son audibles sobre el sentido auditivo y las no audibles sobre otros órganos.

#### 6.1.1. Norma ISO 1999-2013

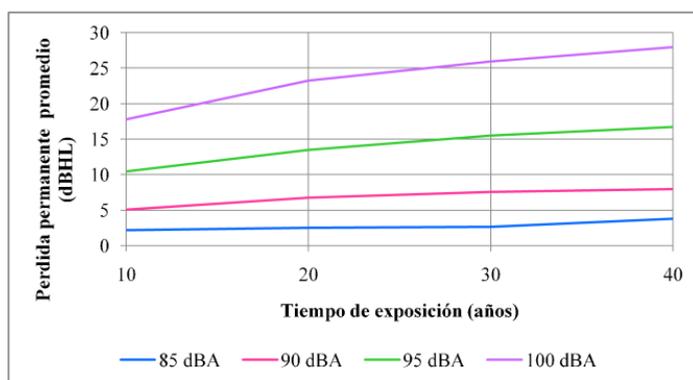
El documento desarrollado por la Organización Internacional de Normalización (ISO 1999-2013) proporciona información y ecuaciones que permiten la predicción de cambios de umbral permanentes inducidos por el sonido en varias frecuencias audiométricas y para diferentes duraciones de exposición. La introducción de la ISO 1999-2013 establece explícitamente que la norma se puede utilizar para estimar el impacto auditivo de las exposiciones diarias al ruido ocupacional o no ocupacional. La norma establece, además, que la exposición al ruido no ocupacional debe tenerse en cuenta al considerar el cambio de umbral permanente inducido por ruido, excepto en el caso de que la exposición no ocupacional sea insignificante en relación con la exposición ocupacional.

La norma también contiene un pasaje que es extremadamente relevante: «La selección de la exposición al ruido máxima tolerable o la máxima permisible y los requisitos de protección, así como la selección de fórmulas específicas para fines de evaluación o compensación del riesgo de deterioro, requieren la consideración de factores éticos, sociales, económicos y políticos que no son susceptibles de estandarización internacional.

Los países individuales difieren en su interpretación de estos factores y, por lo tanto, estos factores se consideran fuera del alcance de esta norma internacional».

Nótese que las exposiciones descritas en el estándar ISO se describen en términos de  $L_{EX8h}$  para un número determinado de años de exposición y que el estándar se describe específicamente como aplicable al «ruido con frecuencias inferiores a aproximadamente 10 kHz, que es constante, intermitente y fluctuante, o irregular». El anexo D de la norma incluye tablas con ejemplos de cambio de umbral permanente inducido por ruido predicho en las frecuencias audiométricas de 0,5, 1, 2, 3, 4 y 6 kHz para exposiciones  $L_{EX8h}$  de 85, 90, 95 y 100 dBA para períodos de exposición con duraciones de 10 a 40 años.

Usando estas tablas, es posible calcular el cambio de umbral permanente inducido por ruido estimado promedio para la mediana de una población. Por ejemplo, se espera que una exposición de 10 años a un promedio diario de 85 dBA  $L_{EX8h}$  se produzca un cambio de umbral permanente inducido por ruido promedio a 1, 2, 3 y 4 kHz de 2,75 dBHL para el individuo medio, en comparación con los cambios promedio de 5,25, 10,75 y 17,75 dBHL a 90, 95 y 100 dBA, respectivamente. Los cambios de umbral permanentes inducidos por ruido promedio estimados a 1, 2, 3 y 4 kHz, derivados del anexo D (ISO 1999-2013), se muestran para diferentes duraciones en la figura 6.1.



**Figura 6.1.** Cambio medio del umbral permanente inducido por ruido (dBHL) a 1, 2, 3 y 4 kHz para un individuo medio de la población, para un nivel y duración de exposición determinados (ISO 1999-2013).

Se puede observar que el cambio de umbral permanente inducido por el ruido esperado aumenta de manera más pronunciada en los primeros años de exposición y que la tasa de pérdida disminuye después de esa ventana de exposición. Esto sugiere que los primeros 10 a 20 años de exposición son los más críticos desde el punto de vista del riesgo de pérdida auditiva, aunque la pérdida auditiva continúa acumulándose con

el tiempo de exposición adicional. Es importante señalar que estos valores reflejan la pérdida auditiva promedio prevista para el percentil 50 de una población: la mitad de la población tendría más y la otra mitad tendría menos pérdida auditiva que la ilustrada en la figura 6.1. Se debe tener cuidado al interpretar estas predicciones y aplicarlas a cualquier individuo.

### **6.1.2. Efectos directos del sonido sobre el cuerpo humano**

El efecto directo más visible y conocido es la pérdida parcial o total de la audición o hipoacusia. Esta pérdida auditiva se produce por la exposición a niveles sonoros elevados durante tiempos de exposición prolongados. Un sonido puede ser peligroso y causante de pérdida auditiva por su elevado nivel de presión sonora. Es el caso de las explosiones de petardos o de armas de fuego disparados cerca de la cabeza. En estas situaciones, las presiones acústicas superan los 140 dB y, a pesar de su corta duración, esto puede causar una pérdida auditiva permanente que puede ser parcial o total.

Sin embargo, la situación más frecuente se produce cuando un individuo se somete, generalmente de forma voluntaria, a niveles sonoros elevados, como por ejemplo en una sala de fiestas, un concierto musical o similar. Escuchar música con elevado volumen no nos molesta si participamos del evento, y eso produce una falsa sensación de que «no pasa nada». Normalmente, los niveles sonoros no llegan a los fatídicos 140 dB, salvo en situaciones muy concretas, pero si el tiempo de exposición es excesivo, puede tener consecuencias irreversibles para el oído.

La hipoacusia, aunque sea parcial, puede tener graves consecuencias, y estas son más importantes en los niños, ya que interfiere en su desarrollo cognitivo; de ahí su importancia tanto en la prevención como en un tratamiento adecuado.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), la pérdida de audición o hipoacusia ocupa el tercer lugar como patología, que implica en general padecer muchos años de vida con discapacidad. Más del 5% de la población mundial, unos 430 millones de personas, padece pérdida de audición con una pérdida superior a 35 dBHL en el oído con mejor audición en los adultos y superior a 30 dBHL en los niños. Al margen de que la hipoacusia aumenta progresivamente con la edad, los jóvenes que suelen frecuentar locales o actuaciones en directo, o escuchan música con auriculares a elevados niveles sonoros, suelen presentar patologías graves o muy graves que van a tener que asumir el resto de sus vidas. Todos estos datos nos indican la gran importancia de los controles preventivos mediante los test audiométricos y los tratamientos.

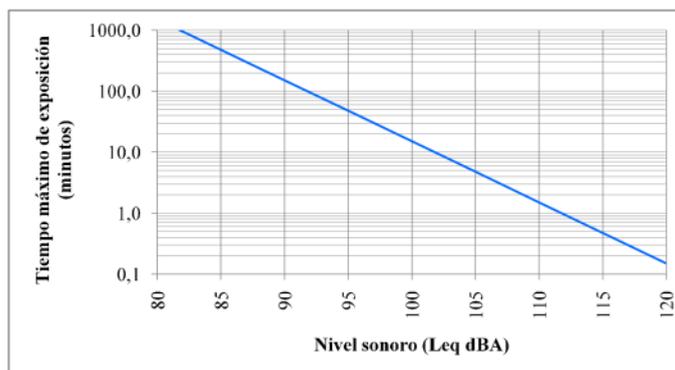
La principal consecuencia de sufrir una hipoacusia es la limitación en la comunicación con los demás. Este aspecto es especialmente grave en los niños, ya que puede suponer un retraso en el aprendizaje y el rendimiento escolar que, sin duda, marcará sus

vidas. La causa de la pérdida de sensibilidad auditiva radica siempre en la exposición a sonidos de elevada intensidad. Estos sonidos pueden ser voluntarios (como escuchar música) o involuntarios (como estar cerca de la explosión de un petardo o cerca de un altavoz cuando se activa un sonido de elevada intensidad inesperadamente). En el primer caso, aunque el oído puede activar su sistema de autoprotección, eso no exime de padecer sordera en un futuro no muy lejano. En el segundo supuesto, las señales sonoras de corta duración son las más peligrosas, ya que los mecanismos de autoprotección del oído no llegan a actuar por la excesiva latencia de este.

La nocividad de escuchar música a elevado nivel es independiente de estar en un espacio cerrado o abierto. En determinados ambientes, es frecuente estar sometido a niveles sonoros entre los 100 y los 105 dBA. La afectación sobre el oído es perfectamente observable cuando se sale del local o acaba el «directo». Dependiendo de las características fisiológicas particulares de cada persona, el grado de afectación puede ser más o menos acusado y pueden ser suficientes para causar pérdida auditiva permanente. Por ello, no es conveniente someterse a excesos de nivel sonoro con frecuencia. Nótese que la pérdida permanente de sensibilidad no se manifiesta de forma brusca, salvo en caso de accidente o trauma acústico producido por una explosión. Realizar un test audiométrico de alta frecuencia de forma periódica pondrá de relieve si hay o no afectación, y en qué grado. Controlar nuestro sentido auditivo «de oído» como se hace habitualmente no es aconsejable. Cuando nos demos cuenta de que «algo no va bien», ya será demasiado tarde. Los excesos realizados en el pasado pasan factura unos años después.

El tiempo de exposición a un sonido de nivel elevado debe ser inversamente proporcional a su nivel. Por debajo de los 85 dBA, el riesgo de pérdida de sensibilidad auditiva se reduce notablemente. La figura 6.2 muestra el tiempo máximo de exposición en función del nivel sonoro al que estamos sometidos para no tener pérdida auditiva. Esta gráfica valora la energía recibida en conjunto por el oído para sonidos de banda ancha. Pueden darse casos en los que, con niveles sonoros inferiores, se produzcan pérdidas auditivas irreparables. La pérdida de audición es una cuestión de nivel, pero también del tiempo de exposición a sonidos de elevada intensidad; es decir, la pérdida auditiva está relacionada con la energía acústica recibida.

El nivel de ruido al que está sometida una persona diariamente puede variar en función de su tipo de trabajo o actividad. Salvo los casos de exposición puntual a niveles elevados que se dan en algunas industrias, el grado de exposición es notablemente inferior a 80 dBA. Esto descarta a la población inmersa en un tejido urbano, donde la fuente de ruido más importante es el tráfico de vehículos que circulan por las calles de la ciudad. El gráfico de la figura 6.2 se aplica en aquellas situaciones en las que los niveles sonoros pueden superar esos 80 dBA. El caso más frecuente suele estar relacionado con las actividades industriales o musicales, ya sea en espacios abiertos o cerrados.



**Figura 6.2.** Tiempo máximo de exposición recomendado para no sufrir una pérdida auditiva permanente, en función del nivel sonoro.

Según la gráfica, se comprueba que con un nivel de 85 dBA podemos estar hasta 8 horas sin sufrir ningún efecto fisiológico permanente. Esto es cierto para una amplia mayoría de población, pero hay personas que pueden sufrir daños irreparables con niveles ligeramente inferiores y tiempos de exposición prolongados. A medida que aumentamos el nivel sonoro, el tiempo de exposición se debe acortar para no superar el máximo de energía que podemos recibir sin consecuencias permanentes.

Los límites de nivel sonoro mostrados en la figura 6.2 son los correspondientes al llamado *ruido en el trabajo*, donde los sonidos proceden de máquinas y procesos productivos. Sin embargo, los niveles sonoros en el interior de una discoteca o en un concierto en directo o incluso con el reproductor personal de música tienen unas características bastante distintas. Por un lado, el sonido que escuchamos es deseado, y esto produce sobre el individuo una falsa sensación de ser más inocuo. La comunidad científica coincide en que el indicador más adecuado para evaluar la afectación del sonido sobre el oído es el nivel equivalente ( $L_{eq}$ ). Este nivel se calcula para el período de exposición, que suele ser de 8 horas en salud laboral. De hecho, el nivel equivalente  $L_{eq}$  surgió como indicador para evaluar el grado de exposición al ruido laboral de los trabajadores. Esto partía de la hipótesis de que los niveles sonoros eran relativamente estables durante la jornada laboral. A mayor variación de nivel sonoro, más imprecisión se obtiene con el indicador  $L_{eq}$  respecto de la sensación sonora percibida.

Hay sugerencias en diversos trabajos publicados de que los efectos de la exposición al ruido en el trabajo en cuanto a la pérdida temporal pueden ser peores que los de algunos tipos de música energéticamente equivalente. Si esto fuera cierto, indicaría que los límites de exposición basados en el riesgo de pérdida auditiva por ruido en el trabajo pueden ser sobreprotectores para evaluar la exposición a algunos tipos de música. Tam-

bién hay indicios en las publicaciones de que la duración diaria de la escucha actual entre niños y adultos jóvenes puede ser sustancialmente mayor que la asociada de forma tradicional con la exposición al ruido en el trabajo. Sin embargo, la tremenda variación en los tipos y patrones de escucha de música justifica la adopción de pautas de exposición conservadoras que presumen la exposición a los tipos de música más dañinos (es decir, que las exposiciones a la música se consideren tan peligrosas como las exposiciones al ruido). Se supone que los estándares actualmente disponibles para estimar el riesgo de pérdida permanente son apropiados para exposiciones diarias de hasta 12 horas, que parece ser mayor que la gran mayoría de duraciones de escucha notificadas por niños y adultos jóvenes (Ahlbom, y otros, 2008). Teniendo en cuenta estos hallazgos, se recomienda que los límites de exposición desarrollados para el ruido en el trabajo se consideren apropiados para evaluar el riesgo de la exposición a la música, aunque se necesita una exploración adicional de la relación dosis-respuesta entre la exposición crónica a la música y la pérdida auditiva.

En ausencia de una definición específica de la OMS de cambio de umbral permanente máximo inducido por ruido, no es posible determinar el riesgo de que las personas cumplan o superen esa definición después de la exposición a la música y a su vez, es imposible determinar un nivel aceptable de riesgo de pérdida auditiva permanente. Ante esta situación, existen dos alternativas lógicas.

La primera es adoptar un límite de exposición recomendado que se sabe que elimina el riesgo de pérdida auditiva para cualquier individuo expuesto durante la exposición más larga que se puede modelar actualmente. Este límite de exposición es un  $L_{EQ}$  de 24 horas de 70 dBA, equivalente a un  $L_{EX}$  de 75 dBA. Debe tenerse en cuenta que este límite incluye un margen de seguridad para tener en cuenta a las personas vulnerables o susceptibles.

La segunda es adoptar un límite de exposición que dará como resultado que una fracción muy pequeña de las personas expuestas sufra una discapacidad auditiva material, pero que protege contra una pérdida auditiva sustancial para prácticamente todas las personas expuestas. Este límite de exposición es un  $L_{EQ24}$  de 75 dBA, equivalente a un  $L_{EX}$  de 80 dBA (es decir, el valor de acción de exposición inferior al ruido ocupacional actual de la Unión Europea). Vale la pena señalar que este límite de exposición  $L_{EX}$  de 80 dBA está destinado a eliminar prácticamente el riesgo de pérdida auditiva permanente medible después de una exposición de 40 años.

Sin embargo a la inversa, es posible que el estándar no proteja de forma suficiente. Se puede esperar razonablemente que las exposiciones de por vida a la música y al ruido excedan una duración acumulada mayor de 40 años, la pérdida de la cual no se puede estimar con precisión utilizando los estándares predictivos existentes, aunque vale la pena señalar que estos modelos predicen que la mayor tasa de cambio en pérdida auditiva

permanente, ocurrirá en los primeros diez años de exposición y las exposiciones más allá de ese tiempo contribuyen mucho menos a la pérdida auditiva permanente en general.

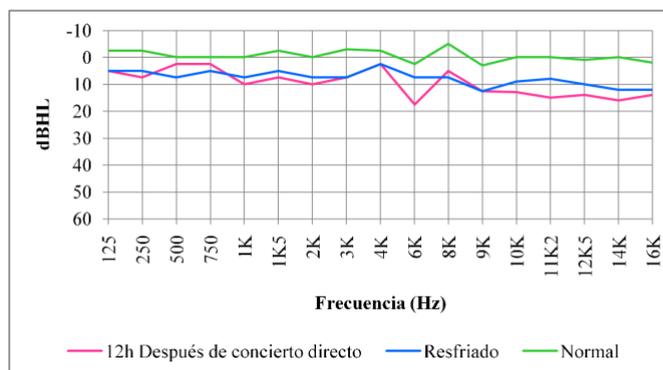
No obstante, a pesar de estas incertidumbres, la adopción de un límite  $L_{EX}$  de 80 dBA para la exposición a la música quizá representa una compensación óptima entre ser suficientemente protector y ser oneroso o técnica o socialmente inviable. Si el nivel de acción de exposición más bajo de ruido en el trabajo de la Unión Europea (80 dBA  $L_{EX}$  de 8 horas) se considera demasiado restrictivo o no respeta la autonomía de las personas, se debe considerar una restricción menor en los límites de exposición. Un límite de exposición recomendado tan «liberal», aplicable a las personas que estén dispuestas a tolerar un riesgo moderado de un pequeño grado de pérdida auditiva permanente, pero que aun así proteja suficientemente a la gran mayoría de las personas expuestas a exposiciones musicales no profesionales, es de 83 dBA  $L_{EX}$  de 8 horas, es decir:  $L_{EQ24} = 78$  dBA (24 horas);  $L_{EQ1} = 92$  dBA (1hora) (Neitzel & Fligor, 2017).

Hay numerosos estudios realizados con población muy diversa en edad y de distinta procedencia geográfica que sugieren que estar sometido a niveles sonoros musicales elevados conlleva un riesgo de pérdida auditiva temporal o permanente en torno a los 5 dBHL para las bandas de 0,5 a 2 kHz y 9 dBHL para las frecuencias de 4 a 8 kHz (Fligor & Cox, 2004) (Le Prell, y otros, 2012) (Le Clercq, Van Ingen, Ruytjens, & Van der Schroeff, 2016). Por otro lado, está documentada la aparición de *tinnitus* como consecuencia de la exposición a niveles sonoros elevados asociados con la duración y la intensidad de la exposición a la música (Moore, Zobay, Mackinnon, Whitmer, & Akeroyd, 2017) (Guest, Munro, Prendergast, Howe, & Plack, 2017). Dada la cantidad de evidencia disponible, está probado que los niveles de exposición a la música suficientemente elevados producen cambios temporales del umbral de audición. Asimismo, ante los niveles de exposición suficientemente elevados y las duraciones de exposición prolongadas, se puede producir la pérdida permanente de sensibilidad auditiva.

#### **6.1.2.1. Afectación por resfriado**

La pérdida de sensibilidad auditiva no se produce solo por estar en lugares con ambientes sonoros de elevado nivel. Un simple resfriado hace que nuestro oído pierda sensibilidad. Una de las consecuencias más habituales del resfriado es la mucosidad que se acumula en las fosas nasales. Esta mucosidad puede dificultar la acción de la trompa de Eustaquio y la presión atmosférica a ambos lados del tímpano no se iguala correctamente, lo que conlleva una audición deficiente. Esta pérdida de sensibilidad suele tener una afectación en toda la banda de frecuencias.

Para ilustrar este fenómeno, se expone un caso real con una persona joven con un oído correcto para su edad. La figura 6.3 muestra las audiometrías hechas a un joven de 22 años en tres situaciones distintas (Barti R. , 1999).



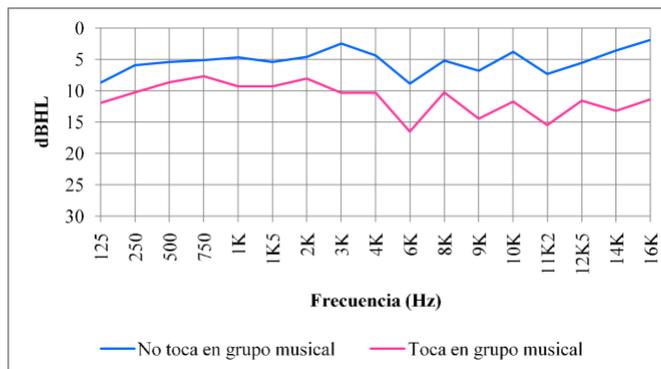
**Figura 6.3.** Audiometría joven de 22 años en tres situaciones distintas.

La primera (verde), estando bien de salud; la segunda (azul), estando resfriado, y la tercera (rojo), 12 horas después de asistir a un concierto de música en directo de 3 horas de duración, sin estar resfriado. Como se puede observar en el gráfico, la capacidad auditiva de este joven es ejemplar y, por desgracia, nada frecuente. Se aprecia que, después del concierto en directo, en la banda de 6 kHz aparece un valle que indica que ha estado expuesto a elevados niveles sonoros. Lo aconsejable sería hacer un seguimiento y repetir la audiometría pasado un tiempo, para comprobar si el valle desaparece o se mantiene. Nótese que la audiometría hecha 12 horas después de asistir a un concierto musical en directo (en rojo) está unos 10-15 dBHL por debajo de la situación normal. Por la edad de la persona (22 años), seguramente recuperará el 100% de su capacidad auditiva, pasados unos días. Si durante el proceso de recuperación se repiten los excesos de nivel sonoro, aunque sea con auriculares, es altamente probable que el joven padezca una pérdida permanente de sensibilidad auditiva inicialmente en las bandas de 4-6 kHz y, por último, en las bandas de alta frecuencia por encima de los 8 kHz. Podemos comprobar, pues, que en este ejemplo la sensibilidad auditiva cuando está resfriado es muy similar a la que presenta el oído 12 horas después de asistir a un concierto musical, lo cual evidencia que la agresión acústica sufrida en el concierto fue muy notable.

### **6.1.2.2. Afectación por tocar en un grupo musical**

Es conocido que frecuentar ambientes sonoros elevados puede ser perjudicial para nuestro oído. A partir de los resultados objetivos de las audiometrías efectuadas a jóvenes estudiantes de ingeniería (Barti R. , 1999), se correlacionaron estas con los hábitos acústicos de los participantes a través de sus respuestas a la encuesta hecha antes de hacer la prueba. La mayoría de estudiantes eran estudiantes de Ingeniería de Telecomunicaciones, especialidad Sonido e Imagen, y por tanto, estaban muy sensibilizados con la necesidad

de cuidar el oído. Se estudió si tocar en un grupo musical podía tener relación o no con una pérdida auditiva permanente. Los resultados se resumen gráficamente en la figura 6.4.



**Figura 6.4.** Comparación de la sensibilidad auditiva promedio entre jóvenes que tocan en un grupo musical y los que no.

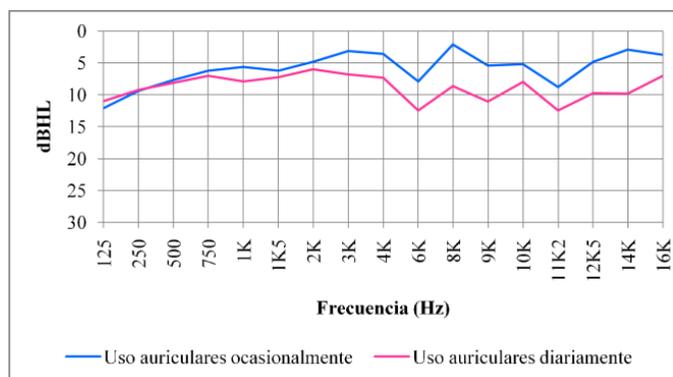
Se aprecia una pérdida auditiva creciente con la frecuencia que está directamente relacionada con tocar en un grupo musical y estar sometido a niveles sonoros elevados durante la actuación. La pérdida auditiva en promedio es de unos 5 dBHL entre 125 Hz y 4 kHz. Para bandas superiores, la pérdida de sensibilidad permanente se acerca a los 10 dBHL.

### 6.1.2.3. *Afectación por uso de reproductores musicales personales*

Otra causa de pérdida auditiva suele ser el uso (y abuso) de la reproducción de música a través de auriculares. Ya en el año 1999, cuando se hizo este estudio (Barti R., 1999), los jóvenes adolescentes usaban estos dispositivos para aislarse del ruido urbano. Si separamos los resultados en función del uso de reproductores con auriculares, se obtuvieron los resultados que se resumen en el gráfico de la figura 6.5. Se observa que aparece también una pérdida auditiva, aunque ligeramente inferior al caso anterior, por frecuentar eventos sonoros de elevado volumen. Surge una cuestión en el punto anterior, relacionada con el uso de reproductores. Su uso diario no comporta pérdida auditiva. Solo en el caso de escuchar música con elevado nivel, y además hacerlo con frecuencia, puede tener las consecuencias que se muestran en la figura 6.5, donde se aprecia claramente el valle a los 6 kHz.

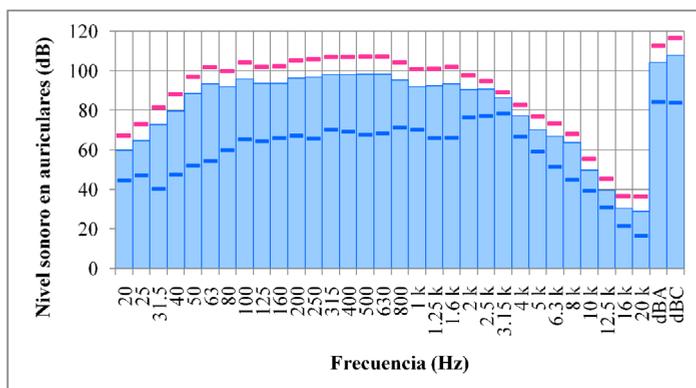
La figura 6.6 muestra el espectro sonoro promedio (sombreado azul claro), el perfil espectral máximo (rojo) y el perfil espectral mínimo (azul oscuro) obtenidos con dife-

rentes reproductores de algunos participantes. Los niveles sonoros de escucha y el tipo de música los seleccionaban los propios usuarios. Destaca que el mayor nivel sonoro medido se obtuvo con el reproductor de una chica de 19 años sin limitación sonora, que producía un nivel sonoro de 112,6 dBA en los auriculares.



**Figura 6.5.** Comparación de la sensibilidad auditiva entre jóvenes ante la frecuencia de escuchar música a través de auriculares.

Hay que tener en cuenta que la mayoría de los dispositivos móviles de reproducción musical el año 1999 ya disponían del control AVLS, que limitaba el nivel sonoro a 100 dBA en auriculares, aunque el usuario podía voluntariamente eliminar esta limitación.



**Figura 6.6.** Con sombreado azul claro, niveles sonoros promedio en auriculares, para distintos reproductores de sonido, con distintos tipos de música y con el nivel habitual de escucha. Tramos en rojo y azul oscuro: valores máximos y mínimos obtenidos, respectivamente.

El uso de reproductores personales no es exclusivo de los adolescentes. El uso masivo de los dispositivos portátiles ha propiciado que lo que sucedía en la década del 2000 entre los jóvenes de 20 a 26 años, ahora sucede con edades inferiores. El confinamiento obligado en 2020 ha cambiado muchos hábitos entre los más jóvenes y ha acentuado el uso de dispositivos móviles durante ese año. Concretamente, su uso aumentó en un 84% para los *smartphones* y de un 70% para las tabletas (Núñez Gómez, Ortega Mohedano, Monguí Monsalve, & Paul Larrañaga, 2020). El uso de estos dispositivos ha sido muy diverso, primando el juego, el consumo de audiovisuales y, en menor medida, las tareas didácticas.

Un estudio reciente revela que se observa una pérdida auditiva entre población de 9 a 11 años (Carlijn, y otros, 2018). El estudio se hizo a partir de 3.116 participantes con una edad media de 9,7 años. La paridad fue prácticamente del 50%. De los participantes, 1.244 (39,9%) indicaron no utilizar reproductores personales, 577 (18,5%) manifestaron utilizar estos dispositivos uno o dos días por semana y 254 (8,2%) lo utilizan tres o más días a la semana. El resto no indicó su uso.

La pérdida auditiva a altas frecuencias se manifestó en el 14,2% de los participantes. Se encontró una relación entre el uso de los dispositivos móviles y la pérdida auditiva. Esta pérdida de sensibilidad auditiva en una población tan joven ya está presente antes de la exposición a los peligros conocidos de una exposición a niveles sonoros elevados, como la asistencia a discotecas o asistir a conciertos en directo, y puede tener consecuencias de por vida. Se necesitan mediciones repetidas para confirmar la asociación del uso de reproductores de música portátiles con la discapacidad auditiva en los niños.

Este estudio hecho en los Países Bajos presenta unos resultados muy similares al realizado en 1999 con jóvenes de 20 a 29 años (Barti R. , 1999), lo cual resulta bastante preocupante por la corta edad de la población analizada y porque pasados 20 años los problemas de exposición a sonidos elevados persisten y, en cierto modo, empeoran.

#### ***6.1.2.4. Afectación por frecuentar actividades musicales***

Según la gráfica de la figura 6.2, se comprueba que con un nivel de ruido en el trabajo de 85 dBA podemos estar hasta 8 horas sin sufrir ningún efecto fisiológico permanente. Teniendo en cuenta las recientes recomendaciones de la OMS (Neitzel & Fligor, 2017), los límites de exposición desarrollados para el ruido en el trabajo se consideran apropiados para evaluar el riesgo de la exposición a la música, aunque se necesita una exploración adicional de la relación dosis-respuesta entre la exposición crónica a la música y la pérdida auditiva.

Aplicando pues estas recomendaciones, podemos deducir que, a medida que aumentamos el nivel sonoro, el tiempo de exposición se debe acortar para no superar el

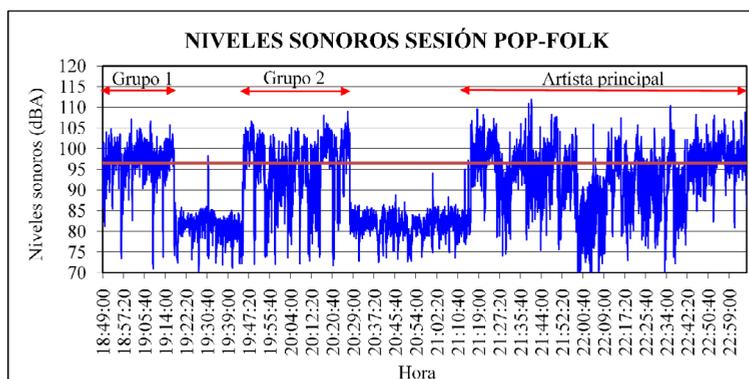
máximo de energía que podemos recibir sin consecuencias permanentes. Por ejemplo, con 95 dBA, nivel máximo en el interior de un bar musical, podemos estar 48 minutos. Si estamos en un concierto en directo con 100 dBA, podremos estar 15 minutos y 20 segundos. Hay que tener en cuenta que el nivel sonoro indicado es el nivel equivalente  $L_{eq}$  durante todo el tiempo que dura la exposición al sonido. En función del tipo de música o la tipología del concierto en directo, el nivel equivalente puede variar.

Ilustramos este concepto con dos ejemplos reales. El primero, un concierto de música pop-folk en un estadio ante 30.000 asistentes en espacio semiabierto. El segundo, sesiones de varios DJ de música EDM ante 45.000 asistentes en espacio abierto; en esta sesión, todos los cantantes y DJ llevan a su propio técnico de sonido, que se encarga de controlar tanto los niveles sonoros como la ecualización utilizada durante la sesión. En ambos casos, los artistas que intervienen tienen reconocimiento mundial y tanto los medios técnicos como humanos son experimentados y de calidad. Los niveles sonoros en ambos eventos se muestran en las figuras 6.7 y 6.8. Estos niveles están medidos en el control de sonido, situado en ambos casos a unos 40 m del escenario. La figura 6.7 muestra la evolución del nivel sonoro en el control de sonido durante un concierto de pop-folk.

En el caso de la sesión pop-folk, había dos grupos teloneros que actuaban antes que la estrella del cartel. Es destacable que el «ruido de fondo» durante las pausas producido por el público y una música ambiente se situaba por encima de los 80 dBA. Podemos observar que en la actuación estelar, sobre las 22:00, se hacen unos silencios con niveles que llegaron a los 61 dBA. En la gráfica se observa una variación de niveles notable, aspecto que reduce el  $L_{eq}$ . Individualmente, los grupos teloneros dieron un nivel  $L_{eq}$  de 98,6 y 98,9 dBA, respectivamente, aunque se pueden apreciar oscilaciones de nivel que llegan a superar los 105 dBA. La actuación estelar dio un nivel  $L_{eq}$  de 97,2 dBA, con varios fragmentos con niveles inferiores a los 90 dBA, que se corresponde con el carácter más íntimo del concierto.

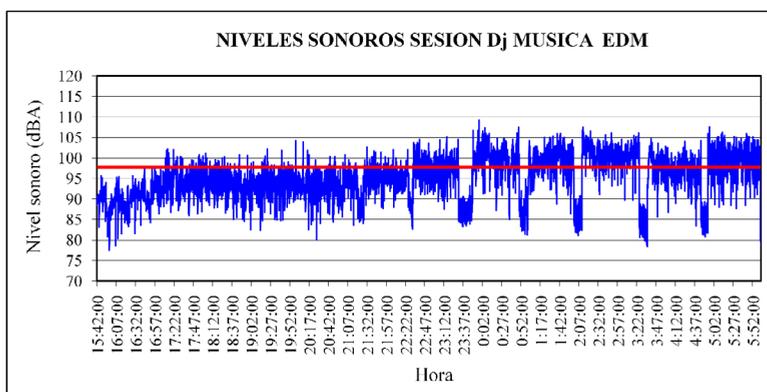
La sensación sonora recibida desde el control de sonido se correspondía con el carácter «tranquilo» del evento. Fue una sesión con nivel suficiente en los momentos de mayor expresión sonora, es decir, los registros musicales tenían dinámica. El  $L_{eq}$  de toda la sesión fue de 96,4 dBA. Este nivel quedó ligeramente por debajo de las previsiones en cuanto a contaminación acústica sobre las inmediaciones. Cabe destacar que nadie del equipo técnico del control de sonido llevaba tapones en los oídos durante la actuación.

La figura 6.8 muestra el caso de una sesión de DJ con música EDM, con un carácter totalmente distinto al expuesto antes. Como se puede apreciar en el gráfico, la sesión empieza a las 15:40, aproximadamente, y acaba a las 6:00. Los primeros DJ que intervienen hasta las 21:00 producen unos niveles sonoros muy similares, entre 94 y 95 dBA. Durante el cambio de los primeros DJ, sigue sonando la música al mismo nivel, de modo que no hay variaciones visibles.



**Figura 6.7.** Evolución temporal de los niveles sonoros de un concierto de pop-folk ante 30.000 asistentes. La línea roja muestra el  $L_{eq}$  total.

Con los DJ de más renombre y prestigio, que empiezan a las 21:20, aproximadamente, se pueden detectar las pausas de nivel entre ellos. Durante estas pausas hay música, pero a un nivel apreciablemente más bajo. Se observa que durante las pausas el griterío del público es similar al de la música ambiente y se sitúa en conjunto en 85,2 dBA. Indicaremos que se trata de un espacio completamente abierto.



**Figura 6.8.** Evolución temporal de los niveles sonoros de un concierto de diversos DJ con música EDM ante 45.000 asistentes.

Los niveles sonoros de las actuaciones van aumentando a medida que avanza la noche, siendo esto un hecho bastante frecuente. Salvo la penúltima actuación que dio un nivel de 98 dBA, el resto estaban entre los 100 y los 101,4 dBA, aunque se aprecian pun-

tualmente niveles superiores que llegan a los 105 dBA. El nivel total de la sesión fue de 97,7 dBA. No hay que fiarse nunca de la exactitud de los niveles mostrados en gráficas, ya que la resolución gráfica de la pantalla puede alterar visualmente estos valores. Lo recomendable siempre es ver la tabla de datos.

La sensación sonora percibida en el control de sonido (también llamado FOH) fue el esperado para este tipo de evento. Especialmente con los últimos DJ, el nivel sonoro fue bastante contundente, sobre todo en el aspecto de graves. Situado a unos 40 m del escenario, un botellín de agua medio vacío «bailaba» con el ritmo musical sobre la mesa. Todo el personal técnico del control de sonido llevaba tapones de distintos tipos en los oídos como medida de autoprotección.

Comparando ambos eventos, la sensación sonora percibida en el control de sonido fue muy distinta. Es obvio que el tipo de música y el ambiente son completamente distintos, pero, aun así, los niveles sonoros medidos son prácticamente iguales: 96,4 y 97,7 dBA, apenas 1,5 dB de diferencia a favor de la sesión de DJ. Detectar una diferencia de 1,5 dB es posible solo si comparamos dos muestras de sonido consecutivamente y alternamos uno y otro registro sonoro en el proceso de comparación. Con estos niveles sonoros, el tiempo de exposición máximo recomendado sería de unos 40 minutos.

La figura 6.9 muestra los espectros correspondientes a ambos eventos. El espectro mostrado es el promedio para toda la sesión en ambos casos, incluidas las pausas del cambio de grupo musical o DJ.

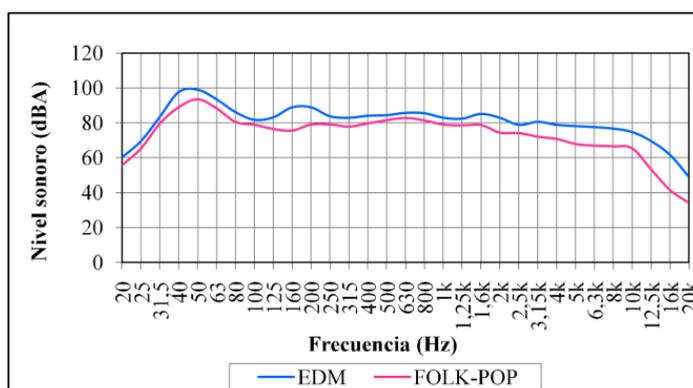


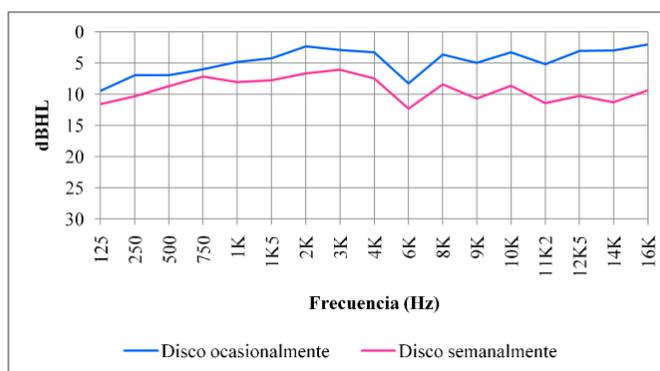
Figura 6.9. Espectro comparativo de los eventos musicales presentados.

Al comparar ambos espectros, observamos que la sesión de DJ tiene más energía en algunas bandas de frecuencia que la sesión de pop-folk, pero realmente no hay tanta diferencia como se podría suponer *a priori* a tenor de la sensación sonora experimentada

en ambos casos: la sensación sonora percibida en los controles de sonido para la sesión de DJ era bastante más contundente que para la sesión de pop-folk. La diferencia de nivel sonoro de 1,5 dBA parece que no se corresponde con la gran diferencia de sonoridad percibida *in situ* entre ambos escenarios sonoros.

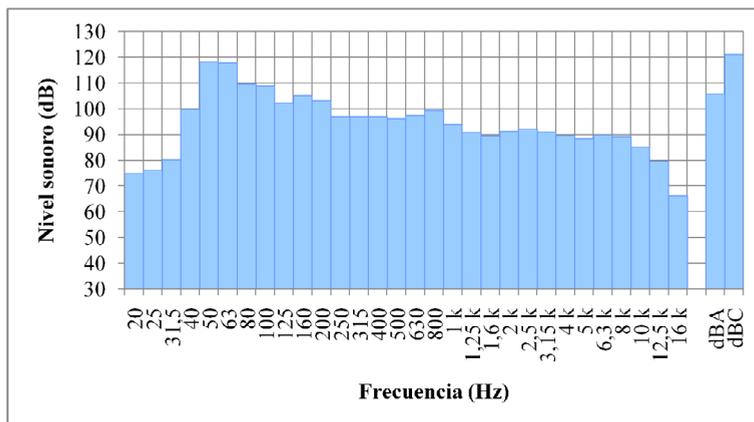
Este ejemplo sirve para afirmar que, en los eventos musicales en grandes espacios abiertos o semiabiertos, los niveles sonoros son similares y que el tiempo máximo de exposición recomendado se supera siempre. Esto conlleva que todos los asistentes van a tener secuelas por estar sometidos a estos elevados niveles sonoros durante varias horas. Para los que tengan un oído más fuerte, supondrá probablemente padecer un TTS, o pérdida temporal de sensibilidad auditiva. Una buena parte sufrirán un PTS, o pérdida permanente de sensibilidad auditiva, de la cual no serán conscientes hasta pasadas varias décadas. En el primer caso, en pocas horas o días, la persona se recupera y no le da importancia. En el segundo caso, no se da cuenta de la pérdida permanente, ya que normalmente solo se recupera una parte de lo perdido y, además, no puede comparar la situación anterior y posterior al evento musical de su oído.

Por último, la figura 6.10 muestra la influencia de frecuentar ambientes sonoros elevados, como las discotecas. Se puede observar como en este caso la afectación es mayor y afecta también a las bandas de baja frecuencia, con pérdidas entre los 3 y los 7 dBHL. Cabe destacar que los casos en los que se frecuenta ocasionalmente las discotecas no tenían una periodicidad clara. La frecuencia iba de una o dos veces al año hasta una vez cada dos meses, aproximadamente. Sin embargo, la fisiología de la persona desempeña un papel importante. Se han encontrado casos que manifiestan asistir frecuentemente a las discotecas y, sin embargo, su oído no reflejaba ningún efecto negativo. También se producía la situación contraria, con casos en que apenas se iba a estos eventos y, sin embargo, su sensibilidad auditiva no era satisfactoria por la edad.



**Figura 6.10.** Comparación de la sensibilidad auditiva entre jóvenes en función de la frecuencia de asistir a eventos sonoros de elevado nivel como las discotecas.

El nivel sonoro en el interior de las discotecas es notablemente elevado, como se muestra en la figura 6.11. Se observa un elemento común en la ecualización sonora en el interior de este tipo de locales, donde se enfatiza mucho las bandas de baja frecuencia entre los 50 y 63 Hz, que corresponden al ritmo musical. En este tipo de actividades, los «subs» no llegan a los 30 Hz, como sí ocurre con los equipos para sonorizar espacios abiertos en los eventos masivos.



**Figura 6.11.** Ejemplo del espectro en frecuencia del nivel sonoro en el interior de una discoteca.

La influencia cultural y fisiológica resulta importante para saber cómo interpretan los sonidos las personas. Por ejemplo, en el estudio realizado en el año 2000 se valoraba la calidad sonora de los sonidos procedentes de vehículos de motor de combustión. Se compararon las respuestas de estudiantes universitarios de España y Japón de edades similares. Se constató que las preferencias de los varones españoles eran muy similares a las preferencias de las féminas japonesas, y viceversa, sin poder encontrar una justificación.

### 6.1.3. La sensación de sonoridad

Un sonido suena más fuerte que otro por uno de estos cuatro motivos:

- El sonido presenta una mayor amplitud de la presión acústica.
- El sonido contiene unas frecuencias que son más audibles.
- El sonido tiene diferente distribución de niveles de presión acústica.
- Una combinación de las anteriores.

En los ejemplos mostrados anteriormente, sorprende que los niveles  $L_{eq}$  sean similares, con espectros de sonido similares, y sin embargo, la sensación sonora (sonoridad) sea muy distinta. Podemos preguntarnos por qué, si los niveles sonoros medidos en ambas sesiones son similares, suenan tan diferentes. Para dar respuesta a esta pregunta y justificar la sensación percibida *in situ*, tenemos que utilizar otros parámetros de medida que permiten valorar los aspectos cualitativos del sonido.

En términos de sonoridad, para conseguir aumentar esta se recurre a amplificar su amplitud. Sin embargo, se puede incrementar la sonoridad alterando la distribución de los niveles sonoros de la señal de audio. Un ejemplo característico lo encontramos con la música electrónica EDM, que tiene unas tasas de compresión de la señal de audio muy elevadas. En estas producciones, todas las señales se generan o se «maquillan» electrónicamente, ajustando sus niveles y el grado de compresión. El caso opuesto es la música clásica, donde se trata de preservar la dinámica natural y el espectro de frecuencia emitido de todos los instrumentos musicales.

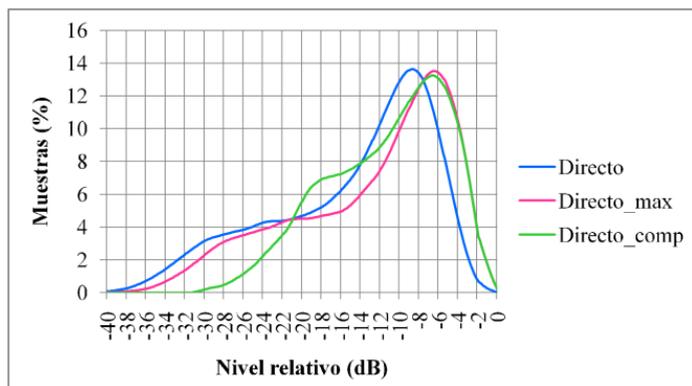
El proceso de maximización del sonido permite mantener los niveles de señal de audio (amplitud), pero aumenta el nivel sonoro. Puede parecer sorprendente, pero una señal maximizada suena más fuerte aunque el vúmetro marque lo mismo. Un ejemplo bien conocido, que puede ilustrar este fenómeno, lo tenemos en la publicidad comercial en los medios de comunicación. Cuando entra la publicidad, el volumen sonoro se incrementa apreciablemente; sin embargo, el nivel de la señal de audio es el mismo. No debe confundirse la maximización con la compresión. La primera mantiene prácticamente intacto el margen dinámico de la señal sonora, mientras que la segunda altera el margen dinámico.

### **6.1.3.1. Incrementar la sonoridad, ¿para qué?**

Todo empezó cuando, pensando en cómo podía hacer para destacar su anuncio de los demás en los medios de comunicación, a un publicista se le ocurrió subir el nivel de audio para captar así la atención del consumidor. La primera solución fue aumentar la amplitud de la señal, pero en todos los medios electrónicos, y especialmente en radiodifusión, hay unos límites de amplitud que no se pueden superar sin saturar al sistema y producir interferencias. Sin embargo, si la señal original se comprime, desplazando hacia la parte alta los niveles, se aumenta la sonoridad. Al principio, pues, se recurrió a la compresión de la señal. Esta compresión es la que en parte explica por qué en televisión la publicidad ofrece siempre un nivel sonoro superior al de la programación. Esta técnica se aplica con frecuencia con la voz humana, ya que la voz tiene una dinámica notable que, si se respeta en la transmisión telemática, suena «flojo»; en cambio, con un «retoque» (compresión) en su dinámica, la voz mantiene unos niveles más estables y con mayor presencia, aunque en ocasiones se abusa excesivamente y propicia que las voces, en una escena de acción trepidante, suenen al mismo nivel que el susurro de una escena amorosa.

6.1.3.1.1. Proceso de maximización de la señal de audio

La maximización consiste en un procesado digital de la señal de audio, más complejo que la compresión. La maximización mantiene prácticamente intacta la dinámica de la señal, pero desplaza muestras hacia la parte alta para aumentar el nivel sonoro. La figura 6.12 muestra la distribución de muestras de la señal sonora original en azul, la señal maximizada en rojo y la señal comprimida en verde (Barti R. , 1999).



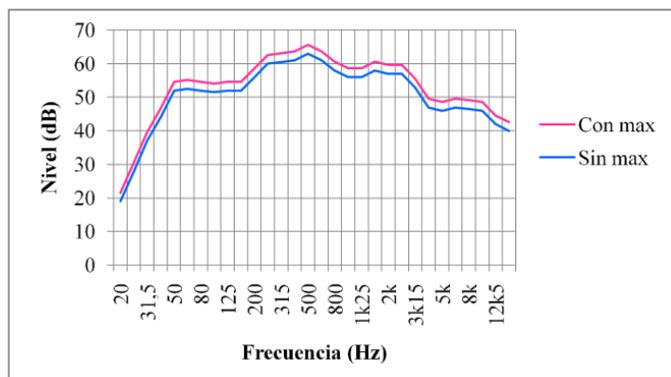
**Figura 6.12.** Distribución de niveles de una señal de audio en tres casos: sin procesado, con maximización y con compresión de audio.

Se observa que el proceso de maximización respeta la forma original de la distribución estadística de niveles, mientras que el proceso de compresión de la señal de audio modifica esta distribución. Con la compresión de audio, la dinámica se ha modificado y el contenido espectral también (curva verde). En cambio, el proceso de maximización consigue mantener la dinámica modificando ligeramente la distribución de muestras. Si se comparan las curvas azul y roja, se observa como el pico de mayor amplitud nos indica que la señal suena la mayor parte del tiempo a ese nivel y con la maximización se aumenta la sonoridad.

La figura 6.13 muestra el espectro sonoro original y el maximizado. Se observa que la gráfica de audio maximizada (en color rojo), tiene exactamente la misma forma espectral que la señal original en color azul. La maximización es un proceso transparente que no altera el contenido espectral. La dinámica original se reduce muy poco (en el caso mostrado: 1,4 dB, valor no perceptible auditivamente).

Para ilustrar una aplicación real de este proceso del cambio del nivel de sonoridad, se muestra parte de un estudio sobre siete cadenas de televisión (llamadas C1 a C7). Aunque el análisis se llevó a cabo con medios analógicos a finales de los años noventa, sirve de ejemplo (Barti R. , 1999). Se analizan diversas tipologías de programas (películas, series, notici-

as, directos, documentales, programas infantiles, concursos y publicidad no corporativa) y se obtienen muestras sonoras de cada uno de ellos que se consideran suficientemente representativas para evaluar su nivel sonoro, distribución de frecuencias y estadística de niveles.



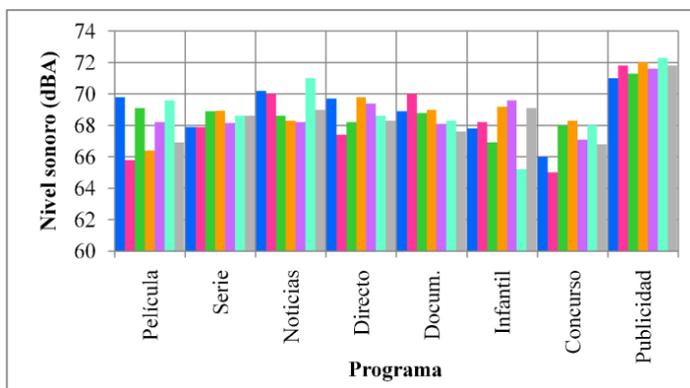
**Figura 6.13.** Espectro en frecuencia para el mismo programa con y sin maximización.

Los niveles emitidos por el receptor de televisión se obtienen ajustando el volumen con un nivel sonoro moderado para medir su nivel de presión acústica, aunque esto no altera los resultados obtenidos, ya que se trata de valorar diferencias entre ellos y no valores absolutos. La tabla 6.1 resume los niveles sonoros promediados para los distintos tipos de programas analizados. Se destaca que la publicidad aparece en todos los casos con mayor nivel de presión acústica.

**Tabla 6.1.** Niveles sonoros  $L_{eq}$  dBA promediados para los distintos programas analizados

| Nivel $L_{eq}$ (dBA) | C1   | C2   | C3   | C4    | C5    | C6   | C7   |
|----------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| <b>Película</b>      | 69,8 | 65,8 | 69,1 | 66,4  | 68,2  | 69,6 | 66,9 |
| <b>Serie</b>         | 67,9 | 67,9 | 68,9 | 68,93 | 68,15 | 68,6 | 68,6 |
| <b>Noticias</b>      | 70,2 | 70   | 68,6 | 68,3  | 68,2  | 71   | 69   |
| <b>Directo</b>       | 69,7 | 67,4 | 68,2 | 69,8  | 69,4  | 68,6 | 68,3 |
| <b>Documental</b>    | 68,9 | 70   | 68,8 | 69    | 68,1  | 68,3 | 67,6 |
| <b>Infantil</b>      | 67,8 | 68,2 | 66,9 | 69,2  | 69,6  | 65,2 | 69,1 |
| <b>Concurso</b>      | 66   | 65   | 68   | 68,3  | 67,1  | 68   | 66,8 |
| <b>Publicidad</b>    | 71   | 71,8 | 71,3 | 72    | 71,6  | 72,3 | 71,8 |

Los niveles sonoros para cada cadena analizada y tipología de programa se muestran en la figura 6.14. Cada color representa una de las cadenas de televisión analizadas. Se puede apreciar como el bloque de películas presenta una gran variabilidad en función del tipo de película visionada.



**Figura 6.14.** Nivel sonoro comparativo de distintas tipologías de programas para las siete cadenas de televisión analizadas.

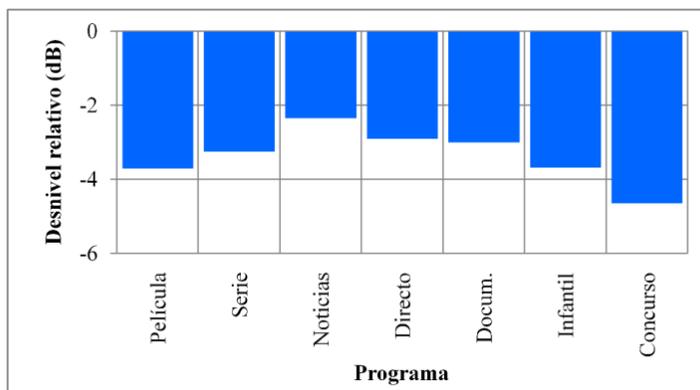
En cambio, las series, siendo de una temática similar, tienen unas variaciones de nivel más contenido. Es destacable también que los concursos suelen presentar en general un nivel sonoro más moderado respecto la media, ya que habitualmente hay más pausas sonoras. A la derecha, se destaca el nivel sonoro de la publicidad para las cadenas analizadas.

Para saber el grado de desnivel entre la publicidad y el resto de programas, la figura 6.15 muestra los desniveles medios calculados para cada tipología de programa. Se puede observar que los concursos y las películas son los programas que, en promedio, ofrecen un mayor desnivel respecto a la publicidad.

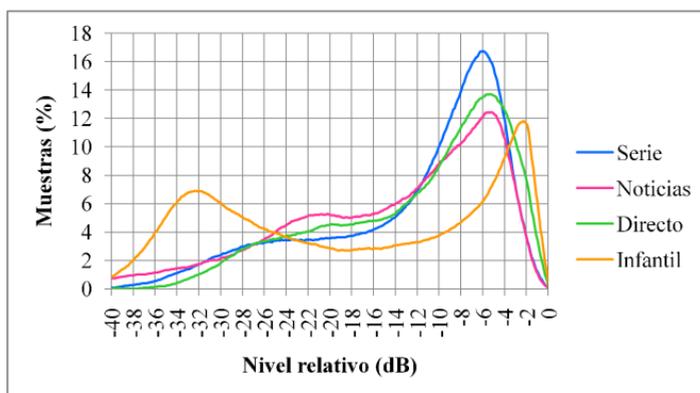
La causa de estos desniveles sonoros se encuentra en la distribución estadística de los niveles de la señal de audio. En función de la distribución de estas muestras, el sonido puede sonar más o menos fuerte, manteniendo el nivel de la señal. La forma de la distribución de las muestras define el perfil sonoro del programa. La figura 6.16 muestra el ejemplo para el canal 3.

Se puede observar como los distintos programas presentan el nivel máximo de muestras cercano a unos  $-6$  dB del máximo nivel sonoro. En contraposición, podemos ver que los programas infantiles de la cadena en promedio tienen dos picos: el de nivel más elevado ( $-2$  dB) corresponde a los diálogos, y el segundo pico ( $-32$  dB), a la música

y los efectos sonoros que se producen puntualmente, que quedan en un segundo plano sonoro. En general, cuanto mayor sea el área bajo la curva en la parte más elevada, mayor será el nivel sonoro, aunque hay que tener en cuenta el contenido en frecuencia. Las distintas cadenas utilizan distintos criterios para controlar el nivel sonoro.

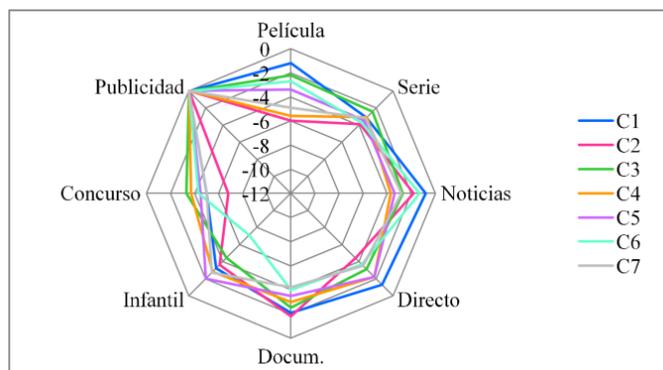


**Figura 6.15.** Desnivel sonoro promedio relativo de las siete cadenas de televisión entre las distintas tipologías de programas analizados y la publicidad.



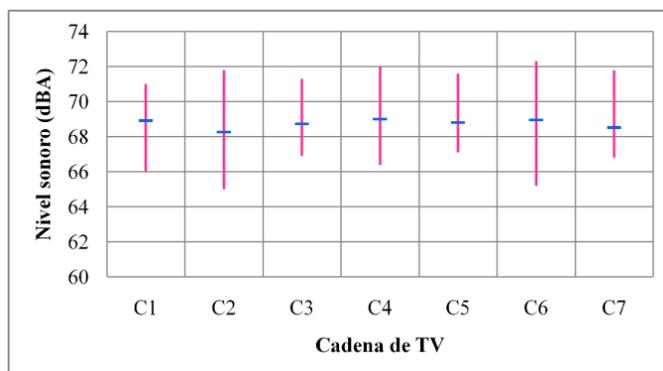
**Figura 6.16.** Distribución estadística media de los distintos programas analizados para el canal 3.

La figura 6.17 muestra las variaciones de nivel relativo para cada cadena de televisión y los distintos programas analizados. Se puede observar claramente que todos los programas presentan, en general, un nivel sonoro inferior al de la publicidad.



**Figura 6.17.** Variación de los desniveles relativos de los programas analizados.

Los desniveles entre programas, y entre los programas y la publicidad, se resumen gráficamente en la figura 6.18. La línea roja muestra la distancia entre el valor mínimo y el máximo, indicando el margen dinámico sonoro respecto al valor medio indicado con el símbolo en color azul. Los desniveles entre publicidad y el resto de programación se deben a que el tratamiento de la señal en la publicidad tiene un proceso de maximización, mientras que el resto de programación, en general, no.

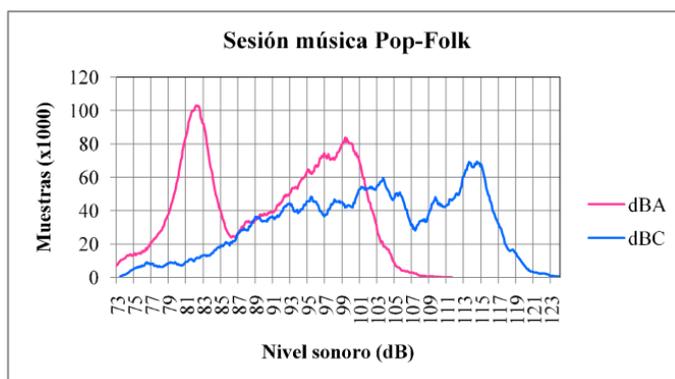


**Figura 6.18.** Desniveles sonoros promediado entre programas y valor medio para cada canal analizado.

### 6.1.3.1.2. Distribución estadística de la música electrónica

La música electrónica trata de obtener el máximo nivel de sonoridad. Es destacable el hecho de que los registros de las frecuencias graves están muy procesados para ob-

tener la conocida «patada en el estómago» cuando se reproduce la música con equipos de sonido profesionales de altas prestaciones. En los casos mostrados, utilizando la distribución estadística de niveles, podemos comprobar el margen dinámico de la sesión. La figura 6.19 muestra la distribución estadística de niveles sonoros para la sesión de música pop-folk.

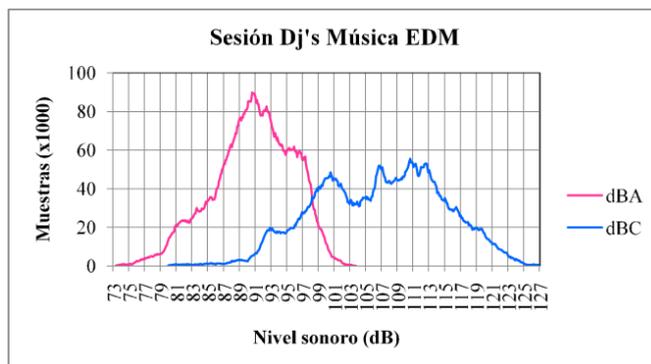


**Figura 6.19.** Distribución estadística de una sesión de pop-folk.

Se observa un pico más destacado a la derecha con niveles sonoros de 113 a 115 dBC, que corresponde a los graves. El segundo pico más llano se sitúa sobre los 101 a 104 dBC y se corresponde con la voz del cantante y otros instrumentos musicales. Nótese que, para la música electrónica en general, los niveles más elevados se corresponden con la baja frecuencia. A partir de este gráfico, podemos constatar que los niveles sonoros durante el festival fueron bastante variados, alternando niveles sonoros elevados (ritmo musical) con niveles más moderados, lo que produce una sensación de sonoridad «soportable». En este caso, la forma de la distribución del nivel sonoro nos indica que, la mayor parte del tiempo, el nivel sonoro oscila entre los 75 y los 120 dBC aproximadamente, es decir, un margen dinámico de unos 45 dB. La figura 6.20 muestra la distribución estadística para la sesión de música EDM con sesión de diversos DJ.

La forma de la distribución de muestras de nivel es distinta al caso anterior y con un menor margen dinámico. El pico máximo se produce para un nivel de 110 a 113 dBC, que se corresponde con la baja frecuencia (ritmo musical). Hay un segundo pico situado entre 99 y 101 dBC, aproximadamente, que se corresponde con la voz del DJ y con el resto de instrumentos musicales. En este caso, la forma de distribución del nivel sonoro nos indica que la mayor parte del tiempo el nivel sonoro oscila entre los 91 y los 124 dBC, es decir, un margen dinámico de 33 dB. Esta diferencia en la distribución de muestras de nivel es la que justifica que la sonoridad percibida sea notablemente superior.

Recordemos que 10 dB de desnivel hace que el sonido de mayor nivel «suenen» el doble de fuerte que el otro.



**Figura 6.20.** Distribución estadística de una sesión EDM con diferentes DJ.

En las figuras 6.19 y 6.20 se muestran las distribuciones estadísticas obtenidas con dBC y con dBA, para ver la diferencia. Recordemos que la ponderación C modifica ligeramente los niveles con las frecuencias, mientras que la ponderación A altera notablemente los niveles para bajas y altas frecuencias. A los niveles sonoros a que se somete el oído en las sesiones musicales multitudinarias, lo correcto es usar los dBC, que reflejan mejor las sensaciones percibidas. Los dBA deben dejarse, en este caso, para cumplir con los límites legislativos.

Con vistas a la valoración teórica del tiempo máximo de exposición para no sufrir pérdida auditiva, en el caso de la sesión de pop-folk con un nivel  $L_{eq} = 96,4$  dBA, sería de 34 minutos y 46 segundos, aproximadamente. Para la sesión de DJ EDM con un nivel  $L_{eq} = 97,7$  dBA, sería de 25 minutos y 47 segundos, aproximadamente.

#### 6.1.4. Nivel y ritmo sonoro esperados en algunas actividades

Hacer ejercicio físico regularmente permite al cuerpo humano mantener una forma física adecuada. El ejercicio físico mejora tanto física como mentalmente la salud. Estar en un ambiente sonoro agradable mientras se realiza una tarea puede ayudar a la relajación física y, sobre todo, mental, y eso puede redundar en una mejor experiencia. Sin embargo, algunas actividades se hacen acompañadas de música. Una de las actividades más habituales que se realiza con música es el ejercicio físico. El *spinning*, correr o el ciclismo son unos ejercicios cardiovasculares excelentes, que queman muchas calorías, y que se han hecho muy populares, especialmente los practicados *indoor*.

En estas actividades, suele haber una música ambiente con un ritmo que «ayuda» a superar el esfuerzo que requiere el ejercicio. El nivel sonoro no sigue un criterio preestablecido y cada instructor pone el que considera adecuado. La música puede tener efectos positivos cuando se escucha al mismo tiempo que se realiza actividad física (Wininger & Pargman, 2003). Por ejemplo, la música es utilizada a menudo por quienes participan en actividades recreativas y por pacientes que se recuperan de un accidente cerebrovascular u otro problema cardiovascular y que participan en programas de rehabilitación (Mandel, Hanser, Secic, & Davis, 2007) (Seonghee & Miyong, 2007).

Los efectos positivos de la música pueden surgir de varias maneras. La música podría permitir que una carga de trabajo en particular sea más aceptable y percibida como menos ardua, pero también podría significar que las personas eligen hacer más trabajo sin una mayor sensación de esfuerzo. A menudo, se considera que la música actúa como un «distractor» en actividades que requieren concentración mental y, para actividades físicas de baja intensidad, reduce la percepción del trabajo, la fatiga y la incomodidad del individuo. Por otro lado, escuchar una pieza musical favorita mientras se hace el ejercicio físico podría disminuir la influencia del estrés causado por la fatiga, aumentando así el nivel de «comodidad» al realizar el esfuerzo (Yamashita & Sugawara, 2006) (Edworthy & Waring, 2007). Además, diversos estudios revelan que el nivel sonoro debe ser el adecuado para permitir ese sobreesfuerzo con una sensación de confort físico (Nixon, Parker, Elwell, & Pemberton, 2022).

La música más rápida, ya sea por el tempo intrínseco de la música o por haber aumentado el tempo artificialmente, permite realizar el ejercicio físico a un mayor ritmo de trabajo, con un mayor efecto fisiológico y respuestas subjetivas más positivas que la música más lenta; estos efectos se deben a alguna combinación de efectos de motivación y de distracción. Estos hallazgos son relevantes para aquellos que desean mejorar su régimen de entrenamiento. Con música más rápida se obtiene más trabajo realizado en un período determinado (Waterhouse, Hudson, & Edwards, 2010).

Respecto a las actividades que requieren concentración mental (por ejemplo, leer o estudiar), el sentido común tiende a aconsejar realizar estas tareas con el mayor silencio posible. Podemos observar que las bibliotecas suelen tener un nivel de ruido ambiente muy moderado. No obstante, es muy común escuchar que hay personas, generalmente estudiantes, que manifiestan que estudian escuchando música. Partiendo de la base de que la tarea de estudio requiere una atención total por parte del cerebro, y que nuestro cerebro solo puede hacer una tarea que requiere su máxima atención, llegamos fácilmente a la conclusión de que no es posible escuchar música mientras se está estudiando. La función de la música es enmascarar los ruidos que pueden producirse en la sala donde se encuentra el estudiante, que pueden distraer y romper el estado de concentración. El estudiante, cuando está inmerso en el estudio, realmente no escucha la música, que queda

en un segundo plano. Esto es especialmente importante en el diseño de espacios para el estudio, donde un silencio «excesivo» no es la mejor solución. El ambiente sonoro debe ser el adecuado, no solo en nivel, sino en distribución de frecuencia, para que este actúe a modo de «protección» contra los pequeños ruidos que se producen habitualmente en estos espacios (paso de hojas, escritura, caída de algún objeto, susurro, etc.).

### 6.1.5. Efectos del ruido de aerogeneradores

Un aerogenerador está formado esencialmente por tres partes: *a)* el rotor donde se fijan las palas sobre el eje; *b)* el compartimento donde va alojado el generador eléctrico y toda la parte mecánica y electrónica de control, y *c)* el mástil. La mayoría de aerogeneradores son de tres palas, que mecánicamente es el modelo que ofrece mayor rendimiento y estabilidad. El ruido generado por estos generadores tiene, por un lado, una parte mecánica (con la caja de cambios y los mecanismos de control) y, por otro lado, la aerodinámica de las palas. La figura 6.21 muestra la zona donde se produce el ruido de palas en un aerogenerador (Oerlemans & Sijtsma, 2007).

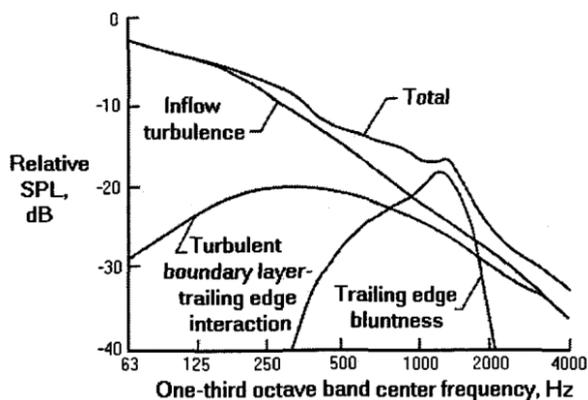


**Figura 6.21.** Ejemplo de distribución del ruido de un aerogenerador de 850 KW.

El tamaño del aerogenerador está directamente relacionado con la potencia eléctrica que puede generar. El ruido generado por los parques eólicos debe evaluarse a medias y largas distancias, donde pueden existir zonas habitadas. Además de la atenuación por distancia, entran en consideración otros factores como la absorción atmosférica, efectos

de la orografía del terreno, efecto del tipo de suelo, las condiciones meteorológicas y su influencia en la curvatura de la propagación del ruido. En ocasiones, el ruido percibido a cierta distancia se corresponde con aerogeneradores que no son visibles, pero sí perceptibles acústicamente.

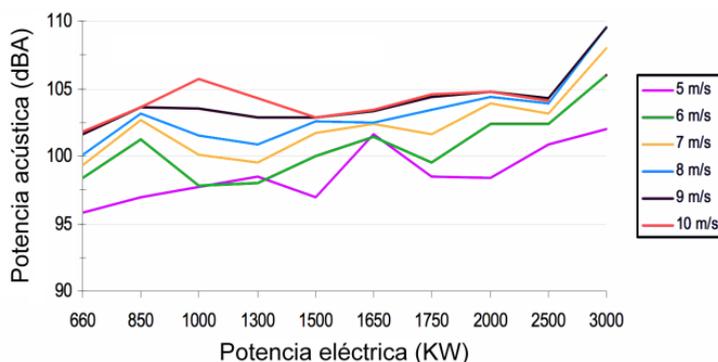
El ruido de naturaleza aerodinámica ha evolucionado en las últimas generaciones de aerogeneradores. Los aerogeneradores de última generación son mucho más potentes y a su vez mucho más silenciosos, gracias a la mejora de los materiales y al diseño aerodinámico de las palas. Ese ruido se asemeja mucho al ruido blanco. La figura 6.22 muestra los diferentes ruidos aerodinámicos que produce un aerogenerador (Fégeant, 2001).



**Figura 6.22.** Contribuciones relativas de las componentes aeroacústicas al nivel de ruido total (Fégeant, 2001).

El perfil de salida de la pala (parte más fina) y el extremo de la pala son las zonas donde se generan más turbulencias y, por tanto, más ruido. El diseño de las palas ha mejorado bastante en los últimos años, reduciendo estos niveles de ruido y mejorando el rendimiento para extraer potencia del viento.

Una de las técnicas que ofrece mejores resultados consiste en utilizar bandas rugosas que se colocan sobre la pala. Su objetivo es generar unas turbulencias que van a minimizar el ruido generado en el perfil de salida de la pala. Estas bandas se fijan en la parte inferior de la pala (cerca del eje) y se aplica en 1 m de longitud, aproximadamente. Las pruebas experimentales presentan una reducción del nivel sonoro de 10 dBA de la potencia acústica radiada por el aerogenerador. La potencia acústica radiada por un aerogenerador en función de la potencia eléctrica se muestra en la figura 6.23.

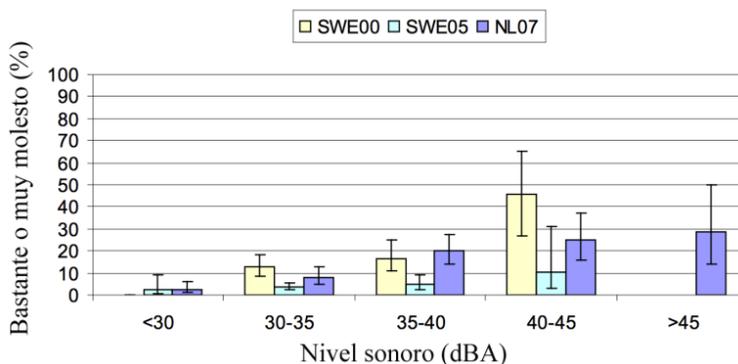


**Figura 6.23.** Potencia acústica radiada en función de la potencia eléctrica generada para aerogeneradores con distintas velocidades de viento.

Las componentes de baja frecuencia radiadas por los aerogeneradores se producen principalmente hacia la parte posterior del aerogenerador, es decir, en dirección favorable del viento. Los niveles se pueden percibir a unos centenares de metros. Según la literatura científica, comprende las frecuencias entre 10 Hz y 200 Hz y ocasionalmente, entre 10 Hz y 30 Hz. También se describen fenómenos de modulaciones lentas del nivel sonoro. Algunos estudios trabajan con el margen de muy baja frecuencia, entre 1 Hz y 20 Hz y en ocasiones 30 Hz. La percepción de muy bajas frecuencias es posible a niveles más altos que los niveles producidos por las turbinas eólicas. Ante esta evidencia, la muy baja frecuencia producida por los aerogeneradores no debería ser un problema. Cuando las palas giran, se produce un sonido discontinuo, llamado *swooshing*, por la interacción entre las palas y el mástil. Este sonido se sitúa entre 500 Hz y 1 kHz. Al tener elementos de grandes dimensiones, los aerogeneradores pueden producir muy bajas frecuencias con niveles que se sitúan en general entre 50 y 70 dB. Estos niveles están por debajo del umbral perceptible a estas frecuencias. Las muy bajas frecuencias tienen unas longitudes de onda muy grandes, que les permite llegar a largas distancias y, al llegar a una vivienda, pueden atravesar fácilmente las paredes, aspecto que produce una contaminación sonora en interiores. No existen evidencias que muestren efectos fisiológicos producidos por las muy bajas frecuencias generadas por los aerogeneradores. En algunos casos, es posible percibir y escuchar estos sonidos, pero sus efectos son similares a los de otros sonidos audibles.

Para ilustrar los efectos sobre la salud, se muestra un documento basado en datos de dos estudios suecos y un estudio holandés en los que la salud y el bienestar expresados por los propios encuestados se relacionaron con los niveles de presión acústica (dBA) en el exterior de la vivienda de cada encuestado. El estudio muestra que el principal efecto adverso fue la molestia por el sonido. La prevalencia de la molestia del ruido aumentó

con el aumento de los niveles de presión sonora. Además, la alteración del sueño estaba relacionada con el ruido de los aerogeneradores. La proporción de residentes que constataron trastornos del sueño debido al ruido aumentó significativamente a niveles de sonido cercanos a los recomendados como los niveles más altos aceptables para las nuevas instalaciones (Pedersen E. , 2009). La figura 6.24 muestra la relación entre el nivel sonoro (dBA) y el grado de molestia de la población. No se encontró relación entre el nivel sonoro (dBA) y las variables de medida de los síntomas de estrés.



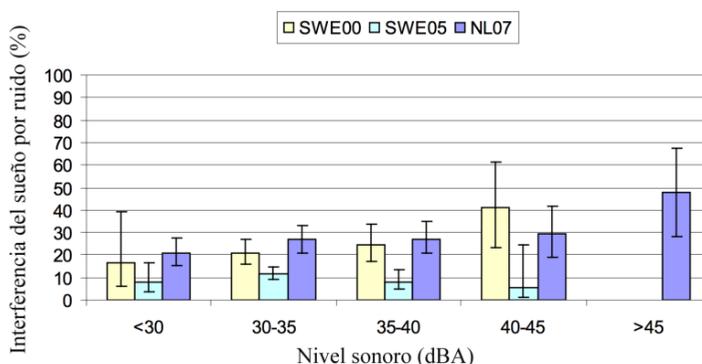
**Figura 6.24.** Relación entre los niveles de presión sonora (dBA) ( $L_{eq}$  a una velocidad del viento de 8 m/s y 10 m sobre el suelo) y la proporción de encuestados bastante o muy molestos por el ruido de los aerogeneradores en tres estudios: SWE00 (n = 341), SWE05 (n = 754) y NL07 (solo encuestados que no se beneficiaron económicamente de los aerogeneradores; n = 586).

Respecto a la interrupción del sueño, la figura 6.25 muestra los resultados obtenidos por los tres estudios.

El estudio concluye que se encuentra una relación entre el nivel sonoro (dBA) y el grado de molestia y la interrupción del sueño. Sin embargo, no se encontró relación entre el nivel de estrés y el nivel sonoro (dBA). Por otro lado, se observó que la actitud negativa ante el sonido de los aerogeneradores aumentaba hasta trece veces el grado de molestia. Un pequeño porcentaje de los encuestados indicaron estar muy molestos con niveles inferiores a los 35 dBA. No se encontró relación entre el contenido de muy baja frecuencia y los efectos sobre la salud.

Por otro lado, no se ha demostrado que los residentes en entornos urbanos fueran más vulnerables o se adaptaran al ruido de muy baja frecuencia de los aerogeneradores que los residentes en zonas rurales. Una razón podría ser la existencia de un conjunto

complejo de parámetros socioeconómicos en las áreas urbanas. Las percepciones de ruido también podrían ser moderadas por los aspectos visuales (Aletta, Masullo, Maffei, & Kang, 2016) (Bangjun, Lili, & Guoqing, 2003) (Maffei, y otros, 2013) y también por otros factores como la presencia de vegetación, que ofrece aspectos y valoraciones positivas sobre la percepción del ruido ambiental (Van Reterghem, 2019).



**Figura 6.25.** Relación entre los niveles sonoros (dBA) ( $L_{eq}$  a una velocidad del viento de 8 m/s y 10 m sobre el suelo) y la proporción de encuestados perturbados durante el sueño por el ruido en tres estudios: SWE00 (n = 341), SWE05 (n = 746) y NL07 (solo encuestados que no se beneficiaron económicamente de los aerogeneradores; n = 593).

También resulta importante el nivel de ruido de fondo existente en la zona. Se encontró una relación entre el nivel de ruido de aerogeneradores y la molestia percibida, moderada por la edad y el grado de educación de las personas (Qu & Kang, 2019). El ruido de aerogeneradores se asocia por los afectados con algunos problemas de salud, como dolores de cabeza, náuseas y molestias en los oídos, pero no se relacionó directamente con la alteración del sueño. Se concluye que la sensibilidad al ruido, las actitudes hacia la energía eólica y la visibilidad de los aerogeneradores influyen significativamente en la valoración de la propia salud (Qu & Tsuchiya, 2021).

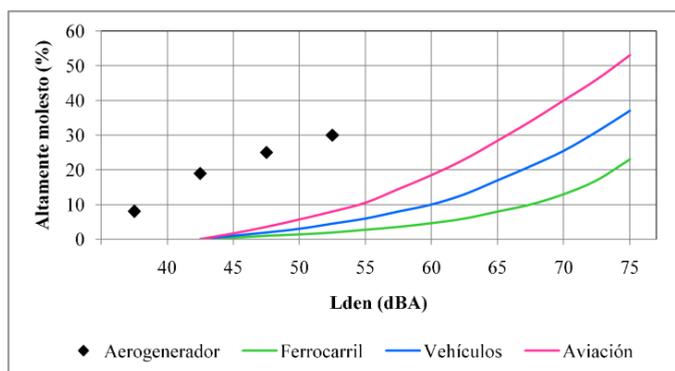
Algunos estudios sobre los efectos de las muy bajas frecuencias radiadas por los grandes aerogeneradores muestran una relación entre su presencia y la dificultad para conciliar el sueño, comparando población expuesta con población no expuesta situada a mayor distancia de los aerogeneradores. Sin embargo, hay otros estudios que concluyen que las muy bajas frecuencias radiadas por los aerogeneradores no tienen consecuencias para la salud. Esta disparidad de resultados evidencia la gran dificultad para realizar unas mediciones acústicas que reflejen la realidad del problema. En todos los casos se usan

micrófonos de 1/2", lo que limita notablemente la sensibilidad a bajos niveles sonoros, y esa podría ser una de las causas de valoraciones contradictorias entre distintos estudios. Además, como ya se ha apuntado, la actitud personal hacia los aerogeneradores tiene una gran importancia en su valoración. La otra causa puede estar relacionada con el indicador utilizado, en su inmensa mayoría el  $L_{Aeq}$ , y este es otro elemento que impide obtener valoraciones objetivas que coincidan con la realidad percibida por las personas.

### 6.1.5.1. Síndrome de ruido de aerogenerador

Los niveles de ruido radiado por los aerogeneradores tienen efectos adversos por sus componentes de muy baja frecuencia, según las personas afectadas. Sin embargo, no hay un reconocimiento de la comunidad médica que avale estos síntomas que darían lugar a una enfermedad «específica». En algunos casos, los síntomas sobre la salud están probablemente asociados con la molestia.

Los niveles sonoros que recibe el cuerpo humano no pueden producir niveles sonoros dentro del cuerpo superiores a los propios generados por el cuerpo. La similitud entre los síntomas de la molestia del ruido y los del «síndrome de la turbina eólica» indica que este «diagnóstico» no es un efecto fisiopatológico, sino un ejemplo de los conocidos efectos de estrés de la exposición al ruido, prácticamente de cualquier tipo, que presenta una pequeña parte de la población. De acuerdo con las observaciones de las personas afectadas, el grado de molestia, comparado con el ruido producido por medios de transporte (Miedema & Oudshoorn, 2001), se muestra en la figura 6.26. Como se puede observar, con niveles  $L_{den}$  de ruido de aerogeneradores de 45 dBA, se produce un 20% de molestia, equivalente a  $L_{den} = 67$  dBA de ruido de tráfico.



**Figura 6.26.** Grado de molestia percibido por afectados por el ruido de aerogeneradores comparado con el grado de molestia producido por los tres medios de transporte más habituales.

Estos resultados tan negativos del ruido de aerogeneradores pueden tener su origen en una actitud negativa hacia los aerogeneradores (Cummings, 2009).

### 6.1.5.2. Ejemplos de niveles sonoros producidos por aerogeneradores

Uno de los retos más importantes es evaluar el nivel sonoro radiado por un aerogenerador sobre una zona habitada cercana, debido a la gran variabilidad de nivel sonoro que puede producirse en función de la velocidad del viento y de su dirección. Seguidamente, se muestran ejemplos de nivel sonoro medido en diferentes situaciones.

La tabla 6.2 muestra los resultados obtenidos en el ejemplo de nivel sonoro. Se muestran los resultados de siete puntos de medida. Cada punto refleja el nivel sonoro medido en exterior de un domicilio. Todos los valores mostrados corresponden al nivel de ruido perceptible en período nocturno. Las mediciones son en continuo durante dos noches. En situación nocturna, los niveles de ruido ambiente son más bajos y el nivel de ruido radiado con velocidades de 5-6 m/s se acerca a los más elevados del aerogenerador.

**Tabla 6.2.** Niveles sonoros correspondientes al ejemplo de nivel sonoro

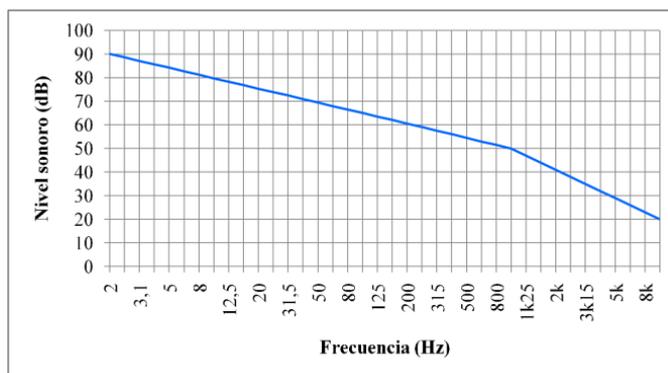
| Distancia al aerogenerador (m) | Número de aerogeneradores influyentes | Velocidad aire (m/s) altura 10 m | Nivel sonoro (dBA) |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 430                            | 2                                     | 6                                | 38                 |
| 540                            | 1                                     | 6                                | 34                 |
| 540                            | 1                                     | 6                                | 39                 |
| 650                            | 1                                     | 4                                | 31                 |
| 690                            | 2                                     | 6                                | 37                 |
| 1.100                          | 3                                     | 6                                | 32                 |
| 1.300                          | 5                                     | 5                                | 33                 |

En cuanto al espectro en frecuencia radiado, en la figura 6.27 se muestra el perfil típico para un aerogenerador de 1,3 MW a 100 m de distancia (*downwind*) y se observa que los niveles sonoros están por debajo del umbral audible (según ISO 226).

### 6.1.6. Efectos indirectos del sonido sobre el cuerpo humano

El sonido no solo afecta al sentido auditivo, como ya se ha comentado, sino que puede afectar a otros órganos internos del cuerpo humano. Los estudios llevados a cabo en las décadas de los cincuenta a los setenta, en los que se experimentaba en laboratorio

sobre los efectos que producía someter al cuerpo humano a elevados niveles sonoros, mostraban alteraciones sobre el ritmo cardíaco, aumento de la presión sanguínea, mayor densidad de la sangre, alteraciones sobre la visión y, en casos extremos, alteraciones del sentido del equilibrio. En todos los casos, los niveles sonoros fueron muy elevados, por encima de los 95 dBA. Sin embargo, no hay que aplicar niveles sonoros tan elevados para conseguir efectos sobre determinados órganos del cuerpo humano.



**Figura 6.27.** Perfil típico del nivel sonoro a 100 m de distancia producido por un aerogenerador de 1,3 MW.

Los efectos del ruido sobre la población tienen unas consecuencias sobre la salud que van desde los más inocuos hasta los de elevado riesgo, incluida la muerte. Por fortuna, el número de personas afectadas por estos trastornos está inversamente relacionada con la gravedad de la afectación. Así, los efectos más inocuos pueden afectar a una gran parte de la población, mientras que los casos más graves se manifiestan sobre un porcentaje más reducido de la población. La figura 6.28 resume este concepto (Babisch, 2002).

Es posible distinguir los efectos que se producen a corto plazo o a medio/largo plazo. Las molestias, las alteraciones del sueño y las dificultades en concentrarse para realizar una tarea se consideran efectos a corto plazo, ya que se manifiestan de una forma bastante rápida por parte de las personas. Los efectos cardiovasculares y los efectos sobre las capacidades cognitivas aparecen bajo un cuadro de exposición crónica, y por tanto, se consideran como efectos a medio/largo plazo (OMS 2017).

Los efectos mejor documentados que el ruido produce sobre la salud están relacionados con la molestia, las alteraciones sobre el sueño, los efectos sobre el sistema cardiovascular y los trastornos en el aprendizaje. Todos ellos se encuentran fuertemente relacionados.



Figura 6.28. Esquema de los efectos no audibles producidos por el ruido.

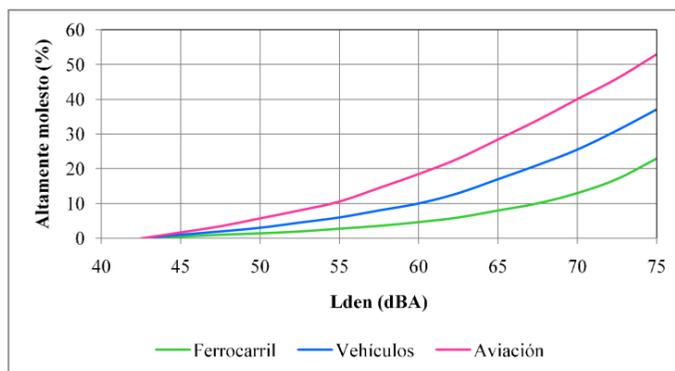
#### 6.1.6.1. La molestia producida por el ruido

Según la OMS, la molestia se puede definir como una sensación de disconfort y una sensación de desagrado, provocadas por un elemento del ambiente donde la persona reconoce la capacidad de afectación sobre su salud. La llamada *molestia sonora* es la sensación que se manifiesta en una dificultad en realizar las tareas cotidianas, llevando a cuadros de irritación y fatiga que desembocan en agotamiento y sufrimiento psicológico y que pueden provocar conductas negativas (como la agresividad).

Cada persona tiene su propia percepción del sonido. La perturbación que siente la persona afectada es el resultado de factores relacionados con el ruido soportado (intensidad del sonido, nivel del ruido de fondo percibido, repetitividad del ruido, espectro, duración), pero también de factores contextuales e individuales como la hora del día en que se produce el ruido, la naturaleza del ruido, la imagen positiva o no que la persona tiene de la fuente sonora, su memoria sonora personal y sus hábitos socioculturales, su edad, etc. El ruido no elegido o deseado genera en quien lo sufre un estado altamente perturbador, especialmente cuando no es posible detenerlo. Si se prolonga, se convierte en una fuente de estrés importante que conduce, en la mayoría de los individuos, a un rápido deterioro del comportamiento y de su salud física y mental.

La figura 6.29 muestra el porcentaje de personas altamente molestas por ruido procedente de las tres fuentes de ruido de transporte principales: aviación, tráfico de ve-

hículos y ferrocarril (Miedema & Oudshoorn, 2001). Como se puede observar, para el mismo nivel sonoro, el ruido de aviación produce siempre mayor grado de molestia, mientras que el ruido procedente del ferrocarril se considera siempre el menos molesto. Esta circunstancia, totalmente subjetiva, se debe a que el ruido procedente del ferrocarril siempre lleva asociada una periodicidad y una duración del evento (paso del tren) limitada, aspectos que reducen la sensación de molestia.



**Figura 6.29.** Porcentaje de personas altamente molestas por ruido de aviación, vehículos y ferrocarril. Las curvas fueron obtenidas para adultos.

Nótese que no es solo una cuestión del nivel sonoro, sino de su duración. Un sonido con un nivel sonoro bajo puede parecer más inocuo que uno con más nivel sonoro, pero si el primero tiene una duración notable, puede llegar a ser más molesto o perjudicial. Un ejemplo bien conocido es el ruido que produce la lavadora del vecino, que siempre se considera más molesto que el propio a pesar de tener este último mayor nivel sonoro.

### 6.1.6.2. Efectos sobre el sueño

El sueño es una necesidad biológica esencial para mantener el funcionamiento óptimo del cuerpo humano. El ruido altera tanto la calidad como la duración del sueño reparador. Cuando un sonido altera alguna actividad vital, como puede ser dormir, la reacción de la población varía en función de la procedencia del sonido. Si, por ejemplo, se considera el ruido procedente de la calle y el sonido procede de los vehículos que circulan, en general hay una mayor tolerancia. Aunque en algún momento nos pueda llegar a molestar, el ruido de vehículos se considera *per se* un ruido propio de la ciudad y, por tanto, un mal menor de la vida en una urbe. Si el sonido que nos llega de la calle no es el tráfico, sino de un grupo musical, la reacción probablemente no sea la misma.

Sin embargo, cuando el sonido procede de una actividad y estamos en casa, en general se considera que nuestra vivienda tiene un cierto grado de aislamiento y es la actividad la que tiene que evitar que el sonido llegue hasta el interior de nuestro hogar. En este sentido, hay una dificultad añadida con las actividades musicales: la reproducción de música electrónica conlleva un marcado ritmo musical, que suele llegar con facilidad a los domicilios más cercanos sin ser invitado. El ritmo musical es fácilmente detectable por el sentido auditivo, incluso con niveles sonoros inferiores al ruido ambiente. Una vez detectado, nuestro cerebro buscará incesantemente la cadencia rítmica. Incluso cuando, por agotamiento, la persona afectada se duerme, se despertará en cuanto cese el ritmo musical. No es el nivel, sino la cadencia rítmica lo que resulta tan molesto.

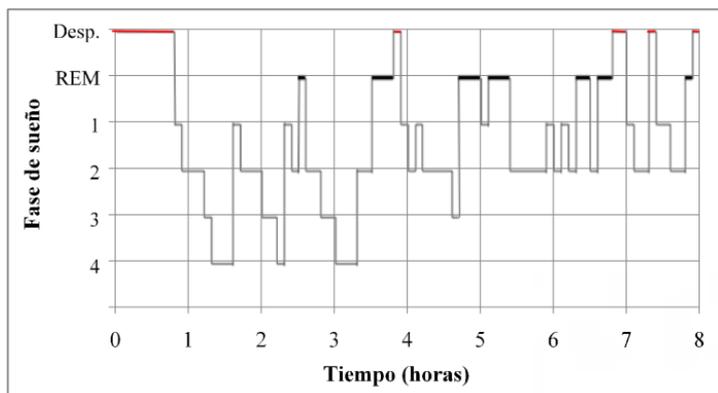
Por otro lado, el ritmo está formado por notas de baja frecuencia (situadas entre 40 y 60 Hz, aproximadamente) que pueden atravesar las estructuras constructivas con mucha facilidad. En la música electrónica, el grado de compresión de las bajas frecuencias es muy notable y esto aumenta la energía en estas frecuencias y, por tanto, la capacidad de penetración de las ondas sonoras a través de las estructuras. Estos sonidos quedan realzados en las proximidades de las esquinas o de las paredes de una sala debido a la presencia de los modos propios; por ello, es aconsejable alejarse de estas zonas para minimizar su efecto. Nótese que, cuando dormimos, por lo general nuestra cabeza está a pocos centímetros de la pared y, sin embargo, cuando se mide el nivel sonoro, el punto de medida se sitúa a más de 1 m de las paredes. Obviamente, los resultados obtenidos no van a reflejar la percepción sonora de los residentes. Cerrar las ventanas, esperando que el sonido exterior disminuya, tampoco es la solución. De hecho, con ventanas abiertas el ritmo se percibe aparentemente con menor nivel, ya que el ruido ambiente procedente del exterior puede ayudar a «tapar» parcialmente el ritmo musical y dar la sensación de que el ritmo musical se «oye» menos.

Los cuadros más graves de irritabilidad, estrés y angustia de las personas afectadas se producen en estas circunstancias. El no poder mitigar el nivel sonoro percibido genera un efecto negativo en la salud de los afectados.

El caso más conocido y experimentado se produce cuando una persona está expuesta a un sonido no deseado durante el período de descanso nocturno. Los sonidos (aunque sean de baja intensidad) escuchados cuando deseamos dormir despiertan la «curiosidad acústica» del sentido auditivo. Este mecanismo va a impedir que podamos dormirnos con facilidad, ya que el cerebro nos «avisa» de que hay un «ruidito» y, si además este es rítmico, es peor.

En la figura 6.30 se muestra un ejemplo de la fase de sueño de una persona joven donde el ruido ha alterado las distintas fases. El ruido ha provocado distintas interrupciones del sueño, llegando a despertar el paciente (trazos de color rojo). Las fases REM

corresponden a los movimientos rápidos del ojo antes de iniciar la fase 1 del sueño. La fase 4 se corresponde con el sueño profundo o reparador.



**Figura 6.30.** Hipnograma de un adolescente después de una noche perturbada por ruido. La eficacia del sueño mostrada es del 83 %.

Como se puede observar, el tiempo de fase 4 es insuficiente, lo que produce un sueño de baja calidad que puede tener a corto plazo graves repercusiones sobre la vida cotidiana, favoreciendo estados de somnolencia durante el día, baja atención y elevado tiempo de reacción, que incrementa el riesgo de accidente al desplazarse al lugar de trabajo, por ejemplo.

Es importante destacar que, entre las respuestas autónomas biológicas del cuerpo, no existe la función de habituación al ruido con el tiempo. Cabe recordar que lo que genera alerta al sentido auditivo y por tanto, «despierta» a las personas no es el nivel, sino el desnivel sonoro.

La relación entre el ruido nocturno y los efectos en la salud de la población, según la OMS, se divide en cuatro intervalos de nivel sonoro exterior  $L_{eq}$  durante la noche. Cuando el nivel de ruido es  $< 30$  dBA, no hay efectos biológicos de importancia considerable. Los efectos primarios sobre el sueño comienzan a aparecer en el nivel de 30-40 dBA, en el que los efectos nocivos afectan principalmente a grupos vulnerables de pacientes. Estos efectos se vuelven más graves para niveles de 40-55 dBA y los grupos vulnerables se ven muy afectados en esta etapa. Los efectos más adversos para la salud ocurren frecuentemente con un alto porcentaje de la población más molesto por el ruido de más de 55 dBA (Hume, 2010). Los niveles sonoros indicados corresponden a la situación de descanso nocturno, cuando es necesario tener un ambiente sonoro adecuado con niveles

muy moderados y sin cambios bruscos de nivel. Estos niveles son totalmente inocuos durante la actividad diaria.

#### 6.1.6.2.1. Cantidad de sueño

Dormir poco o mal está relacionado con un mal funcionamiento del resto de las funciones fisiológicas. Entre otros efectos, aumenta la presión arterial y la resistencia a la insulina, además de aumentar la probabilidad de sufrir un infarto cardíaco. Por este motivo, la falta de un sueño reparador se considera un factor de riesgo para la aparición de enfermedades cardiovasculares, diabetes, deterioro cognitivo, ansiedad y depresión.

No dormir suficientes horas supone una carencia de sueño reparador, que permite restituir nuestro cuerpo y mente. Aunque en términos generales se estima que 7-9 horas de sueño son, en promedio, más que suficientes para una persona adulta, esta cantidad puede variar. Hay individuos que con 6 horas cubren sus necesidades de sueño, mientras que otros necesitan más de 10 horas diarias para poder cubrir sus necesidades. La edad también influye. En general, las necesidades de sueño para los niños y adolescentes son mayores que para los adultos.

#### 6.1.6.2.2. Ritmo del sueño

El ciclo de cuándo dormimos y cuándo estamos despiertos viene regulado por dos tipos de relojes biológicos formados por dos grupos de células. Sus funciones están vinculadas al ritmo de vida. El funcionamiento del corazón y el cerebro, entre otros órganos, depende del reloj biológico. Los relojes nos indican cuándo tenemos que dormir y cuándo tenemos que estar despiertos. La necesidad de sueño suele aparecer siempre a las mismas horas. Cualquier alteración de este ritmo puede conllevar algún tipo de trastorno del sueño.

La glándula pineal, situada en el centro del cerebro, cerca de la glándula pituitaria, tiene dos funciones básicas muy importantes:

- Segrega melatonina, cuya función es controlar el ritmo circadiano y regular ciertas hormonas reproductivas. Se estimula por la oscuridad y se inhibe por la luz. Con la edad, la generación de melatonina disminuye.
- Controla el hambre, la sed, el deseo sexual y el reloj biológico que determina el proceso normal de envejecimiento del cuerpo.

El sistema circadiano mostrado en la figura 6.31 se encarga de que todos los procesos fisiológicos ocurran en el momento adecuado. Y es que, en biología, el orden de los factores sí altera el producto. No es suficiente que el sueño tenga que producirse a su hora.



**Figura 6.31.** Ciclo del reloj biológico en el control de las funciones del cuerpo.

Todo lo que sucede en nuestro organismo debe organizarse correctamente en el tiempo, como si de una orquesta sinfónica se tratara. El director de esta orquesta, el reloj central, se sitúa en el cerebro (concretamente, en el hipotálamo) y coordina al resto de relojes de otros órganos y tejidos.

La consecuencia de no poder dormir lo suficiente, además de un sueño no reparador, produce a corto plazo somnolencia, cansancio, agotamiento, mal humor, intolerancia y una disminución de las capacidades cognitivas. A largo plazo, produce enfermedades crónicas del hígado y del corazón, entre otros órganos vitales.

Este cuadro de mal humor, intolerancia y agotamiento lleva asociada una dificultad del individuo para realizar las tareas en el trabajo y en la relación con otras personas. Las relaciones en el trabajo, con la familia, con la pareja y con los amigos se van tensionando, lo que suele desembocar en un cierto aislamiento social. La vida en pareja se resiente con facilidad, el rendimiento en el trabajo baja en picado, los amigos se vuelven enemigos y todo ello lleva a cuadros de estrés, ansiedad y depresión. Todos estos problemas tienen un origen común: no se descansa bien o no lo suficiente.

Un reciente estudio publicado en la revista *Nature* en abril de 2021 revela que las personas de mediana edad, entre 50 y 60 años, que duermen menos de 6 horas al día podrían tener más riesgo de padecer demencia en etapas posteriores de la vida. El estudio no establece una relación causa-efecto, pero sugiere que hay un vínculo entre la duración del sueño y el riesgo en el desarrollo de la demencia (Brederoo, de Boer, de Vries, Linszen, & Sommer, 2021).

Con todo lo expuesto en este apartado, se puede concluir que las horas de sueño son necesarias para tener una vida saludable. El descanso no es un derecho, es una necesidad biológica esencial para la salud humana. En ocasiones, se cuestiona si debe prevalecer el derecho al descanso o el derecho a la fiesta. La decisión en muchas ocasiones se toma

a partir del argumento de que deben prevalecer las necesidades de la mayoría. Dado que un festival musical puede atraer a decenas de miles de personas (y la inmensa mayoría no son vecinos del lugar donde se hace el evento musical), la decisión final suele ser hacer el festival en detrimento de los vecinos afectados, ya que son «minoría». Estos conflictos se podrían evitar aplicando más sentido común y empatía con la población afectada y, en última instancia, con acciones encaminadas a mitigar los excesos de los niveles sonoros del festival musical sobre las zonas habitadas más expuestas.

Por un lado, lo razonable sería que debería prevalecer siempre la necesidad del descanso, ya que es una función vital e irrenunciable que afecta a la salud de todo ser humano, incluidos los que van de fiesta. Además, las afectaciones cruzadas entre ambos grupos de intereses no son simétricas: las personas que duermen no impiden ni perjudican la salud a las que están de fiesta. Sin embargo, las personas que están de fiesta impiden y perjudican la salud de las que desean dormir.

La gran mayoría de estudios que tratan de encontrar una relación entre los niveles sonoros y los efectos que produce sobre algunos órganos del cuerpo humano encuentran correlación entre los niveles sonoros y el grado de afectación. No obstante, debe tenerse en cuenta que, sin llegar a niveles sonoros elevados ( $> 85$  dBA), las afectaciones del sonido no son directas, sino indirectas. Por ejemplo, en el caso de alteraciones del sueño por presencia de ruido, el despertar se asocia equivocadamente al nivel sonoro. Sin embargo, se produciría el mismo efecto sin sonido, despertando al durmiente por contacto. Esto demuestra que el sonido, en este caso, produce una afectación indirecta sobre la salud.

Cabe recordar que, para despertar a una persona, el sentido auditivo debe detectar un nivel sonoro superior al ruido de fondo en ese momento. Sin un incremento significativo del nivel sonoro, no se genera la señal de alerta que despierta a la persona. Esta señal puede ser breve en tiempo, unos pocos segundos suelen ser suficientes, dependiendo del desnivel sonoro. A mayor desnivel, mayor probabilidad de despertarse. Sin embargo, si hacemos un promedio de  $L_{eq}$  de varios minutos o incluso horas de la señal sonora presente, llegaremos a conclusiones absurdas, puesto que el incremento sonoro total puede ser solo de algunas décimas de decibelio.

### **6.1.6.3. Conciliar el sueño en entornos urbanos**

La experiencia cotidiana que tienen que soportar muchas personas que residen en un entorno urbano cuando intentar dormir son las frecuentes interrupciones del sueño, producidas por ruidos repentinos de distinta procedencia, que aparecen durante la noche. El ruido de un vehículo ruidoso, con escape modificado o con el equipo de música a todo volumen, puede llegar a despertar a miles de personas en su recorrido por una ciudad. Esta contaminación, hasta ahora «gratuita», se espera que pronto tendrá un coste para el causante, proporcional al daño causado, gracias a la tecnología del radar acústico (ver

cap. 13). Este tipo de ruido, aunque molesta, sabemos que es de corta duración, mientras pasa cerca de nuestro domicilio.

Sin embargo, hay otros ruidos que se solapan con el horario nocturno y que permanecen durante un tiempo excesivo. Es el caso del ruido producido por las terrazas. Al margen de los posibles compromisos entre ocupación de terrazas, dimensiones, número de mesas, de sillas, etc., lo curioso es que en la ecuación no aparece la opinión de los ciudadanos residentes en la zona, que tienen que sufrir el criterio generalizado que se observa por parte de los usuarios de las terrazas. Parece que está bien ir a tomar unas copas con los «amiguetes» y poder vociferar un rato, sin reparar en que, a pocos metros, puede haber personas que necesitan dormir.

Sorprende constatar que los que estaban de fiesta, al volver a sus domicilios para dormir, situados probablemente en otro barrio de la ciudad o en otra población, desean entonces el silencio, justamente ese que con su falta de respeto y educación negaron a sus semejantes unas horas antes. Aparece o surge entonces el falso dilema de «el derecho al sueño y el derecho a la fiesta». Equiparar el derecho a la fiesta con el derecho al sueño, es no entender nada.

No es una cuestión de derecho, sino de necesidad biológica esencial que tienen todos los seres humanos, con independencia de su procedencia, etnia, cultura, religión o color político. Todos, absolutamente todos los seres humanos, tienen que dormir, es una necesidad biológica fundamental para la vida. No hacerlo, o hacerlo mal o insuficientemente, acarrea graves consecuencias para la salud. Se ha hablado mucho sobre las acciones para compatibilizar ambas necesidades. Las necesidades de unos y otros, como es evidente, colisionan; sin embargo, la afectación no es comparable.

Siendo el descanso una necesidad biológica fundamental para la salud de las personas, (incluso para los que se van de fiesta), debería prevalecer siempre la necesidad del sueño.

En algunas terrazas se ha experimentado con la colocación de elementos que tratan de disminuir el nivel sonoro presente (mayoritariamente de voces, gritos y cánticos) en ella. Estas medidas, que algo pueden hacer, resultan insuficientes ante la mala educación de los usuarios. Lo que despierta y molesta a los sufridos vecinos son los desniveles sonoros. La mímica, los *fliers*, los globos, los posa-vasos y otras acciones que ya se han probado, no resuelven el problema.

Una solución pasa por el cierre de las ventanas de las personas afectadas, dotarlas de un buen aislamiento acústico y utilizar aire acondicionado. La solución no se puede calificar de sostenible y al precio de la energía es de difícil justificación, salvo que el coste vaya a cargo de quien hace ruido. Esta es la filosofía iniciada en diversos países de la Unión Europea de «quien contamina, paga». Quien hace ruido no es la terraza, sino los

clientes; no obstante, esto tampoco exime a los responsables de las terrazas ante el grave daño que se ocasiona a los vecinos.

La otra opción es cerrar la terraza. En este sentido, la gran mayoría de propuestas de modificación del Real Decreto 1367/2007, aportadas recientemente por asociaciones de todo el territorio, apuntan a que se restrinja el horario de las terrazas hasta las 23:00 (con sillas recogidas, puntualizan algunas asociaciones y federaciones vecinales del país, lo que demuestra el gran malestar que las terrazas generan entre la población). En este sentido, el Ayuntamiento de Barcelona, en una acción pionera, ha limitado el horario de las terrazas a las 23:00 en aquellas zonas saturadas acústicamente, donde se ha constatado un incumplimiento sistemático de los niveles sonoros máximos permitidos por la legislación.

#### **6.1.6.4. Efectos sobre los sistemas endocrino, cardiovascular e inmunitario**

La contaminación acústica puede provocar reacciones de estrés fisiológico inespecífico que conducen a la liberación excesiva de hormonas como el cortisol o las catecolaminas (adrenalina, dopamina) y ácidos grasos libres. El aumento de estos elementos conduce a su vez a diversos efectos cardiovasculares, como presión arterial alta, riesgo de infarto de miocardio, así como cambios metabólicos que pueden conducir a un mayor riesgo de diabetes tipo 2 y obesidad.

Los efectos a largo plazo de la exposición crónica al ruido a niveles altos se han estudiado en animales, mostrando cambios permanentes y alteraciones vasculares en el músculo cardíaco, lo que indica un mayor riesgo de mortalidad cardiovascular. Los estudios epidemiológicos llevados a cabo sobre la exposición de los trabajadores han demostrado que los empleados que trabajan en ambientes muy ruidosos tienen un mayor riesgo de sufrir hipertensión e infarto de miocardio (Davies, Teschke, Kennedy, Hodgson, Hertzman, & Demers, 2008) (Sbihi, Davies, & Demers, 2008). Estos estudios en humanos y animales son consistentes e indican que los niveles elevados de cortisol nocturno pueden tener consecuencias para el sistema cardiovascular, como un aumento de la frecuencia cardíaca y la presión arterial, o incluso alteraciones del ritmo cardíaco. Los estudios epidemiológicos en la población general también han demostrado que el riesgo de desarrollar hipertensión arterial aumenta con una exposición significativa al ruido del tráfico rodado o aéreo (WHO, 2009) (WHO, 2011). Cabe señalar que se han llevado a cabo pocos estudios en este ámbito sobre poblaciones sometidas al ruido del tráfico ferroviario.

Los estudios epidemiológicos han proporcionado evidencia de que la exposición al ruido del tráfico está relacionada con enfermedades cardiovasculares, como la hipertensión arterial, el infarto de miocardio y los accidentes cerebrovasculares. El ruido es un estresante inespecífico que activa el sistema nervioso autónomo y la señalización endo-

crina. De acuerdo con el modelo de reacción al ruido presentado por Babisch y sus colegas, los bajos niveles crónicos de ruido pueden causar los llamados efectos no auditivos o indirectos (como alteraciones de la actividad, el sueño y la comunicación), que pueden desencadenar una serie de respuestas emocionales, incluida la molestia y el estrés posterior. El estrés crónico, a su vez, está asociado con factores de riesgo cardiovascular, que comprenden aumento de la presión arterial, aumento de la viscosidad sanguínea y glucosa en sangre, y activación de factores de coagulación sanguínea. La exposición crónica persistente al ruido aumenta el riesgo de enfermedades cardiometabólicas, como hipertensión arterial, enfermedad de las arterias coronarias y accidente cerebrovascular.

La hipertensión es un factor de riesgo bien conocido para la enfermedad cardiovascular y, más concretamente, para la prevalencia e incidencia de la cardiopatía isquémica. Los estudios sobre los efectos del ruido de transporte que se han efectuado para examinar los efectos potenciales del ruido ambiental en la salud cardiovascular muestran un posible vínculo entre la exposición al ruido y el infarto de miocardio, para el cual la hipertensión inducida por el ruido puede ser una de las vías (Swift, 2010).

Aunque en la actualidad existe una parte considerable de las publicaciones que relacionan la exposición al ruido ambiental con la hipertensión y, en consecuencia, con otras enfermedades cardiovasculares, los resultados no son concluyentes. Algunos estudios indican que, en muchos casos analizados, consideraron ser de apoyo en lugar de definitivos debido a que no alcanzaron el nivel de significación estadística (Ndrepepa & Twardella, 2011). Además, existe un cierto grado de heterogeneidad entre los estudios con respecto a la edad, el género, el medio de evaluación/medición de la exposición, la duración de la exposición y el nivel de sonido utilizado, lo que lleva a resultados mixtos (Münzel, Gori, Babisch, & Basner, 2014).

#### *6.1.6.4.1. Cardiopatía isquémica*

Los estudios más recientes avalados por la OMS, revelan una relación entre el nivel de ruido y el riesgo de sufrir una cardiopatía isquémica (CI). La CI está causada por la arterosclerosis. Esta enfermedad impide que el corazón reciba la sangre necesaria. Suele ser asintomática y puede prevenirse.

La CI es la enfermedad ocasionada por la arterosclerosis de las arterias coronarias, es decir, las encargadas de proporcionar sangre al músculo cardíaco (miocardio). La arterosclerosis coronaria es un proceso lento de formación de colágeno y acumulación de lípidos (grasas) y células inflamatorias (linfocitos). Estos tres procesos provocan el estrechamiento (estenosis) de las arterias coronarias.

Este proceso empieza en las primeras décadas de la vida, pero no presenta síntomas hasta que la estenosis de la arteria coronaria se hace tan grave que causa un desequilibrio

entre el aporte de oxígeno al miocardio y sus necesidades. En este caso, se produce una isquemia miocárdica (angina de pecho estable) o una oclusión súbita por trombosis de la arteria, lo que provoca una falta de oxigenación del miocardio que da lugar al síndrome coronario agudo (angina inestable e infarto agudo de miocardio).

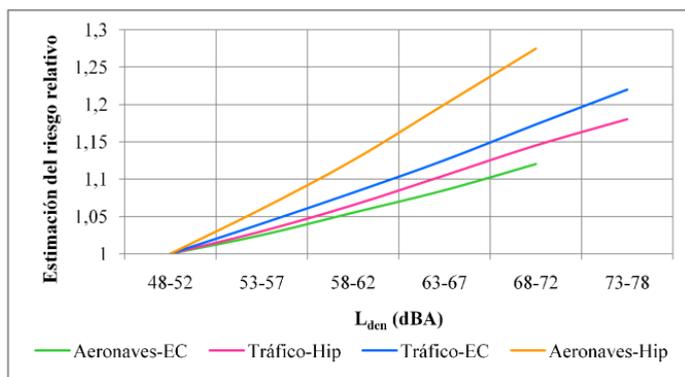
La CI es una enfermedad que se puede prevenir de forma significativa si se conocen y controlan sus factores de riesgo cardiovascular. Los principales factores que la producen son (Jorge, P., 2022):

- Edad avanzada.
- Sexo masculino, aunque la frecuencia en las mujeres se iguala a partir de la menopausia.
- Antecedentes de cardiopatía isquémica prematura en la familia.
- Aumento de las cifras de colesterol total, sobre todo de LDL (malo).
- Disminución de los valores de colesterol HDL (bueno).
- Tabaquismo.
- Hipertensión arterial.
- Diabetes.
- Obesidad.
- Sedentarismo.
- Haber presentado previamente la enfermedad.

El ruido no aparece en la lista, puesto que sus efectos no están relacionados directamente con el cuadro de CI, sino con la hipertensión arterial y esta, a su vez, puede causar la CI. Los efectos indirectos del sonido para generar un cuadro de CI no requieren de niveles sonoros excesivamente elevados, como muestran diversos estudios. Es importante señalar que los efectos indirectos del ruido no siguen el principio toxicológico de dosificación. Esto significa que no es simplemente la energía sonora total acumulada la que causa los efectos adversos. En cambio, se debe tener en cuenta la situación individual y la actividad perturbada (patrones de actividad de tiempo). Es muy posible que un nivel medio de presión sonora de 85 dBA en el trabajo cause menos efecto que 65 dBA en casa cuando se realizan tareas mentales o se intenta relajar después de un día estresante. Esto marca una diferencia sustancial en comparación con muchas otras exposiciones ambientales en las que la dosis acumulada es el factor peligroso.

La figura 6.32 muestra las relaciones exposición-respuesta combinadas de las asociaciones entre el ruido del tráfico rodado y la hipertensión (nivel de referencia de 50 dBA), el ruido del tráfico rodado y la cardiopatía coronaria (nivel de referencia de 52 dBA), el ruido

de los aviones y la hipertensión (nivel de referencia de 49 dBA) y el ruido de aviones y la cardiopatía coronaria (nivel de referencia de 48 dBA) (Münzel, Sorensen, Schmidt, Steven, Kröller-Schön, & Daiber, 2018). Se llevaron a cabo conversiones de diferentes indicadores de ruido con respecto a las 24 horas con el indicador  $L_{den}$ , que se usa comúnmente para el mapeo de ruido en la Unión Europea, en referencia a la fachada más expuesta de los edificios.



**Figura 6.32.** Riesgo relativo relacionado con patologías cardiovasculares causadas por el ruido del transporte aéreo y del tráfico rodado. (EC: enfermedad cardiovascular; Hip: hipertensión).

Las curvas sugieren aumentos en los riesgos (hipertensión, enfermedad coronaria) entre el 5 y el 10% por un aumento del indicador de ruido  $L_{den}$  de 10 dB a partir de niveles de ruido alrededor de 50 dBA. Esto se corresponde con niveles de ruido nocturno  $L_n$  aproximadamente unos 10 dB más bajos, es decir, unos 40 dBA. De acuerdo con los gráficos, las personas que viven en áreas donde el nivel de ruido ambiental promedio  $L_{den}$  supera los 65 dBA corren un riesgo de enfermedades cardiovasculares aproximadamente entre un 15 y un 25% mayor en comparación con las personas que viven en áreas tranquilas comparables (Münzel, Gori, Babisch, & Basner, 2014).

Los niveles sonoros mostrados presentan presiones sonoras moderadas que no pueden producir efectos directos sobre los órganos del cuerpo humano, con tiempos de exposición razonables. No obstante, estos niveles sonoros pueden ser dañinos cuando el tiempo de exposición es elevado. Las personas sometidas durante muchas horas a niveles moderados de ruido desarrollan cuadros de estrés que puede afectar al funcionamiento de algunos órganos vitales. Los efectos no se producen de forma inmediata, sino que siguen un proceso acumulativo.

La teoría general del estrés es la razón fundamental y el modelo biológico de los efectos fisiológicos indirectos del ruido en el humano. De acuerdo con el concepto general de estrés, los cambios temporales repetidos en las respuestas biológicas perturban el biorritmo, causan una desregulación permanente, lo que deriva en un desequilibrio fisiológico y metabólico y una hemostasia alterada del organismo que conduce a enfermedades crónicas a largo plazo. En principio, una variedad de funciones corporales pueden verse afectadas, incluido el sistema cardiovascular, el sistema gastrointestinal y el sistema inmunológico, por ejemplo. La investigación sobre el ruido, generalmente, se ha centrado en los resultados de salud cardiovascular, porque las enfermedades cardiovasculares tienen una alta prevalencia en la población general. Por tanto, los efectos cardiovasculares inducidos por el ruido pueden ser relevantes para la salud pública y proporcionar un argumento sólido para las políticas de reducción del ruido dentro del contexto global de los efectos adversos para la salud debido al ruido en la comunidad, incluidas las molestias y los trastornos del sueño (Münzel, Gori, Babisch, & Basner, 2014).

Algunos estudios apuntan que los efectos indirectos del ruido sobre el cuerpo humano pueden empezar con niveles inferiores a los 50 dBA. Sin embargo, en este momento esta hipótesis no se puede probar, ya que no se dispone de datos suficientes de dosis-efecto para estos niveles sonoros.

#### **6.1.6.5. Efectos psicológicos producidos por el nivel sonoro**

Robert Koch, premio nobel en 1905 por descubrir el bacilo de la tuberculosis, pronosticó: «Algún día, el hombre tendrá que luchar contra el ruido con tanta fiereza como el cólera y la peste». Los efectos psicológicos producidos por el ruido, son en general más devastadores que los efectos fisiológicos, lo que en un futuro supondrá un grave problema, como profetizó Koch. Estos efectos «no se ven», y tampoco se pueden medir de una forma objetiva, pero en un futuro será un grave problema para la población. La afectación psicológica que el sonido produce sobre las personas es más difícil de valorar, ya que por lo general se usan criterios basados en la observación. Los efectos psicológicos no se producen siempre por niveles elevados de sonido, sino que, frecuentemente, las patologías aparecen con niveles sonoros bajos.

El concepto de efectos no audibles o de segundo orden fue introducido por el profesor Karl D. Kryter en 1970 (Kryter, 1970). Es importante destacar que Kryter afirma que algunos de los efectos del ruido más complejos y quizá más importantes (desde el punto de vista de la salud) tienen que ver con estas reacciones de segundo orden. Propuso que los efectos no auditivos son el resultado de la estimulación de tres sistemas neurales que no están vinculados exclusivamente a la audición:

- El sistema nervioso autónomo, que controla las respuestas somáticas sistémicas y las reacciones de excitación del organismo: las glándulas, las vísceras y el sistema circulatorio.

- El sistema nervioso reticular, que conduce a respuestas de activación del sistema nervioso central, así como a los órganos de percepción relacionados con el dolor y el placer.
- Los centros cerebrales corticales y subcorticales, responsables del rendimiento intelectual.

Diversos autores hicieron pruebas en laboratorio con condiciones controladas para medir las respuestas circulatorias de la sangre estando expuestos a un ruido de 90 fonios. Los resultados demostraron que las respuestas no fueron uniformes. Mientras que la mayoría de los sujetos expuestos a ruido o música mostraron una disminución del gasto cardíaco y del flujo sanguíneo durante la exposición al ruido o la música, algunos sujetos tuvieron un comportamiento distinto. Los autores también concluyeron que la similitud de las respuestas al ruido o la música puede indicar que la intensidad del sonido y no sus aspectos adversos (al ruido) o placenteros (de la música) controlaban las respuestas somáticas. Por tanto, es posible que la música fuera estresante principalmente por su nivel.

Los estudios de Levi demuestran que el ruido causa estrés (Levi, 1967). Mostró que el trabajo en entornos industriales y de oficina conduce a una mayor secreción de catecolaminas como marcador de un mayor estrés. Desde principios de los años sesenta, los estudios de laboratorio en humanos sobre los efectos no auditivos de la exposición al ruido se llevaron a cabo de manera rutinaria. Sin embargo, solo se estudió la exposición al ruido a corto plazo en estas configuraciones, lo que no puede reflejar los efectos crónicos de la exposición al ruido ambiental. A partir de la década de los noventa, se propusieron muchos estudios en humanos por motivos de seguridad en el trabajo. Los estudios ocupacionales proporcionaron evidencia de trastornos de salud en trabajadores expuestos crónicamente al ruido durante varios años, aunque los niveles de exposición al ruido entre estos trabajadores fueron mucho más altos que en el entorno ambiental.

Un meta análisis publicado en 2013, que incluía 24 estudios transversales sobre el ruido del tráfico rodado y la hipertensión, encontró un 3,4% más de probabilidad de hipertensión prevalente por cada 5 dB más de ruido del tráfico rodado (van Kempen & Babisch, 2013).

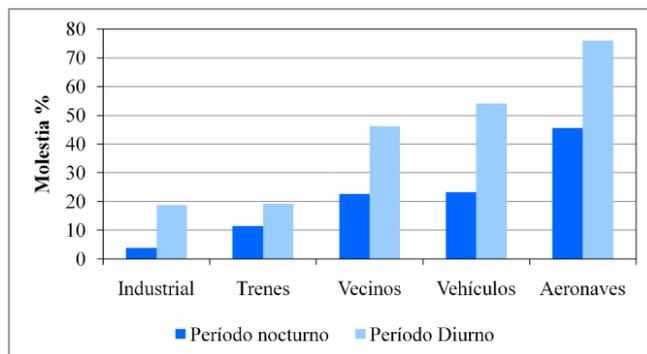
En la afectación psicológica, hay que distinguir dos grandes bloques:

- Respuesta cognitiva y emocional.
- Trastornos sobre algunas actividades vitales (como el sueño).

#### *6.1.6.5.1. Respuesta cognitiva y emocional*

Los sonidos producen sensaciones a las personas que los escuchan. Estas sensaciones son consecuencia de la naturaleza del sonido y de su procedencia. Ante un mismo

sonido, distintas personas presentan diferentes reacciones. La influencia del tipo de ruido sobre el grado de molestia se ha estudiado ampliamente. La figura 6.33 muestra el grado de molestia manifestado por personas ante sonidos procedentes de distintas fuentes en un entorno urbano (Hahad, et al., 2018). El ruido de aeronaves es el que más molesta, aunque en porcentaje de población expuesta presenta niveles muy bajos (poca población expuesta a este ruido).



**Figura 6.33.** Grado de molestia declarada ante diferentes fuentes de ruido urbano en período nocturno y diurno.

Cuando el sonido percibido se considera no deseado, se le llama *ruido*. Un ruido es siempre molesto, pero no siempre es innecesario. El grado de molestia depende tanto de su nivel sonoro como de sus características de frecuencia y evolución temporal. En un entorno urbano, generalmente el nivel sonoro es más elevado de día que de noche. Por otro lado, determinados ruidos pueden también generar más rechazo entre la población, como, por ejemplo, el producido por algunos vecinos, las ferias, las fiestas de barrio o el procedente de vehículos ruidosos.

En este sentido, destacamos que el ruido producido por el tren siempre se considera menos molesto que el provocado por el tráfico de vehículos, debido a la regularidad de paso (horario), a una sonoridad conocida, se sabe cuándo empieza y cuando acaba el ruido, y con qué frecuencia se produce. Se considera un sonido predecible en nivel y en tiempo y, por eso, es considerado menos molesto. A esta valoración ayuda que suele haber un margen de tiempo apreciable entre los sucesivos pasos de trenes.

Saber con antelación la duración temporal de un suceso sonoro, o tener capacidad para terminar con el ruido, es muy importante a la hora de valorar su grado de molestia. Hay un ejemplo muy común respecto al ruido de una lavadora. Si es nuestra lavadora, sabemos que la podemos parar en cualquier momento y cesar la molestia. Esta sensación

de control hace que se perciba como menos molesta. Sin embargo, el hecho de que la lavadora del vecino no se pueda parar cuando queramos, ni sepamos cuándo va a acabar, crea más ansiedad e inquietud y, en consecuencia, se percibe con un grado de molestia mayor, a pesar de que probablemente nuestra lavadora sea más ruidosa (está más cerca).

Respecto al ruido producido por vecinos en las inmediaciones, en general resulta molesto por no ser deseado. Además, según algunas sentencias judiciales, el sonido que entra en una vivienda se considera una invasión de la intimidad y una violación de domicilio.

Desde la perspectiva constitucional, el domicilio de las personas físicas se concibe como una manifestación directa de la vida privada, esto es el lugar donde la intimidad se materializa libre de intromisiones extrañas y en el que cada uno puede gozar de tranquilidad y soledad. En esa línea, el Tribunal Constitucional ha identificado como *domicilio inviolable* (STC 171/1999, de 27 de septiembre) el espacio en el cual el individuo vive sin estar sujeto necesariamente a los usos y las convenciones sociales y donde ejerce su libertad más íntima, al que la ley protege frente a injerencias arbitrarias tanto de terceros como de las autoridades públicas.

El grado de molestia está fuertemente relacionado con el grado de intolerancia a la fuente sonora. La reacción, pues, se manifiesta en una opinión-valoración sobre el sonido percibido. Esta reacción está influida tanto por aspectos culturales como por la posible afectación en realizar una tarea. La respuesta cognitiva y emocional puede generar irritación y estrés, entre otros efectos negativos.

### **6.1.7. Directrices de la Unión Europea sobre el ruido ambiental**

El objetivo principal de estas directrices es proporcionar recomendaciones para proteger la salud humana de la exposición al ruido ambiental procedente de diversas fuentes: ruido del transporte (tráfico rodado, ferrocarril y aviones), ruido de turbinas eólicas y ruido de ocio (WHO, 2018). El ruido de ocio en este contexto se refiere a todas las fuentes sonoras a las que las personas pueden estar expuestas por distintas actividades (discotecas, bares musicales, conciertos en directo) y también la escucha de música mediante reproductores personales.

Las directrices proporcionan orientación sobre las políticas que adoptar por los Estados miembros y que son compatibles con los indicadores de ruido utilizados en la Directiva Europea de Ruido (END) de la Unión Europea. Los indicadores de ruido utilizados son el  $L_{den}$  y el  $L_n$ , definidos en la END.

El Grupo de Elaboración de Directrices (GED) propone recomendaciones para mitigar los efectos del ruido sobre las personas. De acuerdo con las informaciones disponibles, se proponen una serie de acciones o recomendaciones para ser implantadas por los distintos miembros de la Unión Europea en función de la fuente de ruido considerada. Se

consideran las siguientes fuentes de ruido: tráfico rodado, ferrocarril, aviación, turbinas eólicas, ocio. La tabla 6.3 muestra los límites recomendados.

**Tabla 6.3.** Niveles de ruido máximo propuestos por la Directiva Europea sobre Ruido Ambiental, según recomendaciones de la OMS de 2018, para evitar efectos adversos sobre la salud

| FUENTE DE RUIDO  | $L_{den}$ dBA       | $L_n$ dBA |
|------------------|---------------------|-----------|
| Tráfico rodado   | 53                  | 45        |
| Ferrocarril      | 54                  | 44        |
| Aviación         | 45                  | 40        |
| Turbinas eólicas | 45                  | –         |
| Ocio             | 70 ( $L_{Aeq24h}$ ) | –         |

Los niveles sonoros expuestos son en ambiente exterior y se corresponden con los niveles sonoros que aparecen en los mapas de ruido. La experiencia cotidiana muestra que, con un nivel sonoro en una calle de 45 dBA, se pueden escuchar los propios pasos al andar, sin necesidad de llevar calzado duro. Este nivel de ruido en período diurno se corresponde con un entorno acústicamente confortable. Para el tráfico rodado, resulta sorprendente que, partiendo de unos niveles sonoros bastante moderados y con solo un incremento de 8 dBA, pasando de 45 dBA a 53 dBA, aparezcan efectos adversos para la salud, mientras que dichos efectos adversos para el ocio (música) se manifiestan con niveles superiores a los 70 dBA con  $L_{eq24h}$ . Nótese que  $L_{den} > L_{eq24h}$ , ya que el  $L_{eq}$  no pondera el nivel en período atardecer con 5 dB ni el nocturno con 10 dB. Sin duda, la naturaleza de la fuente sonora es la causa de este desnivel tan elevado.

Mientras el ruido de transporte siempre se considera negativo y no deseado, el sonido de la música se puede considerar agradable y deseado, lo que modifica completamente el panorama de percepción sonora. Entonces, llegamos a una aparente contradicción: el ruido de tráfico con 53 dBA produce efectos adversos para la salud, pero la música con un nivel sonoro de 70 dBA es inocua.

Si valoramos la distribución de energía en el espectro audible, se comprueba que el ruido de tráfico centra su energía en las bajas frecuencias, normalmente por debajo de los 200 Hz, mientras que la música ofrece un mayor margen de frecuencia. Por otro lado, el nivel sonoro de los vehículos está regulado y limitado, mientras que el nivel sonoro de la música no, pudiendo alcanzar valores que pueden suponer un riesgo auditivo.

Si valoramos las sensaciones que producen ambos sonidos, veremos que son radicalmente distintas. El grado de molestia, en general, está relacionado con el contraste

acústico y este será bajo cuando los desniveles sonoros sean mínimos. En el caso del ruido de tráfico, si este es fluido, su contraste será bajo y su molestia también, lo que no será impedimento para que una persona pueda dormir. Es un caso similar al del interior de un avión, pero con un nivel sonoro notablemente inferior. En el caso de la música, escuchar el ritmo musical en el interior de un dormitorio puede resultar insoportable a niveles muy por debajo de los 70 dBA.

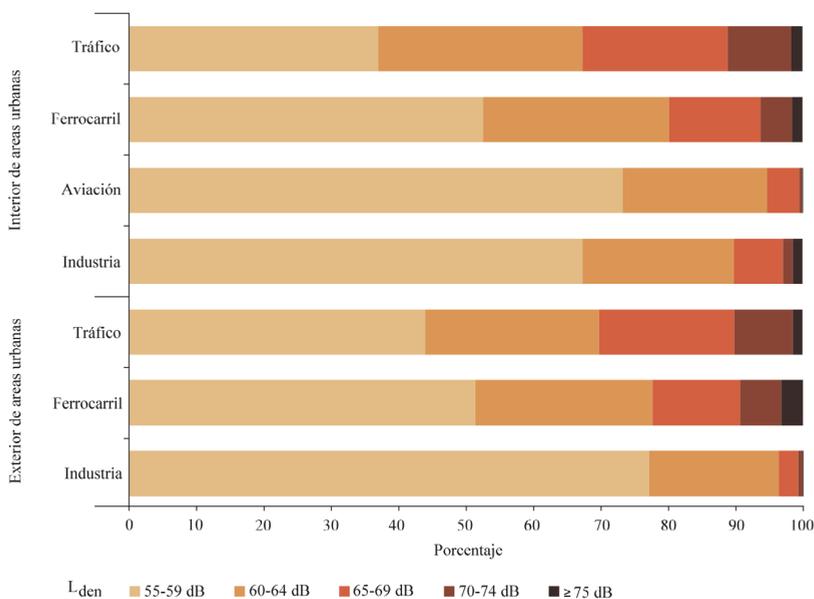
Esto evidencia que los límites sonoros propuestos por la OMS deben contextualizarse en situaciones concretas. Poder descansar no es una cuestión de nivel sonoro, como insinúa la OMS, sino de calidad sonora, que es muy distinto. Para establecer unos límites de ruido máximos, deben tenerse en cuenta otros factores que afectan directamente a la percepción acústica de los sonidos por parte de las personas. Estos factores están relacionados con el contraste acústico, la distribución de energía o la presencia de componentes rítmicas, entre otros. El uso de indicadores con elevado grado de integración como el  $L_{den}$  tampoco resulta adecuado, por apartarse en exceso de la sensación percibida por las personas.

En los estudios donde se busca la relación causa-efecto de los niveles sonoros sobre la salud de las personas debe estar muy bien definido el origen que causa el trastorno físico. En el caso del ruido de tráfico rodado, se hace muy difícil separar los efectos sobre la salud por causa del sonido, del producido por las partículas en el aire, que también se producen por el tráfico rodado de forma simultánea. Además, el estado físico de las personas puede alterar significativamente los resultados y algunos factores como la obesidad y el sedentarismo, cada vez más frecuentes entre la población, y pueden propiciar la aparición de hipertensión arterial o cardiopatía isquémica, que quizá no sean imputables únicamente al nivel sonoro.

Los niveles de 45 dBA ( $L_{den}$ ) procedentes de la aviación pueden inducir a confusión. En primer lugar, el menor nivel respecto al ruido de tráfico es debido a que, a igualdad de nivel sonoro, el ruido de aviación se considera más molesto que el ruido de tráfico. Además, como es sabido, el paso de aviones no se produce con la misma frecuencia que el ruido de tráfico rodado. Por un lado, solo pasa un avión en cada evento y, por otro, entre un vuelo y el siguiente aparecen pausas con niveles sonoros bajos correspondientes al ruido de fondo o residual.

Estas pausas producen oscilaciones de nivel sonoro importantes en recepción, que no quedan reflejadas en el  $L_{den}$  por su elevado grado de integración, lo que propicia niveles sonoros bajos que no se corresponden con la sensación de molestia percibida por la población. Bajar el nivel  $L_{den}$  no mejora las condiciones de salud y, sin embargo, pueden hacer inviable los objetivos, ya que el ruido de fondo en ambiente exterior nunca llega al cero. Para el ruido de aviación se acrecienta la diferencia entre lo medido con el indicador  $L_{den}$  y lo percibido por las personas.

El nivel de exposición de la población para cada tipo de fuente sonora, por banda de frecuencia, usando el indicador  $L_{den}$ , se muestra en la figura 6.34 (EEA Report- No 22/2019, 2020), donde se muestra que el ruido del tráfico rodado es la fuente de ruido con el mayor porcentaje de personas expuestas en las bandas altas, a partir de 70 dB  $L_{den}$ .



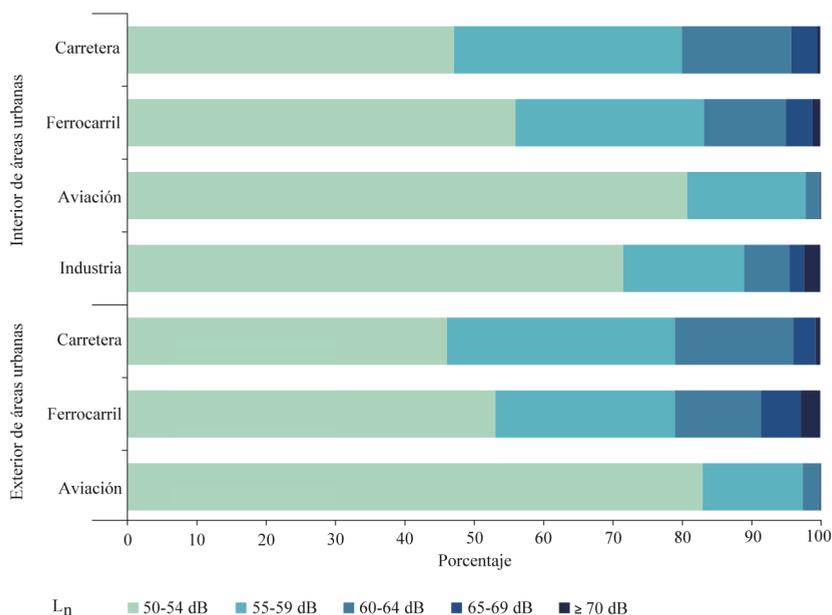
**Figura 6.34.** Distribución de la población europea expuesta para cada tipo de fuente, por banda de ruido, utilizando el indicador  $L_{den}$  en 2017, en período diurno.

El ruido de ferrocarril es la segunda fuente que produce más exposición sobre la población, aunque con un grado de afectación sobre esta menor, ya sea en el interior o en el exterior de las áreas urbanas. En el caso del ferrocarril, se observa que en los exteriores de las áreas urbanas hay mayor afectación sobre la población.

Respecto a las personas afectadas por el ruido de los aviones, solo una pequeña proporción está expuesta a las categorías de ruido más elevadas. En cuanto a la industria, la afectación es claramente superior en el interior de las áreas urbanas.

En relación con los niveles en período nocturno, la figura 6.35 muestra los resultados para el mismo tipo de fuente sonora usando el indicador  $L_n$  (EEA Report- No 22/2019, 2020).

Las tendencias en el período nocturno muestran que, para zonas exteriores de áreas urbanas, el ruido de carretera y de ferrocarril presentan unos porcentajes de afectación superiores a las zonas en interiores de áreas urbanas.



**Figura 6.35.** Distribución de la población europea expuesta dentro de cada fuente, por banda de ruido, utilizando el indicador  $L_n$  en 2017, en período nocturno.

### 6.1.8. Informe de la OMS sobre los efectos del ruido sobre la población

Un reciente informe de la OMS publicado en marzo de 2021 desvela que, según las previsiones, una de cada cuatro personas presentará problemas auditivos en 2050. Más del 5% de la población mundial (430 millones de personas) padece una pérdida de sensibilidad auditiva y requiere rehabilitación (432 millones de adultos y 34 millones de niños). Se calcula que en 2050 esa cifra superará los 700 millones (una de cada diez personas). La pérdida de sensibilidad auditiva se refiere a una pérdida superior a 35 decibelios (dB) en el oído que oye mejor. Casi el 80% de las personas con este problema viven en países de ingresos bajos y medios. La prevalencia de la pérdida de audición aumenta con la edad: entre los mayores de 60 años, más del 25% padece una pérdida de la sensibilidad auditiva.

El Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus, director general de la OMS, señaló: «Nuestra capacidad de audición es un bien muy preciado y, si no se tratan, las pérdidas auditivas pueden acarrear consecuencias devastadoras en la capacidad de las personas para comunicarse, estudiar y ganarse la vida. Además, también pueden afectar a su salud mental y a la posibilidad de que mantengan relaciones. Este nuevo informe expone este problema y ofrece intervenciones basadas en datos científicos para solucionarlo. Esperamos que todos los países integren estas medidas en sus sistemas de salud para hacer realidad nuestro anhelo de alcanzar la cobertura sanitaria universal».

En la niñez, casi el 60% de los casos de pérdida de audición se deben a causas que pueden prevenirse mediante medidas como la vacunación para prevenir la rubéola y la meningitis, la mejora de la atención materna y neonatal y el cribado y el tratamiento temprano de la otitis media (es decir, las enfermedades inflamatorias del oído medio). En los adultos, la limitación de los niveles sonoros, la escucha sin riesgos y la vigilancia de la posible ototoxicidad de los medicamentos, junto con una buena higiene otológica, pueden ayudar a mantener una buena audición y a reducir los riesgos de perderla.

### **6.1.9. Impacto sobre la salud producido por el ruido (informe UE2020)**

La exposición prolongada al ruido ambiental es una de las principales causas de mala salud relacionadas con el medioambiente en Europa. El ruido del tráfico, incluido el tráfico rodado, ferroviario y aéreo, se ha clasificado como la segunda amenaza medioambiental para la salud pública en Europa Occidental, por detrás de las partículas finas (Hänninen, 2014). Aunque los niveles de ruido generados por las fuentes de transporte son generalmente demasiado bajos para causar daños biológicos en el oído, está bien establecido que, si la exposición es prolongada y supera ciertos niveles, el ruido puede provocar efectos no auditivos en la salud, como molestia, alteración del sueño, efectos negativos en el sistema cardiovascular y metabólico, así como deterioro cognitivo en niños (WHO, 2009). Los principales efectos del ruido sobre la salud son los siguientes:

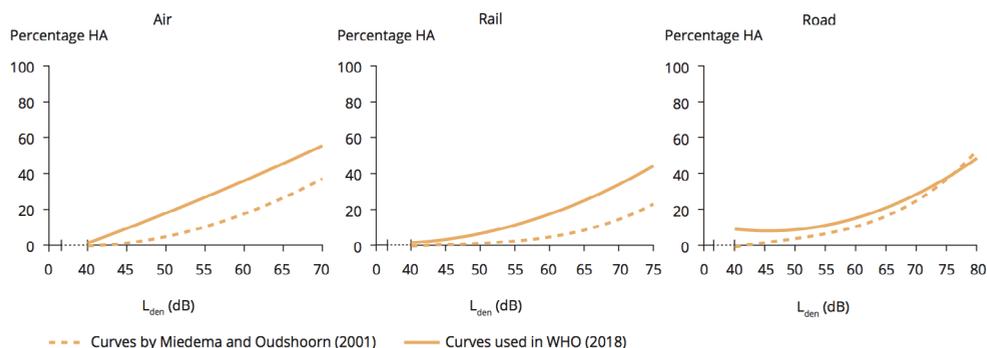
- **Molestia.** Es una de las respuestas más prevalentes al ruido y se describe como una reacción de estrés que abarca una amplia gama de sentimientos negativos, que incluyen perturbación, insatisfacción, angustia, disgusto, irritación y molestia. La respuesta individual al ruido depende no solo de los niveles de exposición, sino también de factores contextuales, situacionales y personales. Puede iniciar reacciones de estrés fisiológico que, si son a largo plazo, podrían desencadenar el desarrollo de enfermedades cardiovasculares.
- **Interrupción del sueño.** El sueño sirve para facilitar funciones vitales en nuestro organismo. El ruido fragmenta el sueño y reduce la continuidad del sueño y la cantidad total de tiempo de sueño, lo que puede tener un impacto en el estado de alerta, el rendimiento en el trabajo y la calidad de vida. La restricción del sueño provoca, entre otras cosas, cambios en el metabolismo de la glucosa y la regulación del apetito, deterioro de la consolidación de la memoria y disfunción de los vasos sanguíneos. La alteración del sueño a largo plazo también puede provocar problemas de salud cardiovascular.
- **Efectos cardiovasculares y metabólicos.** El ruido es un factor de riesgo importante para las enfermedades crónicas. La exposición al ruido activa las reacciones de estrés en el cuerpo, lo que lleva a un aumento de la presión arterial, un ritmo cardíaco cambiante y una liberación de hormonas del estrés. Además, los efectos

cardiovasculares y metabólicos relacionados con la exposición al ruido también pueden ser consecuencia de una reducción en la calidad del sueño, provocada por la exposición al ruido durante la noche, entre otros mecanismos adicionales o interrelacionados. Estos efectos crónicos pueden conducir a una mortalidad prematura.

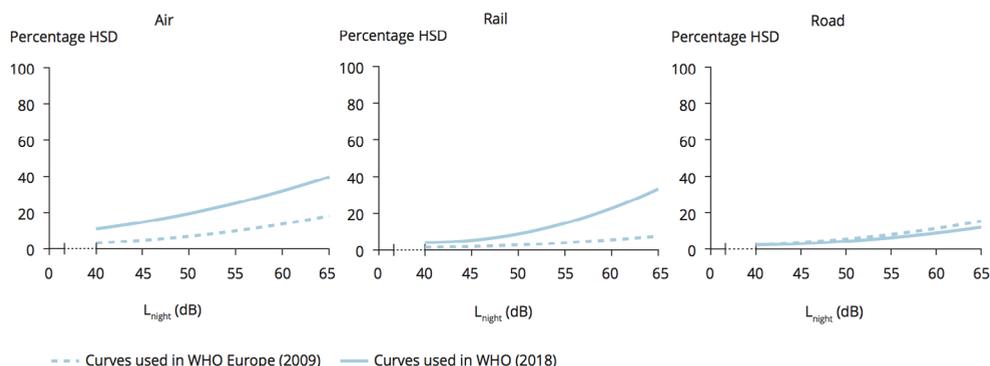
- Desarrollo cognitivo en la infancia. El ruido en las aulas afecta a los niños de muchas maneras, incluida la disminución de su motivación, la reducción de la inteligibilidad del habla, la comprensión auditiva y la concentración, la producción de molestias y perturbaciones y el aumento de la inquietud. Como resultado, los niños expuestos al ruido en la escuela pueden experimentar una menor capacidad de lectura, memoria y rendimiento. El deterioro cognitivo también podría estar relacionado con la exposición al ruido en el hogar durante las horas nocturnas, lo que puede provocar un estado de ánimo bajo, fatiga y un desempeño deficiente en las tareas al día siguiente. El ruido en el hogar también puede estar relacionado con problemas de hiperactividad y falta de atención, lo que puede causar un rendimiento académico más bajo.

Un hallazgo importante sugiere que la molestia y la alteración del sueño debido al ruido de fuentes ferroviarias y aéreas, han aumentado en los últimos años. Por tanto, es posible que ya no se apliquen las relaciones exposición-respuesta basadas en datos más antiguos sobre molestias por ruido o trastornos del sueño para estas fuentes.

Las figuras 6.36 y 6.37 muestran el cambio en la molestia y la alteración del sueño entre las llamadas «curvas estándar de la Unión Europea» y las nuevas relaciones proporcionadas por la OMS. Las causas de las relaciones cambiantes de exposición-respuesta entre el ruido de los aviones y los trenes, así como la molestia y la alteración del sueño, aún no están claras.



**Figura 6.36.** Porcentaje de población altamente molesta por ruido de aviación, ferrocarril y tráfico rodado, según las pautas medioambientales de la OMS.



**Figura 6.37.** Porcentaje estimado de población con elevados trastornos de sueño por ruido de aviación, ferrocarril y tráfico rodado, según las pautas medioambientales de la OMS.

### 6.1.10. Influencia del confinamiento sobre el ambiente sonoro

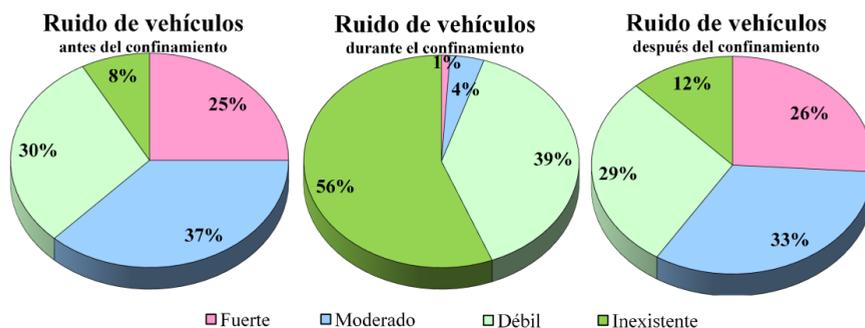
El confinamiento causado por la COVID-19 en el año 2020 y prolongado durante varias semanas permitió a las personas experimentar el nivel sonoro sin ninguna actividad en su población. Esto ya sucedía en un festivo o un fin de semana, pero no con la intensidad y rotundidad impuesta por el confinamiento. Diferentes estudios muestran cómo algunos hábitos de la población se han modificado, algunos por necesidad y otros porque se han descubierto. Entre estos últimos, gran parte de la población descubrió el silencio en las ciudades en días laborables, una situación que nunca antes se había vivido. A raíz de esta experiencia, se han hecho diferentes encuestas en distintos países para valorar la opinión de la población. Salvando las diferencias culturales y geográficas, los resultados que reflejan las encuestas no son extrapolables completamente, pero son similares en algunos aspectos. También se han hecho mediciones para tratar de cuantificar la disminución del nivel sonoro en distintas ciudades. En aras de reflejar unos datos concretos, se muestran los resultados obtenidos por diferentes trabajos de investigación.

#### 6.1.10.1. Encuesta CidB 2020

Esta encuesta valoró, entre otros puntos, la percepción de la población respecto al ruido de transporte, antes, durante y después del confinamiento a partir de un total de 2.109 encuestas, de las cuales 1.996 fueron válidas (CidB, 2020). La distribución de población encuestada se distribuye en un 68% que vive en grandes ciudades, un 15% en su periferia y un 17% en pequeñas poblaciones en ámbito más rural. Por sexos, el 51% fueron mujeres y el 49% hombres. Por edades, los grupos más numerosos fueron de 30 a 44 años con un 32%, de 45 a 59 años con un 34% y de 60 a 74 años con un 20%.

Los resultados obtenidos se resumen gráficamente en las figuras 6.38 a 6.40 y muestran que la percepción sonora evolucionó durante el confinamiento. Se observa que, si bien durante el confinamiento hubo una apreciable reducción del nivel de ruido de transporte, ahora parece que las cosas vuelven a estar como antes del confinamiento. Salvo ligeras variaciones, la percepción de la población se mantiene, como se puede comprobar en las gráficas siguientes.

La figura 6.38 muestra la situación antes del confinamiento para el ruido de vehículos. Como se puede observar, durante el confinamiento, la percepción de ruido de vehículos cayó en picado para el 95% de la población encuestada. También se observa una ligera bajada en la consideración de débil, que pasa del 8% al 12% después del confinamiento, lo cual puede reflejar la ligera disminución de circulación que hubo en las primeras semanas después del fin de las restricciones de circulación. La valoración de débil varía ligeramente, pasando del 30% al 39% antes y después del confinamiento, respectivamente.



**Figura 6.38.** Percepción del ruido de vehículos. Efecto del confinamiento 2020.

La figura 6.39 muestra la situación antes del confinamiento para el ruido de ferrocarril. De izquierda a derecha: antes, durante y después del confinamiento. Como se muestra, durante el confinamiento, la percepción de ruido de ferrocarril inexistente pasó del 78% al 88%. Los porcentajes de percepción fuerte y moderada bajaron durante el confinamiento. También se observa que la valoración de la percepción sonora de este medio de transporte no ha cambiado después del confinamiento.

La figura 6.40 muestra la situación antes del confinamiento para el ruido de aviación. Como se puede observar, durante el confinamiento, la percepción de ruido de aviones cayó notablemente, pasando la percepción fuerte del 8% al 0%, y la percepción inexistente pasó del 48% al 85%. También se observa una bajada notable en la consideración de fuerte y moderado, debido a la disminución de vuelos que se produjeron en

las primeras semanas después del confinamiento. Se observa que los niveles de molestia percibidos han disminuido después del confinamiento a causa de que los vuelos no se recuperaron significativamente hasta pasados unos meses.

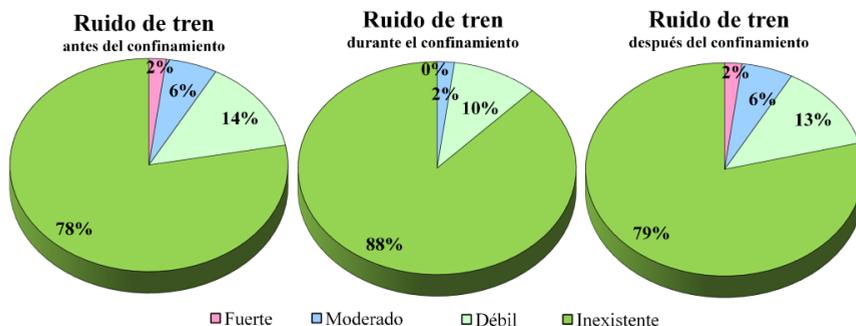


Figura 6.39. Percepción del ruido de ferrocarril durante el confinamiento 2020.

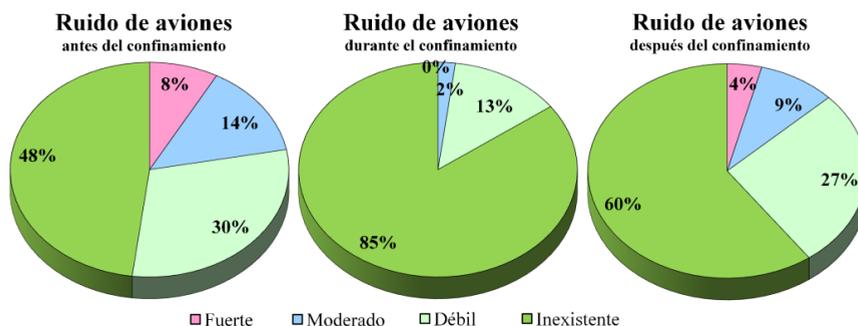
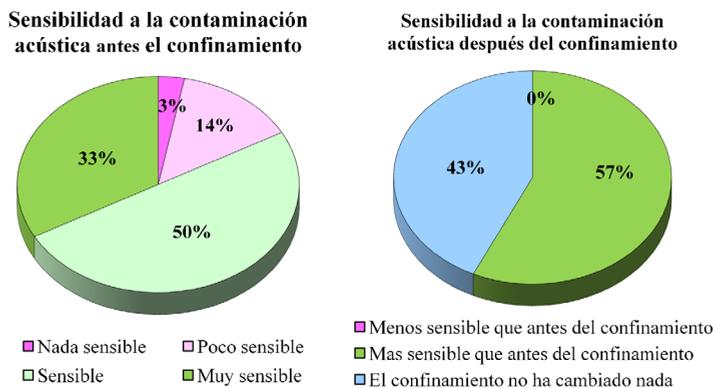


Figura 6.40. Percepción del ruido de aviones durante el confinamiento 2020.

Al margen de la percepción sonora, vivir durante unas semanas en confinamiento propició en general que algunas cosas se vieran de otra manera por parte de la población. Al margen de la salud, que sin duda fue el aspecto más valorado, la sensibilidad hacia el entorno sonoro también cambió, como muestran los resultados de la encuesta que se reflejan en la figura 6.41.

Es destacable que un 57% de los encuestados manifiesta ser más sensible a la contaminación acústica que antes del confinamiento y ningún caso manifestó ser menos sensible que antes del confinamiento. El 43% de los encuestados sostiene que después del confinamiento todo sigue igual. Si lo comparamos con la gráfica de la figura 6.31, vemos que realmente la situación sonora percibida por los ciudadanos, en donde el ruido de tráfico domina, prácticamente no ha cambiado nada antes y después del confinamiento

del 2020. Estos resultados también son extrapolables a otros medios de transporte, como el ferrocarril o el avión.



**Figura 6.41.** Sensibilidad al ruido antes y después del confinamiento 2020.

Los principales resultados de la encuesta muestran que el período de silencio por confinamiento tuvo un efecto beneficioso sobre la salud de la mayoría de la población. También hizo a las personas más sensibles al ruido que antes. De hecho, habiendo tenido la oportunidad de expresarse libremente sobre los medios de acción más efectivos para limitar la contaminación acústica, los encuestados manifiestan que están dispuestos a cambiar el comportamiento para mejorar la calidad de su entorno acústico. Mientras que algunos desean querer moverse para recuperar la sensación de libertad, otros están dibujando una nueva sociedad donde se favorecería el teletrabajo y la movilidad silenciosa para reducir los desplazamientos ruidosos.

También se sugiere que se establezcan períodos de calma o silencio, para preservar el descanso y una mayor capacidad de respuesta de los alcaldes y los organismos encargados de hacer cumplir las legislaciones. Asimismo, destacan la necesidad de información, concienciación y educación.

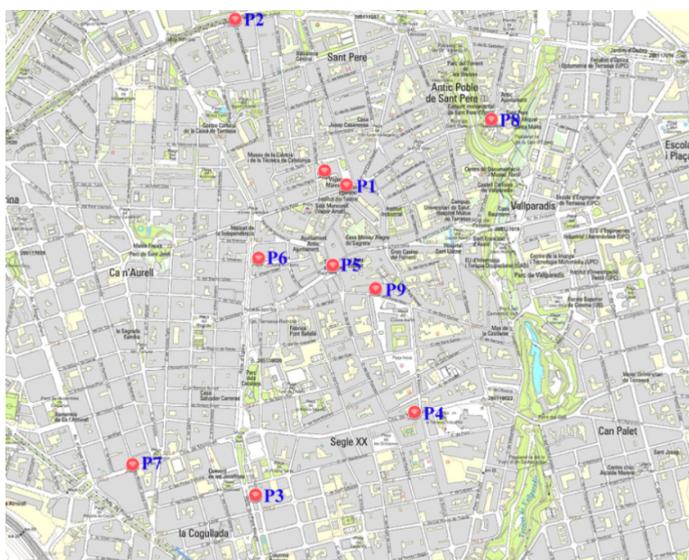
La ausencia de ruido de transporte, especialmente en las ciudades, ha dado paso a los sonidos de la naturaleza. Para los encuestados, el canto de los pájaros ha aumentado durante el confinamiento. La pausa del confinamiento ha permitido a la población urbana reconectar con su entorno, particularmente con la naturaleza.

La encuesta muestra que la población desea un transporte menos ruidoso y, sobre todo, menos desplazamientos para mitigar los niveles sonoros actuales. Muchas personas apuntan la necesidad de educar y sensibilizar como medidas complementarias que pueden ayudar a aumentar el silencio en las ciudades.

### 6.1.10.2. Reducción del nivel sonoro en Terrassa por el confinamiento

En Terrassa, la reducción del nivel de ruido de tráfico, en toda la ciudad y durante las cinco primeras semanas de confinamiento, ha sido de 5,2 dBA de media (se han registrado momentos del día, y días de la semana, en la que estos valores han sido más altos). De lunes a jueves la media ha sido de 3,9 dBA, mientras que de viernes a domingo la reducción fue de 7 dBA. La mayor reducción del nivel sonoro en fin de semana está justificada por la ausencia de actividades relacionadas con el ocio y restauración, especialmente en período nocturno.

Los resultados se han obtenido comparando los valores medios semanales de los principales indicadores durante las semanas de reclusión con un patrón calculado a partir de una media anual de 2019. La monitorización de los datos se ha hecho con los nueve puntos de control, situados en lugares estratégicos de la ciudad, que permiten analizar la evolución de los niveles sonoros y que se muestran con los indicativos P1 a P9 en la figura 6.42.



**Figura 6.42.** Puntos donde se ubican los sensores de control del nivel sonoro en Terrassa, usados para medir los niveles de ruido durante el confinamiento.

Los resultados principales han sido:

- El valor global representativo de la caída del ruido en Terrassa durante las cinco primeras semanas de confinamiento es de 5,2 dBA (3,9 dBA de lunes a jueves y 7 dBA de viernes a domingo).

- La caída durante la franja horaria de día y de noche es similar y es ligeramente inferior a la del horario de tarde.
- La reducción más importante del nivel sonoro se produjo la primera semana de confinamiento. La segunda semana se mantuvo la tendencia a la baja. Durante la tercera y la cuarta semanas, se produjo un estancamiento. En la quinta semana los niveles repuntaron.
- La mayor caída de nivel de ruido se produjo en la plaza Vella, porque es el corazón de la ciudad, el lugar donde se hace más vida social en la calle, actos lúdicos y festivos, y también porque hay muchas terrazas con actividades de restauración.
- La menor caída de nivel de ruido se produjo en plaza del Rector OMS, porque es una zona tranquila de peatones, con poca actividad social en la calle y de bajo nivel sonoro.
- La disminución del ruido en la calle Portal No recoge también los cambios de movilidad introducidos por la Zona de Bajas Emisiones (cambio de sentido y restricciones a la circulación, excepto vehículos autorizados y acceso a los aparcamientos de comercios).
- La caída en la Rambleta del Pare Alegre y también en la carretera de Martorell es superior a la registrada en la carretera de Montcada y el paseo de Vint i dos de Juliol (rondas y avenidas), lo que indica que la movilidad interurbana bajó más que la movilidad urbana.
- El descenso registrado en la calle de la Rasa, también importante, recoge el paro de las actividades de ocio en el centro, especialmente las noches del fin de semana.

La reducción del nivel de ruido para cada punto se resume en la tabla 6.4. Se indica la caída (disminución) del nivel sonoro respecto a la situación habitual antes del confinamiento en los puntos indicados. En el apartado de observaciones, se indica la causa más probable de esa reducción.

La reducción del nivel sonoro en función del día de la semana se resume en la tabla 6.5. Se evidencia que la reducción del nivel sonoro se hace mucho más evidente el fin de semana por la presencia del ocio nocturno. Estos resultados, que se repiten en otras ciudades, cuestionan que la principal fuente de ruido sea el tráfico rodado. Nótese que el incremento de conflictos relacionados con el ruido se sitúa justamente en los fines de semana.

### ***6.1.10.3. Impacto del confinamiento en Barcelona, Viena y Estocolmo***

Uno de los efectos positivos de la pandemia fue la reducción de los niveles de ruido en las ciudades, con datos insólitos hasta la fecha. Otro efecto fue una reducción drástica

de la actividad física y el acceso a espacios verdes. Las consecuencias de estos cambios para la salud de las personas variaron en función de la rigidez de las medidas de confinamiento de cada lugar y del contexto local.

**Tabla 6.4.** Reducción de los niveles de ruido en nueve puntos de la red viaria de Terrassa durante el confinamiento

| Punto | Lugares                        | Caída en dBA | Observaciones                               |
|-------|--------------------------------|--------------|---|
| P1    | La Rasa                        | -5,7         | Influyen las actividades de ocio            |
| P2    | Paseo del Vint-i-dos-de Juliol | -3,5         | Predominio del ruido del tráfico            |
| P3    | Rambla del Pare Alegre         | -4,9         | Predominio del ruido del tráfico            |
| P4    | Carretera de Motcada           | -3,5         | Predominio del ruido del tráfico            |
| P5    | Plaza Vella                    | -11          | Predominio del ruido de los actos sociales  |
| P6    | Rambla d'Ègara                 | -3,3         | Predominio del ruido del transporte público |
| P7    | Carretera de Martorell         | -4,5         | Predominio del ruido del tráfico            |
| P8    | Plaza del Rector Homs          | -1           | Zona tranquila                              |
| P9    | Portal Nou                     | -4,8         | Cambios producidos por la ZBE               |
|       | <b>Valor promedio</b>          | <b>-5,2</b>  | <b>Valor representativo del global</b>      |

**Tabla 6.5.** Reducción de los niveles sonoros diarios, durante el confinamiento en la ciudad de Terrassa

| Día semana | Caída diaria (dBA) | Caída agrupada (dBA) | Caída total (dBA) |
|------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| Lunes      | -3,5               | -3,9                 | -5,2              |
| Martes     | -3,6               |                      |                   |
| Miércoles  | -3,7               |                      |                   |
| Jueves     | -4,6               |                      |                   |
| Viernes    | -6,3               | -7                   |                   |
| Sábado     | -7,9               |                      |                   |
| Domingo    | -6,8               |                      |                   |

El equipo de investigación seleccionó tres ciudades europeas con distintos grados de medidas de confinamiento: Barcelona (donde se decretó un confinamiento estricto), Estocolmo (donde las medidas fueron mucho más laxas y sujetas a la responsabilidad y el sentido común individuales) y Viena (que contó con unas medidas intermedias).

Para cada una de las tres ciudades, recopilamos datos relativos a contaminación del aire, ruido y actividad física de tres momentos distintos en el tiempo: antes de la pandemia, durante el confinamiento más estricto y en el período de desconfinamiento posterior. El estudio calculó las diferencias entre estos niveles y se compararon con datos de los sistemas de salud. Se contrastaron, por un lado, con el número de diagnósticos anuales de infartos de miocardio, ictus, depresión y ansiedad. Por el otro, se estimó lo que podría haberse evitado si los cambios en la contaminación atmosférica, el ruido, la actividad física y las visitas a espacios verdes se hubieran prolongado durante un año. (Casado Cañeque, 2022)

La primera conclusión obvia fue que la ciudad con confinamiento más estricto (Barcelona) fue también la que registró el mayor descenso de contaminación atmosférica, ruido, actividad física y visitas a espacios verdes. La tabla 6.6 resume los niveles existentes antes del confinamiento, durante el período de restricción total y durante la desescalada.

**Tabla. 6.6.** Niveles de ruido antes y durante el confinamiento en Barcelona, Viena y Estocolmo. Los niveles son  $L_{den}$  expresados en dBA. Se muestra la desviación estándar de las muestras

| Ciudad    | Antes confinamiento |            | Durante confinamiento<br>(15 Marzo - 26 Abril) |            | Desconfinamiento<br>(2 Mayo - 30 junio) |            |
|-----------|---------------------|------------|--|------------|---|------------|
|           | Valores absolutos   | Desviación | Valores absolutos                              | Desviación | Valores absolutos                       | Desviación |
| Barcelona | 62                  | ±8         | 57   | ±2         | 59                                      | ±1         |
| Viena     | 59                  | ±5         | 58   | ±7         | 59                                      | ±5         |
| Estocolmo | 56                  | ±10        | 54   | 0          | 55                                      | ±1         |

Sin embargo, tal y como resume Sarah Koch, investigadora de ISGlobal y primera autora del estudio, el balance es negativo: «Pese a las diferencias observadas en las tres ciudades, hay un patrón que se repite y es que los beneficios de salud que derivarían de la mejora de la calidad del aire y del ruido no lograrían compensar los efectos profundamente negativos de la caída en los niveles de actividad física». El estudio pone en evidencia que la actividad física y el acceso a espacios verdes prolongados son factores con mayor impacto sobre la salud que la calidad del aire y el nivel de ruido (Koch, y otros, 2022).

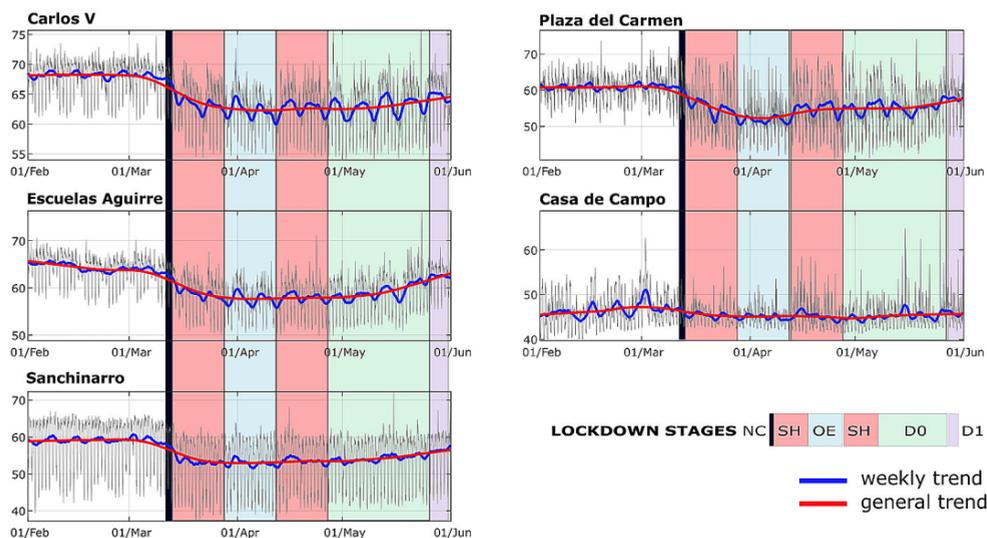
#### 6.1.10.4. Efectos del confinamiento sobre el ruido en Madrid

Los resultados del estudio muestran una reducción significativa de los niveles de ruido en la ciudad de Madrid durante el confinamiento. Esta reducción afectó a toda la ciudad de forma muy significativa, aunque se hizo más visible en los lugares más cerca-

nos a las principales arterias de tráfico. El confinamiento también influyó en la actividad, el comportamiento y la actitud de los ciudadanos en las calles, por lo que se observó una reducción en aquellos lugares menos afectados por el ruido del tráfico y más afectados por el ruido de las actividades de ocio, turismo y comercio (Asensio, Pavón, & de Arcas, 2020).

La ausencia de tráfico se percibió en las zonas dominadas por el tráfico y en las zonas activas, pero también en los lugares situados en zonas tranquilas. En términos cuantitativos, la reducción media obtenida en la ciudad fue de entre 4 y 5 dBA para los indicadores  $L_{d}$ ,  $L_e$  y  $L_n$  en días laborables, fenómeno ligado a la contundente reducción de los niveles de tráfico en las calles. Además, dicha reducción superó los 6 dBA en el período nocturno del fin de semana, lo que puede explicarse por la falta de actividad vinculada a la vida nocturna durante esos días.

La figura 6.43 muestra la evolución de los niveles de ruido en cinco localizaciones de Madrid antes del confinamiento (fondo blanco), durante el confinamiento y durante el des confinamiento.



**Figura 6.43.** Nivel de ruido en las cinco localizaciones analizadas en Madrid antes, durante y después del confinamiento.

Para facilitar el análisis, se han superpuesto dos niveles de suavizado en los gráficos de la figura 6.43. El primero muestra una cierta ondulación que nos permite visualizar la reducción del nivel sonoro que experimentaron la mayoría de los puntos durante el fin de semana. El segundo muestra una tendencia a largo plazo en estos cinco puntos de medi-

ción. Podemos observar claramente que la dinámica de las mediciones horarias es bastante importante en todos los lugares, mostrando variaciones significativas entre los niveles medidos en las horas pico y los medidos en los momentos más tranquilos de la noche.

Principalmente, la reducción generalizada del nivel de ruido se debió a la ausencia del tráfico nocturno habitual en las calles durante el fin de semana, situación que también está vinculada a la ausencia de actividad nocturna durante el confinamiento. Esto nos muestra cómo el tráfico rodado tiene también un peso importante ligado al ruido del ocio nocturno, aunque no suele ser la principal preocupación de los residentes en esas zonas. El confinamiento no solo redujo la intensidad del ruido, sino que también modificó significativamente sus patrones de tiempo. La actividad diaria se iniciaba más temprano durante el confinamiento, especialmente los fines de semana, pero sobre todo terminaba mucho antes, ya que el confinamiento eliminó el ocio y la actividad al aire libre de las personas.

Se ha observado que la dinámica del ruido, la diferencia entre los niveles máximos y mínimos (horas punta y horas valle), aumentó durante el encierro. El nivel sonoro se redujo en las horas punta, pero más aún durante las horas valle. Esta tendencia también se extendió hacia el análisis semanal. Aunque toda la semana fue más silenciosa durante el confinamiento, la reducción fue más notable en los fines de semana.

### **6.1.11. Proteger el oído**

En ocasiones podemos tener la necesidad de estar en un entorno ruidoso o con niveles sonoros elevados. Si lo estamos de forma voluntaria, es posible que «aceptemos» que en ese lugar hay un nivel sonoro elevado, pero probablemente lo consideremos adecuado o incluso deseado. Sin embargo, a pesar de que nos guste mucho escuchar la música y literalmente «sentirla», esta sensación de euforia puede conducir a engaño respecto al riesgo de pérdida auditiva. Los amantes de la música y de los conciertos en directo, donde los niveles sonoros suelen ser bastante notables, deben saber que nadie va a proteger su oído. Por eso es recomendable proteger el sentido auditivo si queremos disfrutar de la música durante mucho tiempo.

Una forma de hacerlo es usando los tapones que se insertan en los oídos. Estos elementos nos protegen de los niveles excesivamente elevados que a corto-medio plazo nos van a dañar el oído. No todos los tapones auditivos son iguales, ni en prestaciones ni en calidad. En el mercado hay una gran diversidad de modelos, con diferentes precios y cualidades. Desde los más económicos, para una protección auditiva limitada y de un solo uso, hasta los tapones con filtro acústico y reutilizables. El objetivo del tapón es minimizar el nivel de presión acústica que llega al tímpano. Para esta función de bloqueo puede servir cualquier material, siempre que este tenga unas características adecuadas.

El tapón debe ser cómodo y ajustable a la forma de nuestro conducto auditivo. Debe mantener el ajuste mientras lo llevamos.

Se pueden dividir en dos categorías:

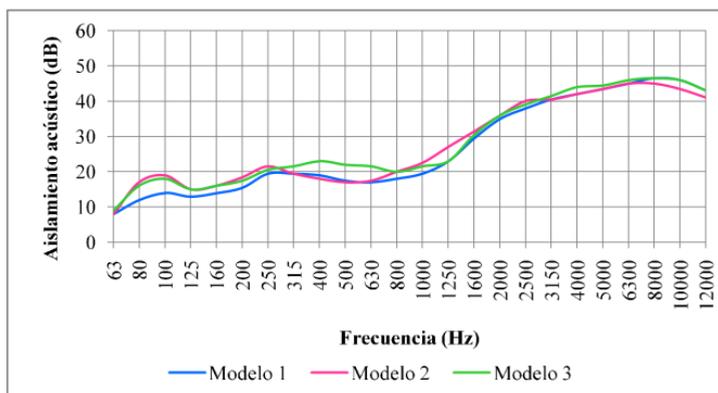
- Tapones sin filtro acústico para la protección de salud laboral. Estos tapones tienen por objetivo reducir al máximo el nivel sonoro recibido. Su uso está concebido para proteger al usuario ante sonidos de elevada intensidad, como por ejemplo los impulsivos que se pueden producir en entornos industriales. Estas protecciones no son adecuadas para escuchar voces o para escuchar música, puesto que en el primer caso se dificulta entender el mensaje y, en el segundo caso, el equilibrio espectral queda muy alterado, reduciendo excesivamente los niveles de alta frecuencia. Los tapones sin filtro acústico tienen a su vez una subdivisión en función del material utilizado. Los más simples y económicos del mercado son los de espuma. A un precio mayor encontramos los moldeados, que son reutilizables.
- Tapones con filtro acústico. Estos tapones no sirven para usarlos en ambientes industriales muy ruidosos, puesto que no protegen suficientemente al oído. Los tapones con filtro acústico disponen de un filtro acústico que permite que las altas frecuencias puedan llegar al tímpano, equilibrando el desnivel espectral que los tapones convencionales presentan.

#### **6.1.11.1. Tapones de espuma**

Son sin duda los más conocidos y utilizados, de múltiples aplicaciones y a un precio muy competitivo. En países más avanzados en salud auditiva, como Francia, se pueden encontrar gratuitamente en discotecas, salas de conciertos, grandes festivales en espacio abierto, etc. Su uso es muy simple: se introduce a presión en el canal auditivo. Si se moja ligeramente su superficie, se consigue una protección más eficaz. Aunque vayamos con cuidado en su uso, en general no se recomienda volverlos a utilizar. Son de talla única, lo que facilita su compra masiva.

La atenuación acústica que podemos esperar con estos protectores se muestra en la figura 6.44. Las tres curvas corresponden a tres modelos de fabricantes de tapones de espuma, que presentan unos niveles de protección similares. La máxima eficacia se obtiene para frecuencias medias y altas, como era de esperar por el tipo de material empleado.

Se puede comprobar que la atenuación ofrecida por los tres modelos es muy similar: una atenuación entre 15 y 20 dB entre los 80 Hz y los 1000 Hz. Por encima de esta frecuencia, el aislamiento acústico aumenta, llegando a los 45 dB para las bandas de 10 kHz. Los niveles de aislamiento globales se resumen en la tabla 6.7. Como se puede comprobar, las diferencias son pequeñas y difíciles de apreciar «de oído». El modelo 3 ofrece mejor aislamiento en dBA; sin embargo, el modelo 2 es el mejor en atenuación sonora.



**Figura 6.44.** Atenuación acústica proporcionada por distintos tapones de espuma.

**Tabla 6.7.** Nivel de aislamiento acústico global en dB y dBA para los tres modelos de tapones de espuma ensayados

| Tapón de espuma      |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|
| Aislamiento acústico | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 |
| dB                   | 13,7     | 14,7     | 13,7     |
| dBA                  | 23,5     | 24,8     | 25,9     |

La figura 6.45 muestra los tapones ensayados. Las dimensiones y formas son muy parecidas. Los materiales basados en espumas son porosos en su parte interna, aunque la capa exterior es lisa. Estos tapones están diseñados para un solo uso.



**Figura 6.45.** Tres modelos de tapones de espuma ensayados.

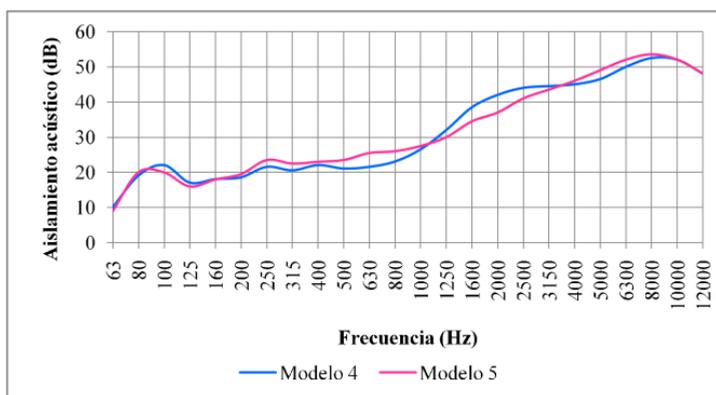
Este tipo de tapones puede dar una buena protección para ruido en general, ya que las altas frecuencias quedan más protegidas. Estos tapones están pensados para la máxima protección, por ejemplo, en entornos industriales, donde puede haber sonidos con

elevada presión sonora. Sin embargo, como se puede apreciar, la atenuación proporcionada por cada banda de frecuencias está muy desequilibrada, lo que dificulta percibir la voz, es decir, la persona queda «acústicamente aislada» o ensordecida, lo que en un entorno laboral puede ser arriesgado.

El riesgo de estos tapones reside en que, al atenuar tanto las medias y las altas frecuencias, se pierde inteligibilidad al intentar hablar con una persona. Producen una sensación de «ensordecimiento» que para aplicaciones musicales no son adecuados. El acto reflejo más común es sacarse ligeramente el tapón, para que entre más energía de alta frecuencia, con el riesgo de perder protección auditiva.

### 6.1.11.2. Tapones moldeados con doble y triple borde, sin filtro acústico

Estos tapones reutilizables son de silicona y se pueden limpiar. Algunos modelos pueden tener recubrimientos distintos. Disponen de dos o tres bordes o aletas internas que atenúan al paso del sonido. La figura 6.46 muestra la atenuación en frecuencia que estos tapones pueden proporcionar.



**Figura 6.46.** Atenuación acústica proporcionada por tapones moldeados sin filtro acústico.

Las principales diferencias entre ellos están en el grosor de las aletas, el grosor en el extremo y el acabado de la superficie. Algunos modelos son antideslizantes. Tienen una talla única, ya que los perfiles de silicona son blandos y permiten su adaptación al conducto auditivo. El grado de atenuación o eficacia depende de la morfología de cada individuo. El grado de protección es muy similar al de los tapones de espuma y producen el mismo efecto de oído ensordecido, con una evidente dificultad para entender un mensaje oral. Los niveles globales de atenuación se resumen en la tabla 6.8.

**Tabla 6.8.** Nivel de aislamiento acústico global en dB y dBA para los dos modelos de tapones moldeados sin filtro ensayados

| Tapón moldeado sin filtro acústico |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|
| Aislamiento acústico               | Modelo 4 | Modelo 5 |
| dB                                 | 17,8     | 17,5     |
| dBA                                | 28,1     | 29,8     |

La figura 6.47 muestra los dos tipos de tapones ensayados. La diferencia de capacidad protectora entre ambos tapones es medible, pero difícilmente detectable «de oído» por una persona no experimentada.



**Figura 6.47.** Tapones moldeados sin filtro acústico ensayados.

El modelo 5 tiene un comportamiento a medias frecuencias (500 Hz a 2 kHz) algo más lineal, lo que proporciona una mejor calidad sonora en aplicaciones musicales. A pesar de esta ligera mejora, la calidad sonora no es adecuada para su uso en entornos con música, por el elevado desnivel entre las bajas frecuencias y las altas frecuencias, siendo estas últimas las más atenuadas.

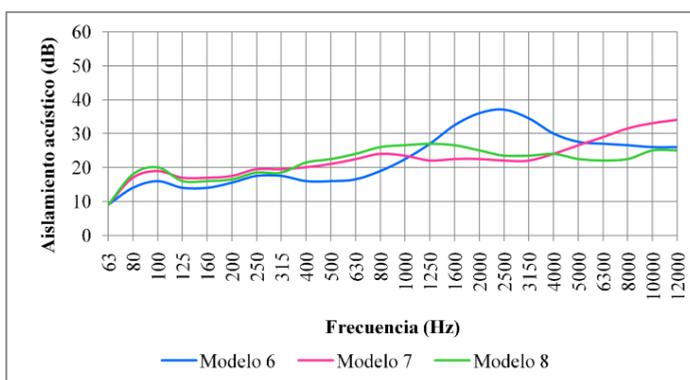
### 6.1.11.3. Tapones moldeados con doble y triple borde, con filtro acústico

Estos tapones tienen un aspecto muy parecido a los anteriores. No obstante, por la parte externa disponen de un filtro acústico que permite equilibrar el desequilibrio de atenuación entre las bajas y las altas frecuencias, por lo que la calidad de sonido que llega al oído es superior. La mayoría de estos tapones son moldeados y alojan un filtro acústico en su interior que puede ser de tubo o de pastilla. La tecnología usada es muy similar. El filtro acústico debe dejar pasar las frecuencias altas. El filtro más sencillo es un agujero de pequeño diámetro que comunica el conducto auditivo con el exterior. Los diseños comerciales pueden ser visualmente más o menos parecidos. La figura 6.48 muestra unos tapones comerciales con filtro acústico de tubo y con filtro acústico de pastilla.



**Figura 6.48.** Tapones auditivos moldeados. Izquierda: con filtro acústico cilíndrico. Derecha: con filtro acústico de pastilla.

Los resultados en cuanto a la protección ofrecida por ambas tipologías pueden ser muy similares. La figura 6.49 muestra la protección obtenida por estos tapones con filtro acústico.



**Figura 6.49.** Atenuación acústica proporcionada por tapones moldeados con filtro.

Este filtro acústico deja pasar más energía a las bandas de media y alta frecuencia que son excesivamente atenuadas por los tapones que se basan en bloquear el conducto auditivo. Esto, evidentemente, reduce el grado de protección, pero se considera que son más adecuados para aplicaciones en música.

Nótese que los niveles sonoros en una sonorización pueden ser previsibles y están controlados en todo momento. Por otro lado, algunos modelos incorporan diversos filtros con distinto grado de protección para adaptarse a los niveles sonoros previstos que el usuario puede escoger.

El diseño del filtro es la parte fundamental de este tipo de tapones para obtener una calidad sonora aceptable. Los niveles globales de atenuación se resumen en la tabla 6.9. En el mercado se pueden encontrar distintos modelos de tapones, con prestaciones similares. Con respecto al material, algunos utilizan compuestos más flexibles, otros son ligeramente más largos, unos presentan doble borde y otros tienen triple borde.

**Tabla 6.9.** Nivel de aislamiento acústico global en dB y dBA para los tres modelos de tapones moldeados con filtro ensayados

| Tapón moldeado con filtro acústico |          |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|----------|
| Aislamiento acústico               | Modelo 6 | Modelo 7 | Modelo 8 |
| dB                                 | 14,1     | 17,0     | 16,7     |
| dBA                                | 22,9     | 23,2     | 23,5     |

El elemento más importante para tener una protección que respete al máximo el contenido en frecuencias es el filtro acústico. La figura 6.50 muestra los modelos analizados de tapón con filtro acústico.



**Figura 6.50.** Tapones moldeados con filtro acústico analizados. Modelos 6 y 8: de pastilla. Modelo 7: de cilindro.

Es destacable que la calidad sonora que ofrecen los tapones con filtro acústico altera de forma notable los niveles espectrales. Al ser el nivel sonoro controlable en todo momento en los festivales y actuaciones musicales, es un poco ridículo que los mismos músicos usen protectores auditivos en lugar de moderar los niveles sonoros que generan.

La protección auditiva no se limita a espacio abierto. Para proteger el oído de los niveles elevados producidos por los auriculares, en el mercado se pueden encontrar protectores auditivos para el uso de auriculares, como muestra la figura 6.51. Resulta un poco sorprendente que se recurra a un atenuador acústico que altera el espectro en frecuencia recibido en lugar de moderar el nivel sonoro radiado por los auriculares y que el propio usuario puede controlar. Este tipo de *targets* parece que obedece más a una moda que a una necesidad. Para tener la máxima calidad sonora, el auricular debe ponerse en

el oído sin «aditivos» que alteran el contenido espectral del sonido original y moderar y mantener el nivel sonoro escuchado a un valor que no suponga un riesgo para el oído.



**Figura 6.51.** Protector auditivo intercalado entre un auricular de botón y el oído.

El uso de los protectores auditivos en los espectáculos en espacios abiertos con elevados niveles sonoros se está normalizando en algunos estados de la Unión Europea. Las campañas de sensibilización tienen un fuerte impacto entre la población joven, y no tan joven, que frecuenta este tipo de espectáculos, como muestra la imagen de la figura 6.52. En ella se puede ver un espacio situado en la entrada a un concierto de rock en un espacio abierto, donde se reparten tapones para los oídos de forma gratuita para los asistentes, bajo el lema: *T'as tes bouchons?* («¿Tienes tus tapones?»).



**Figura 6.52.** Stand para la protección auditiva situado en la entrada de un concierto de rock, donde se reparten tapones gratuitamente a los asistentes.

La prevalencia de la pérdida auditiva adquirida ha aumentado en los últimos años. Una explicación de esta tendencia es el aumento en la exposición a niveles sonoros elevados en el ocio, como asistir a lugares con música con elevado nivel sonoro (concier-

tos, festivales y discotecas). Los asistentes a estas actividades pueden estar expuestos a niveles de presión sonora que pueden situarse entre los 100 dBA y los 110 dBA durante varias horas. Se sabe y hay suficientes evidencias de que la exposición a estos niveles sonoros causa pérdida de audición.

Afortunadamente, en la mayoría de los casos, sobre todo entre los más jóvenes, la exposición al sonido elevado se queda en una pérdida auditiva temporal. Pero hay sorpresas desagradables, porque la resistencia a los niveles sonoros elevados no es inocua para todos. Igual que ocurre con la visión, donde genéticamente algunas personas tienen que llevar gafas correctoras, hay personas que no resisten los niveles sonoros elevados, que les producen lesiones permanentes.

Un estudio realizado en el Centro Médico Universitario de Utrecht valoró la efectividad de los dispositivos de protección auditiva. Para este estudio, los investigadores escogieron al azar a 51 personas que asistieron a un festival de música al aire libre (durante 4,5 horas) en Ámsterdam. Una parte (25 personas) llevaba tapones para los oídos, mientras que el resto (26 personas) no llevaba tapones para los oídos (grupo sin protección). Los voluntarios fueron reclutados a través de las redes sociales. El resultado principal del estudio fue un cambio temporal del umbral auditivo (TTS) en un audiograma. La edad promedio de los participantes fue de 27 años. El nivel de presión de sonido promediado en el tiempo experimentado fue de 100 dBA durante el festival.

Los autores encontraron que la proporción de participantes con TTS después de la exposición al sonido fue solo del 8% en el grupo que llevaba tapones, en comparación con el 42% en el grupo sin protección. Además, un porcentaje menor de participantes tuvo *tinnitus* después de la exposición al sonido en el grupo de tapones para los oídos (12% frente al 40% en el grupo sin protección). Ante estos resultados, es evidente que la protección acústica de los tapones es muy positiva para minimizar notablemente el impacto sobre la salud auditiva de los asistentes.

No obstante, los tapones (sean con filtro acústico o no) modifican la calidad espectral del sonido. Es decir, los usuarios no perciben los sonidos, cómo se están generando. Estamos, pues, ante un proceso de *low-fidelity* sonoro que tendrán aquellos que usen tapones. Sería más conveniente, y mucho más saludable, recuperar los orígenes de la música amplificada y limitar los niveles sonoros a valores razonables, reduciendo la exagerada desproporción de las bajas frecuencias (40-80 Hz) respecto al resto de bandas, que actualmente es superior a los 15 dB. El nivel sonoro en «primera línea» en un evento multitudinario de música amplificada es de unos 120 dBA (nivel  $L_{eq}$ ), y esto no es nada saludable. Los grandes festivales ofrecen un sonido espectacular, con elevados niveles sonoros y con una enfatización desmesurada de las bajas frecuencias. Los asistentes a estos eventos deberían saber a qué se exponen voluntariamente, aunque en general no se le da importancia.

### **6.1.12. Regeneración de la capacidad auditiva**

La pérdida de la sensibilidad auditiva causada por el trauma acústico del sentido auditivo puede ser total o parcial. Total significa que la persona pierde totalmente la sensibilidad auditiva en un oído o ambos y no va a recuperarla nunca. Una pérdida parcial puede tener una parte recuperable, pasado un tiempo prudencial después de sufrir el trauma acústico, que se traduce en una pérdida de sensibilidad parcial, generalmente a medias y altas frecuencias. También puede darse el caso de una pérdida de sensibilidad irreversible, de parte de la capacidad auditiva, de modo que, aunque el paciente no puede recuperar la sensibilidad auditiva que tenía antes del trauma acústico, este puede escuchar sonidos, con menor sensibilidad, y con distinto contenido en frecuencia.

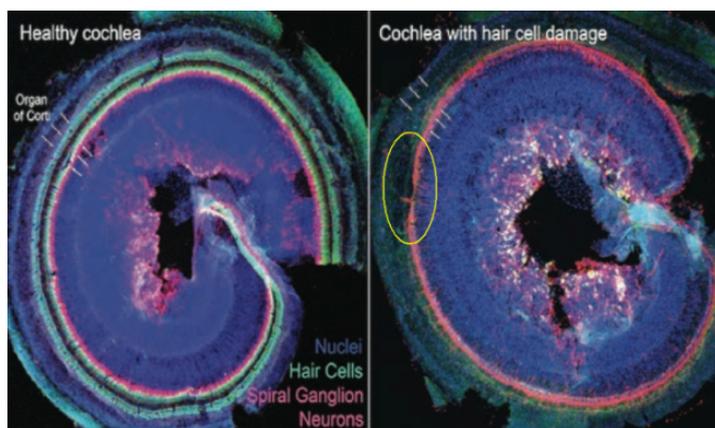
#### **6.1.12.1. Recuperación auditiva mediante cirugía coclear**

Sin embargo, la situación más frecuente se produce cuando la persona está en un entorno con nivel sonoro elevado durante un cierto tiempo, como es el caso de asistir a un evento musical, ya sea en directo o en un ambiente musical tipo discoteca. El grado de pérdida auditiva depende de diversos factores, siendo los más determinantes el nivel sonoro y el tiempo de exposición a ese nivel. También la genética de la persona influye en que esta pueda ser más o menos «resistente» a los niveles sonoros elevados.

La merma de la capacidad auditiva se produce cuando las células ciliadas se desconectan del sistema nervioso y se produce la pérdida irreparable. Los excesos sonoros tienen un efecto acumulativo sobre la pérdida de sensibilidad auditiva y, por último, la persona pierde audición, aunque muy probablemente no sea consciente hasta tener carencias auditivas notables que se producen unos años más tarde. Esto se debe en parte a que nuestra memoria acústica es muy deficiente, pero la causa principal es que el escotoma no se produce a todas las frecuencias, sino que empieza por las bandas de medias frecuencias (entre 4 kHz y 8 kHz). Por eso es aconsejable hacer revisiones auditivas periódicas, sobre todo si frecuentamos lugares con niveles sonoros elevados.

Cuando las células ciliadas se pierden, no es posible recuperarlas, lo que conduce a una disminución permanente de la capacidad auditiva. La figura 6.53 muestra una sección de la cóclea con dos situaciones distintas. A la izquierda, una cóclea sana; a la derecha, una cóclea donde parte de las células ciliadas (dentro del óvalo amarillo) han desaparecido. Esto supondría una pérdida de sensibilidad auditiva en unas bandas de frecuencia determinadas.

Hace unos 30 años, el descubrimiento de que las células ciliadas se regeneran en las aves planteó la posibilidad de que algún día pudiéramos encontrar una forma de reemplazar las células ciliadas en los mamíferos, incluidos los humanos. Desde entonces, se han logrado muchos avances en el intento de la regeneración de las células ciliadas.



**Figura 6.53.** Izquierda: cóclea sana (células ciliadas en verde). Derecha: cóclea con pérdida de células ciliadas (dentro del óvalo amarillo).

Las células ciliadas mueren ante los excesos de nivel sonoro durante largos períodos y también ante diversos tipos diferentes de medicamentos, cuando se administran en dosis altas o durante tiempo prolongado. Estos incluyen (pero no se limitan a): antibióticos aminoglucósidos (como gentamicina) y fármacos anticancerosos de metales pesados (como cisplatino). Las células ciliadas también mueren a medida que envejecemos; en la mayoría de los casos, esto se debe a causas desconocidas. Por último, existen mutaciones genéticas que hacen que las células ciliadas mueran durante el desarrollo embrionario o en etapas posteriores de la vida.

Se ha observado que, durante la infancia, las células ciliadas tienen capacidad de recuperarse gracias a la regeneración de los tejidos. Sin embargo, cuando la cóclea está madura, las células ciliadas no se regeneran y se pierden de forma permanente ante una agresión sonora persistente, sin saber en este momento la causa. El uso de células madre se utiliza para regenerar tejidos y, aplicadas en la zona dañada de la cóclea, permite una regeneración de las células en esa zona. La elección obvia es trasplantar células madre, que tienen el potencial de dividirse y diferenciarse en una variedad de tipos de células maduras. Las células madre pueden cultivarse en una placa y guiarse hacia un destino celular deseado (en este caso, célula pilosa) mediante ciertos agentes químicos o condiciones de cultivo. Las células madre son muy prometedoras para el tratamiento de varios tipos de patologías, incluidas las enfermedades cardíacas, la ceguera y la leucemia.

Aunque el progreso hacia la regeneración de las células ciliadas ha sido significativo dado el tiempo limitado transcurrido desde su descubrimiento, queda mucho trabajo para valorar la efectividad del reemplazo de las células ciliadas para mejorar la audición en humanos. Por ejemplo, no se sabe cuántas células ciliadas de cada tipo deben

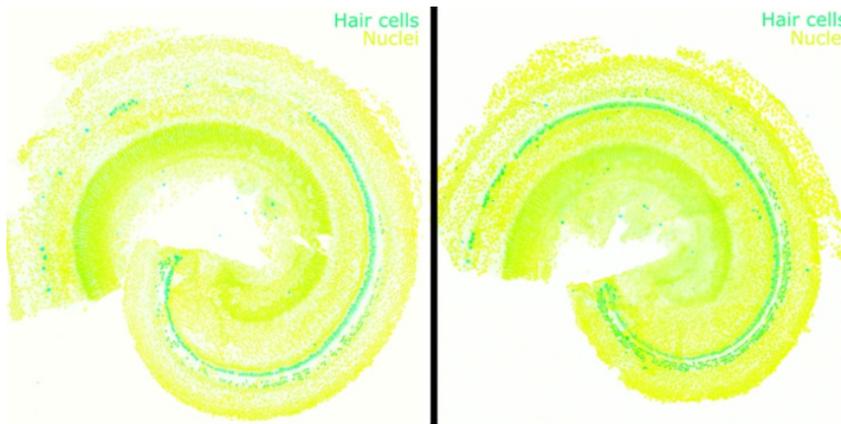
regenerarse para restaurar adecuadamente la audición en las personas con discapacidad auditiva. Aunque se conoce que las células ciliadas internas son críticas, solo podemos saber el resultado de la mejora de la audición en ausencia de células ciliadas externas. Muchas formas de pérdida auditiva son causadas por la destrucción selectiva de las células ciliadas externas. La regeneración de las células ciliadas externas por sí sola podría ser útil en estos pacientes.

Actualmente, se está investigando sobre la obtención de imágenes de alta resolución del oído interno, que permitiría la evaluación cuantitativa de cada tipo de célula. Aunque existen dificultades para restaurar las células ciliadas después del daño en mamíferos, ya se han superado muchos obstáculos, con investigaciones prometedoras para introducir un tratamiento para reparar la pérdida auditiva (Lewis & Rubel, 2016).

Las soluciones existentes para recuperar parcialmente la audición implican el uso de elementos externos que captan la señal sonora y la «inyectan» al oído interno a través de diferentes elementos mecánicos. Esto implica el uso de dispositivos electroacústicos, que, aunque son muy pequeños, no dejan de ser un elemento externo extraño. Recientemente, se están desarrollando diversas técnicas encaminadas a recuperar las células ciliadas que a causa de un abuso sonoro o bien por edad pierden su funcionalidad, mermando la capacidad auditiva del humano. Una nueva técnica basada en la llamada *terapia regenerativa* podría ser una solución.

Investigadores de la Facultad de Medicina de la Universidad de Maryland (UM-SOM) han llevado a cabo un estudio en 2021 que ha determinado el papel que desempeña una proteína crítica en el desarrollo de las células ciliadas. Estos análisis demostraron que la proteína GFII puede ser fundamental para determinar si un cabello embrionario madura hasta convertirse en una célula ciliada adulta funcional o se convierte en una célula diferente que funciona más como una célula nerviosa o una neurona. Estos métodos regenerativos tienen el potencial de usarse en pacientes que han experimentado pérdida de audición debido a la edad o a factores ambientales como la exposición a sonidos de elevada intensidad.

Otro equipo de investigación vinculado al Massachusetts Institute of Technology (MIT) utiliza pequeñas moléculas para programar células progenitoras, descendientes de células madre en el oído interno, para crear las diminutas células ciliadas que permiten escuchar los sonidos. Se trata de un fármaco, desarrollado por una *startup* del MIT, que está diseñado para inyectarse en el oído interno para regenerar estas células dentro de la cóclea. En los ensayos clínicos, se ha mejorado la audición de las personas, según lo medido por las pruebas de percepción del habla (capacidad de comprender el habla y reconocer palabras). La figura 6.54 muestra la recuperación de células ciliadas (verde oscuro). Se observa como el fármaco consigue la reproducción de células ciliadas de forma notable.



**Figura 6.54.** Izquierda: detalle de cóclea con pérdidas notables de células ciliadas (verde oscuro). Derecha: después de aplicar el fármaco, la regeneración de células ciliadas es evidente (Winn, 2022).

Los diferentes grupos de trabajo que están investigando sobre la regeneración auditiva utilizan las técnicas más avanzadas en biogenética. La mayor dificultad que se está analizando es cómo conseguir el crecimiento de la célula original para diferenciar entre las células ciliadas interiores y las exteriores para implantarlas en el lugar correspondiente.

#### ***6.1.12.2. Recuperación auditiva mediante cirugía***

Dependiendo de la tipología del origen o de la causa del trauma acústico y de la fisiología de la persona, hay distintas partes del oído que se pueden resentir. Estas partes serían:

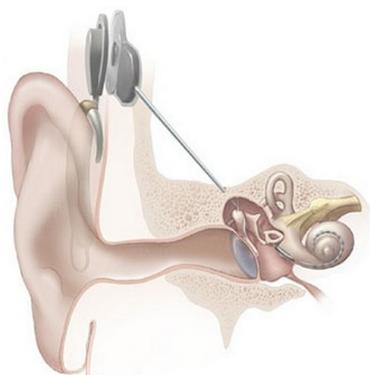
- Perforación/hundimiento del tímpano. En este caso, el tímpano queda inservible y no puede transmitir las vibraciones del sonido que llegan a través del conducto auditivo. Se produce ante un sonido de elevada intensidad, probablemente de tipo impulsivo (petardo, disparo, etc.) cerca del oído.
- Rotura o bloqueo de la cadena de huesecillos. Puede estar ligado con el anterior. Al margen de la rotura o no del tímpano, puede ser que la cadena de huesecillos pierda su configuración original, impidiendo la transmisión de las vibraciones captadas por el tímpano a la cóclea.
- Otoesclerosis. Es un crecimiento de hueso esponjoso sobre la ventana oval, lo que impide el libre movimiento del estribo. Es una enfermedad de origen desconocido y que en el 80% de los casos se transmite de forma hereditaria. La pérdida audi-

tiva se produce gradualmente. La intervención consiste en eliminar el tejido óseo esponjoso y poner una prótesis de parte del estribo.

Existen otras técnicas que se aplican cuando la falta de sensibilidad acústica se produce porque el oído medio no funciona correctamente. En estos casos, la falta de sensibilidad auditiva es imputable al oído medio, siendo el interno funcional. Estas técnicas no permiten una audición perfecta, sino recuperar parte de la capacidad auditiva.

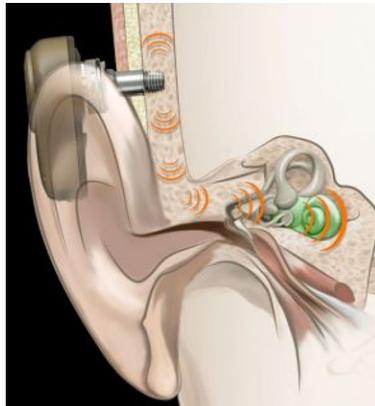
Estas se dividen en dos bloques:

- **Implante coclear.** Esta técnica se aplica en aquellos casos en los que el mecanismo de transmisión del oído medio no funciona correctamente. Se inserta un dispositivo que recoge el sonido externo y lo transmite directamente en forma vibratoria al interior de la cóclea. El implante coclear no cura o restablece la capacidad auditiva, pero ofrece a las personas que padecen sordera grave una oportunidad de escuchar sonidos externos. El mecanismo del dispositivo se muestra en la figura 6.55. El micrófono externo envía la señal a un amplificador- acondicionador de señal para actuar sobre un estimulador vibrátil situado dentro de la cóclea, que estimula una parte de esta. Eso le permite al paciente escuchar sonidos, aunque la parte en frecuencia no se ajuste a la real. Los dispositivos más modernos pueden corregir la respuesta en frecuencia por bandas para conseguir unos sonidos más «naturales». También hay modelos en los que el usuario puede modificar la configuración a través del dispositivo móvil. Esto permite escuchar conversaciones telefónicas directamente mediante conexión inalámbrica o escuchar la reproducción de sonido con cualquier otro dispositivo electrónico sin cables. La conexión entre la parte externa e interna se lleva a cabo mediante un acoplador magnético.



**Figura 6.55.** Detalle de un implante coclear. La parte externa (visible) contiene el captador de sonido y la parte electrónica junto con las baterías. La parte interna es un transductor que estimula mediante vibraciones a las células ciliadas en el interior de la cóclea.

- **Implante auditivo híbrido.** Es una técnica menos invasiva, en la que el sonido exterior se transmite por vía ósea (cráneo o mandíbula) hacia la cóclea para que esta, al captar las vibraciones, le permita al paciente tener unas informaciones sonoras. Esta técnica se aplica a personas con pérdida de sensibilidad grave a altas frecuencias, pero que mantiene cierta sensibilidad a bajas frecuencias. Normalmente, este fenómeno puede comportar un mal funcionamiento del oído medio. Este implante permite mejorar la capacidad para entender una locución, aunque requiere una fase de entrenamiento. La figura 6.56 muestra el implante auditivo híbrido, que consiste en una unidad exterior que capta los sonidos de alta frecuencia y los transfiere por vía sólida al cráneo (o mandíbula). Como la zona coclear está muy cerca del hueso, se puede estimular a las células ciliadas y tener información sonora.



**Figura 6.56.** Implante auditivo híbrido.

# Capítulo 7.

## Efectos del ruido sobre el entorno natural

### 7.1. Efectos sobre el entorno natural

Existen suficientes evidencias científicas sobre la influencia negativa producida por la actividad humana sobre la naturaleza, donde los hábitats naturales se ven cada vez más afectados y modificados por el ruido ambiente generado (McKinney, 2002) (Slabbekoon & Ripmeester, 2008). De hecho, muchas actividades humanas son ruidosas y a menudo provocan una importante modificación acústica del hábitat, que puede afectar tanto a humanos como a animales (Barber, Crooks, & Fristrup, 2010) (Brooks, Schulte-Fortkamp, Voigt, & Case, 2014). La facilidad para viajar a lugares lejanos y la creciente y obsesiva necesidad de adentrarse en zonas recónditas remotas «vírgenes» para hacerse un selfi han llevado a que los paisajes sonoros naturales sin un rastro acústico de presencia humana sean cada vez más difíciles de encontrar (Mennitt, Fristrup, & Nelson, 2015).

### 7.2. Efectos sobre la comunicación sonora de las aves

La forma en que los ambientes ruidosos alteran a los animales puede ser difícil de valorar, ya que no se puede saber el grado de afectación de forma directa, sino por observación en los cambios de conducta que se puedan producir. Sin embargo, existen evidencias científicas que avalan estas afectaciones. Numerosos estudios brindan información sobre cómo el ruido puede alterar el comportamiento y la comunicación de las aves. Todo esto puede traducirse en impactos sobre las poblaciones de aves, como la mayor dificultad para comunicarse entre comunidades, y puede proporcionar una comprensión crítica sobre cómo el aumento de los niveles de ruido en el medioambiente afecta a otras especies (Francis, Ortega, & Cruz, 2009).

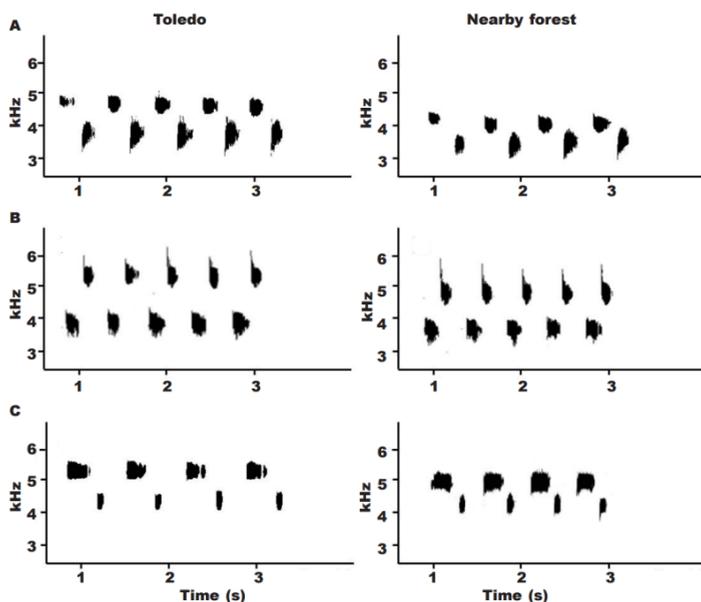
Las señales acústicas de comunicación entre algunas especies de aves se han vuelto más fuertes, más complejas, con mayor ancho de banda y más rápidas como consecuen-

cia del creciente nivel de ruido ambiente producido por la actividad humana. Es bien conocido que el entorno acústico puede afectar a la propagación sonora. Cuando se trata de enviar una señal sonora, el nivel de ruido ambiente resulta fundamental para llegar a establecer satisfactoriamente esa comunicación. A mayor nivel de ruido ambiental, menor probabilidad de que el mensaje sonoro pueda ser captado e interpretado por el destinatario. La competencia por el espacio acústico entre el mensaje sonoro y el ruido depende de la evolución temporal de la señal y los espectros de las fuentes de sonido y también de las propiedades de propagación, que pueden variar con la altura, la presencia de vegetación, su tipología y densidad y las características del suelo.

Es bien conocido que las frecuencias bajas tienen una longitud de onda mayor y, por ello, una capacidad de penetración de las estructuras sólidas superior a las altas frecuencias. Esta particularidad les permite atravesar fácilmente la vegetación densa. Por tanto, cuando el sonido atraviesa zonas con vegetación abundante, las altas frecuencias sufren una atenuación extra, mientras que las bajas frecuencias permanecen prácticamente inalterables. El espectro de señal sonora emitido no es igual al espectro recibido. Este fenómeno posibilita que el receptor reciba una señal sonora con un contenido de alta frecuencia inferior al original. Este desequilibrio energético puede dificultar su identificación en entornos ruidosos. También hay ejemplos de pájaros machos que persisten en cantar en sitios de reproducción ruidosos aunque logran un éxito de apareamiento significativamente menor en comparación con los machos en sitios más tranquilos (Halfwerk & Slabbekoorn, 2014). Aparentemente, las parejas potenciales en el ambiente ruidoso no escuchan a los machos cantando o no pueden obtener suficientes detalles del canto para evaluar su calidad. También es posible que a las hembras no les guste instalarse en un territorio ruidoso y, por tanto ignoren las llamadas de los machos.

Algunas aves aprenden sus cantos de los vecinos y cambian a tipos de canto utilizando una frecuencia más elevada en presencia de ruido ambiental. El nivel de ruido ambiental puede modular esta variación en frecuencia. No obstante, se ha constatado que en poblaciones pequeñas con menor nivel de ruido ambiente también se produce este efecto de incremento de la frecuencia radiada (Bueno-Enciso, Núñez-Escribano, & Sanz, 2015). La figura 7.1 muestra los espectrogramas de tres tipos de canto en una población pequeña (Toledo) y en el bosque.

Para cada canto se puede observar como el canto en ciudad y en el bosque son similares, aunque se observan dos diferencias. En primer lugar, las componentes tonales presentan unas frecuencias superiores en las grabaciones realizadas en ciudad respecto a las emitidas en un entorno natural como el bosque. El aumento de la frecuencia permite a las aves «separarse» del espectro de ruido ambiente presente en zonas urbanas. En segundo lugar, se observa una alteración en la cadencia rítmica del canto, como se puede observar en el canto C. El canto en ciudad se ralentiza respecto al canto en el bosque.

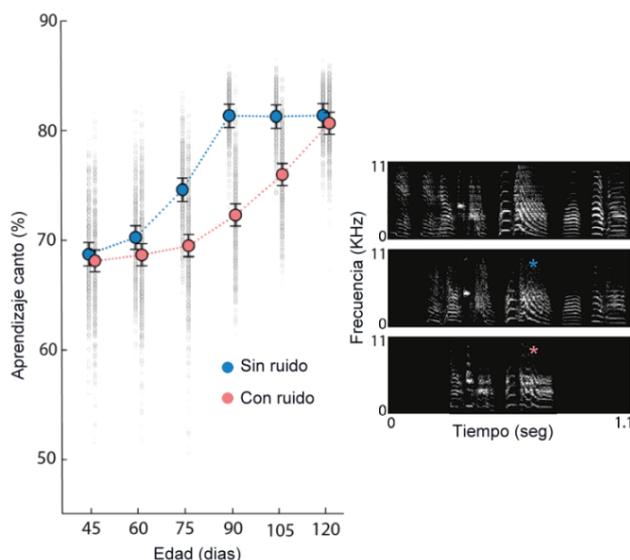


**Figura 7.1.** Izquierda: tres cantos (A, B y C) captados en una ciudad pequeña (Toledo). Derecha: los mismos cantos reproducidos en un bosque cercano.

Esta técnica es sorprendentemente similar a la que lleva a cabo el humano cuando se comunica con otro en un ambiente ruidoso. Alargar ligeramente las pausas entre los distintos fragmentos sonoros (palabra) permite al sistema auditivo receptor decodificar el mensaje con menos errores, ya que el cerebro tarda más tiempo en procesar la señal. Los registros sonoros se efectuaron a distancias de 10 a 15 m y se grabaron al menos diez estrofas de canto. Respecto al ruido de fondo, el nivel promedio en la población fue de 54,2 dBA (45,1-63,7 dBA), mientras que para el bosque fue de 39 dBA (30,9-48,9 dBA).

El ruido ambiente presente en las aglomeraciones urbanas afecta a la fase de aprendizaje del canto de las aves. Nótese que el aprendizaje se hace «de oído», por lo que los niveles sonoros elevados dificultan al polluelo escuchar y aprender las secuencias multi-tonales del canto del ave adulta.

El resultado de los trabajos de investigación efectuados revelan que el polluelo finalmente consigue aprender la secuencia del maestro, aunque necesita más tiempo, y la calidad del canto no se corresponde al 100% con la del adulto. La figura 7.2 muestra la fase de aprendizaje de aves sometidas a ruido ambiente en comparación con otras sin ruido. Se puede observar como el aprendizaje del canto contiene errores, debido a la interferencia del ruido ambiente (Brumm, Goymann, Deréghaucourt, Geberzahn, & Zollinger, 2021).



**Figura 7.2.** Izquierda: evolución del aprendizaje del canto de un polluelo, con y sin ruido. Derecha: espectrograma del canto; superior: original en la naturaleza; centro: sin ruido en entorno urbano; inferior: con ruido en entorno urbano.

### 7.3. Efectos fisiológicos sobre las aves

Hasta la fecha, los estudios sobre cómo las aves se ven afectadas por el ruido del tráfico se han centrado en los efectos sobre el comportamiento de canto de las aves, porque es lo que resulta más evidente, pero se sabe menos sobre cómo el ruido afecta a la salud de los animales expuestos.

En los pinzones cebra, el ruido afecta a su salud y al crecimiento de sus crías: los investigadores del Instituto Max Planck de Ornitología en Seewiesen descubrieron que el ruido del tráfico suprime los perfiles normales de glucocorticoides en la sangre, probablemente para prevenir los efectos negativos de los niveles crónicamente elevados en el organismo. Además, los pollitos de padres expuestos al ruido eran más pequeños que los pollitos de nidos tranquilos.

Los investigadores han descubierto que las aves sometidas al ruido de tráfico constante tenían niveles más bajos de corticosterona en la sangre, en comparación con cuando se reproducían en un ambiente tranquilo. Esto fue sorprendente porque el estrés a menudo deriva en niveles más altos de corticosterona, una hormona involucrada en la regulación del metabolismo durante las experiencias estresantes. En las aves que se reproducen en ambientes tranquilos, su corticosterona inicial se mantuvo baja durante la temporada de

reproducción; esto sugiere que las aves no se habituaron ni se acostumbraron al ruido, ya que sus niveles hormonales no presentaron los altibajos normales que ocurren durante el ciclo de reproducción normal en aves no expuestas al ruido (Zollinger, y otros, 2019). En cambio, la supresión de los niveles de corticosterona puede ser una forma de protegerse de las consecuencias negativas del estrés crónicamente elevado en el sistema inmunológico.

Un estudio llevado a cabo con aves en aviarios, con el fin de excluir otros factores generalmente asociados con el tráfico (como la contaminación química, la contaminación lumínica y otras) muestra que el ruido del tráfico por sí solo, sin todas las demás perturbaciones de un entorno urbano, cambia la fisiología de las aves y tiene consecuencias en su crecimiento. Los pollitos cuyos padres estuvieron expuestos al ruido del tráfico eran más pequeños que los pollitos de padres criados en aviarios silenciosos. Esto significa que incluso las especies de aves que a primera vista parecen adaptarse bien a las ciudades pueden verse afectadas por el ruido de tráfico.

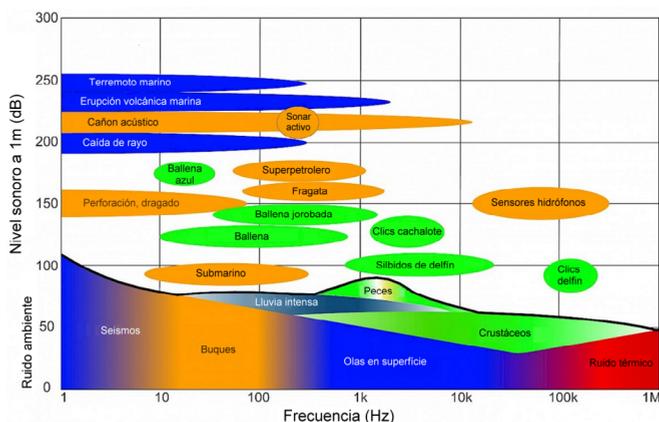
#### 7.4. Efectos sobre la fauna marina

La actividad humana en el mar genera ruido que se propaga por el medio llegando a lugares distantes y afectando a la fauna marina presente.



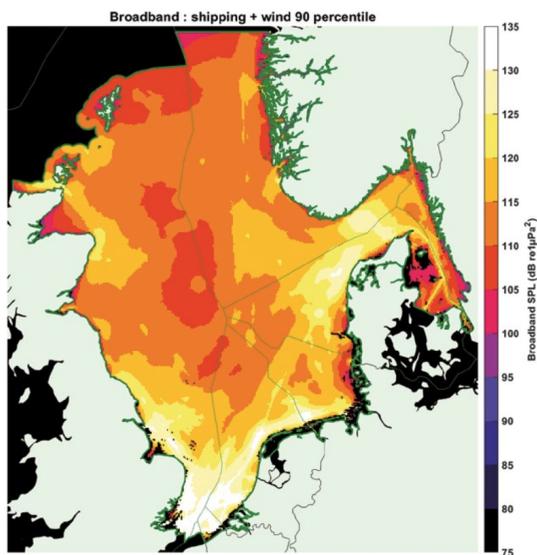
**Figura 7.3.** La presencia de cetáceos marinos cerca de buques de transporte de gran calado suele ser frecuente. (Imagen: EMSA).

El intervalo de frecuencias y los niveles sonoros que se pueden encontrar en el medio marino se resume en la figura 7.4 (Boyd, et al., 2008). Se destaca a los fenómenos naturales (como terremotos marinos y erupciones volcánicas marinas) como las fuentes sonoras más ruidosas, que radian frecuencias de 1 Hz a 1 kHz, aproximadamente. En el extremo opuesto tenemos el ruido térmico, por debajo del cual no es posible medir sonido (Audoly & Rousset, 2014).



**Figura 7.4.** Intervalo de frecuencias y niveles sonoros habituales en el medio marino.

El ruido generado por la actividad humana no se limita al ruido aéreo. También en los mares y océanos existe una elevada contaminación acústica que produce desorientación a los cetáceos y animales marinos que utilizan el sonido para comunicarse, orientarse y localizar a semejantes en la inmensidad del océano. La contaminación acústica en los mares es muy variable. La figura 7.5 muestra los niveles sonoros estimados en el mar del Norte por el tráfico de buques y el viento (European Marine Board, 2021).



**Figura 7.5.** Niveles sonoros estimados producidos por buques y el viento de la Unión Europea.

Se observa que los niveles de ruido bajo el agua en la zona cercana al canal de la Mancha son los más elevados, lo que coincide con la densidad de tráfico marino en esta zona.

No obstante, hay ciertas diferencias entre la propagación acústica en el aire y dentro del agua, que hay que tener en cuenta antes de hacer comparaciones con la contaminación acústica en el aire. El primer cambio está en la referencia para medir la presión sonora en ambos medios.

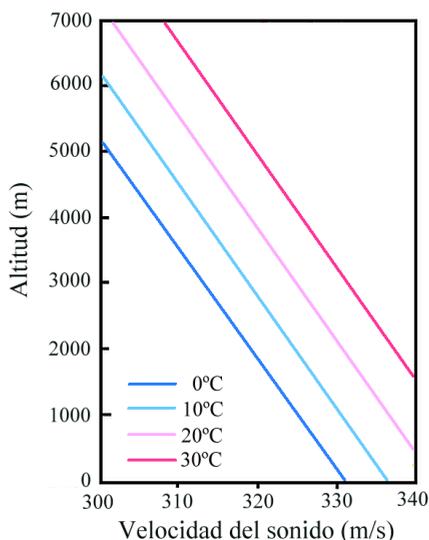
La presión de referencia para medir la presión acústica en el aire, se ha establecido por convenio en  $p_{\text{ref aire}} = 20 \mu\text{Pa}$ , que se considera el umbral de presión audible medio de la población. La presión de referencia para la presión acústica en el agua no se puede establecer a partir de un umbral auditivo bajo el agua, puesto que el oído no está adaptado para captar sonido por debajo del agua, lo cual no impide que se pueda escuchar sonido. Por convenio, se adopta una presión de referencia para los niveles bajo el agua de  $p_{\text{ref agua}} = 1 \mu\text{Pa}$ .

El cambio de referencia en la medida de la presión acústica produce un desnivel de 26 dB entre la presión medida en el aire o bajo el agua. Así, para la misma presión acústica medida, se traduce en un nivel de 26 dB más de presión en el agua que en el aire.

Hay otro cambio notable entre la propagación en el aire y en el agua. En la propagación por aire, en general solo la superficie terrestre produce reflexión, mientras que bajo el agua la separación entre aire y agua y el suelo marino constituye dos superficies entre las cuales se puede concatenar la onda acústica submarina. Esto posibilita que, en general, el sonido radiado hacia las capas altas de la atmósfera no vuelva al suelo (salvo cuando hay inversión térmica), mientras que en propagación subacuática el sonido puede quedar atrapado entre las dos superficies.

En el aire, la temperatura es el elemento que más altera la velocidad del sonido. Con la altura, la temperatura es decreciente, salvo que haya inversión térmica. La figura 7.6 muestra cómo varía la velocidad del sonido en el aire para diferentes temperaturas en la superficie en función de la altitud. No se consideran otros fenómenos.

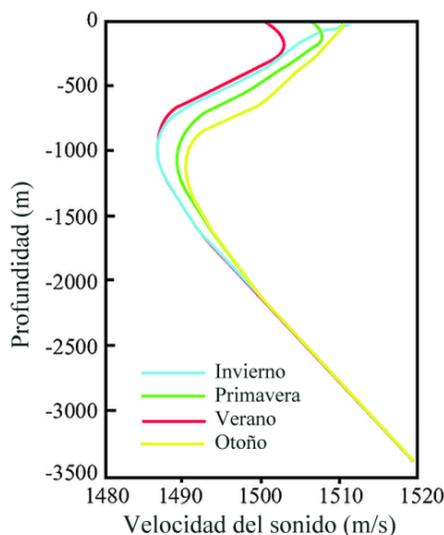
Se observa que el comportamiento es lineal. Por efecto del suelo, el sonido tiene tendencia a «subir», aspecto que ya conocían los griegos cuando diseñaban sus teatros abiertos. Las inversiones térmicas alteran la propagación sonora y el sonido se curva hacia el suelo, creando canales acústicos por donde el sonido puede propagarse. Esto facilita que el sonido sea perceptible más lejos de lo habitual, aunque la distancia recorrida no es muy elevada (normalmente, se puede llegar a una decena de kilómetros).



**Figura 7.6.** Variación de la velocidad del sonido en función de la altitud a partir de una temperatura del suelo determinada. No se consideran otros fenómenos.

Sin embargo, en la propagación bajo el agua, las condiciones acústicas son distintas. La temperatura del agua no varía tanto como en el aire en valores absolutos. Por otro lado, las variaciones de velocidad dependen de la profundidad y la salinidad del agua, lo que propicia la aparición de fenómenos de refracción, que no se producen con frecuencia en la propagación aérea. La figura 7.7 muestra la variación de la velocidad del sonido en el agua en función de su profundidad y de la estación climatológica.

La temperatura del agua cerca de la superficie puede variar estacionalmente. Con las temperaturas elevadas del verano, la velocidad del sonido en el agua es más baja que en invierno. A medida que se aumenta la profundidad, la temperatura del agua va disminuyendo. Para profundidades superiores a los 2.000 m aproximadamente, la temperatura del agua permanece casi constante. Se observa que donde hay más variaciones de la velocidad con la temperatura del agua es cerca de la superficie. La velocidad del sonido decrece al incrementar la profundidad, en general hasta los 500-1.000 m, dependiendo de la latitud del punto de observación. A partir de este punto, la salinidad del agua aumenta con la profundidad, lo que a su vez hace aumentar su densidad y, por tanto, aumenta la velocidad de propagación del sonido. Cuando se habla del nivel de ruido en los océanos, se distinguen dos situaciones: propagación en aguas profundas y en aguas poco profundas.



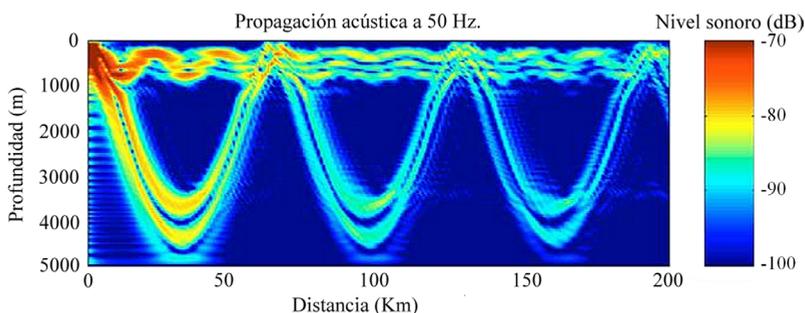
**Figura 7.7.** Velocidad del sonido en función de la profundidad y la estación meteorológica.

El ruido ambiental en aguas profundas proviene de un entorno en el que no hay interacción del fondo con el sonido de fuentes distantes (por lo general, la navegación comercial). Esto ocurre si existe una profundidad crítica (también llamada profundidad conjugada) en la que la velocidad del sonido, a una determinada profundidad, es igual a la velocidad del sonido en la superficie del mar. La profundidad crítica depende de la latitud y la profundidad del punto analizado. En el ejemplo mostrado en la figura 7.7, la profundidad crítica estaría alrededor de los 2.500 m la mayor parte del año. En verano, esta profundidad se situaría alrededor de los 2.200 m.

El modelo de propagación para aguas poco profundas y profundas se puede ver comparativamente en el ejemplo de la figura 7.8. Se observan en este caso dos tipos de propagación acústica simultánea. La primera se encuentra cerca de la superficie y se produce siempre en zonas de poca profundidad. En la parte superior del gráfico a la izquierda, se puede ver la fuente sonora que radia como un dipolo hacia abajo, por efecto de la superficie. Hacia la derecha, se observan unas ondulaciones paralelas a la superficie del agua, que se producen en la primera zona donde la temperatura del agua es decreciente y que, en este ejemplo, llega hasta los 1.000 m de profundidad aproximadamente. La segunda forma de propagación solo se produce para zonas profundas.

El sonido es proyectado hacia las profundidades y, por refracción, al llegar a la profundidad crítica, el sonido vuelve a subir a la superficie. Cerca de ella, vuelve a cambiar y el proceso se repite cíclicamente. Estas señales son las que pueden afectar a la

fauna que se encuentre a profundidades importantes y a distancias considerables. De este modo, la señal sonora queda atrapada entre la zona cercana a la superficie y la profundidad crítica, por lo que el ruido puede propagarse a distancias importantes gracias a este fenómeno. Nótese que, a cada ciclo, la energía va disminuyendo. Los canales acústicos constituyen una particularidad importante de la propagación acústica en los océanos. Si no hay canal superficial de propagación, cerca de la superficie el sonido solo puede ser captado en las llamadas zonas de convergencia, que se corresponden con los «picos» de los canales acústicos (forma sinusoidal).



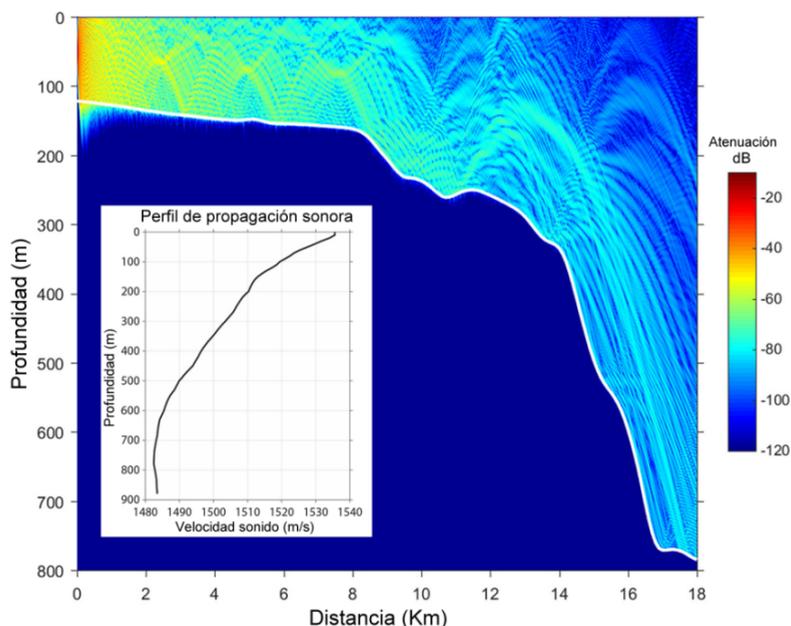
**Figura 7.8.** Propagación en zonas profundas y poco profundas para una fuente sonora que radia 50 Hz.

El equivalente a este fenómeno en el aire se podría modelar mediante la propagación en un tubo. Como es sabido, dentro de un tubo la propagación del sonido se produce por ondas planas. Aunque las ondas planas no sufren atenuación alguna cuando se propagan, en la realidad aparecen unas pérdidas muy pequeñas con la distancia recorrida. Conceptualmente, el tubo usado para experimentar con las ondas planas adoptaría en el agua una forma «sinusoidal» que representa el canal acústico generado de forma natural, por efecto de la refracción de la onda sonora debido a la variación de la velocidad del sonido en el agua en función de la profundidad.

El ruido generado cerca de la costa puede llegar a las profundidades del mar gracias a los canales acústicos. Esto generalmente no sucede en la propagación aérea y es una de las principales diferencias entre la contaminación acústica en el aire y en los mares. La figura 7.9 muestra un detalle de esta situación (Lynch, Gawarkiewicz, Lin, Duda, & Newhall, 2018).

Se puede observar la presencia de los canales acústicos que posibilitan que el ruido que recorre la plataforma cercana a la costa llegue fácilmente a las profundidades marinas, que en el ejemplo mostrado es de 800 m a una distancia de la costa de 17 km. Cabe destacar que, al no llegar a la profundidad crítica, los conductos acústicos mueren en el

suelo marino y, dependiendo de la naturaleza del material, puede haber una reflexión o no. En propagación en el aire, un punto situado a unos 17 km de distancia de la fuente sonora como el ruido de tráfico, sin visión directa, estaría claramente en zona de sombra acústica y el nivel sonoro sería imperceptible.



**Figura 7.9.** Propagación acústica desde la costa hacia las zonas profundas.

Cuando las ondas sonoras salen de una fuente, normalmente comienzan a extenderse de manera uniforme en todas direcciones. A medida que la onda de sonido se expande, la energía se distribuye esencialmente sobre la superficie radiada. Esto disminuye la intensidad del sonido en cualquier lugar. En general, la propagación para fuentes puntuales es esférica. En la dispersión esférica, la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia desde la fuente, lo que se traduce en un decrecimiento de 6 dB al doblar la distancia. Esto es cierto cuando el medio es lineal y no se produce la refracción del sonido.

Sin embargo, en el medio marino, debido al fenómeno de refracción o cuando estamos en zonas de profundidad moderada, la propagación pasa a ser cilíndrica, que supone una atenuación de 3 dB al doblar la distancia. Esta menor atenuación es la que facilita que el sonido que viaja por los canales acústicos producidos por la refracción pueda ser perceptible más lejos.

El agua también absorbe energía acústica. Debido a que el sonido es una onda de presión, su propagación requiere un movimiento de moléculas. Cada vez que hay movimien-

to, la fricción disipa energía y la propagación del sonido se atenúa. En el agua de mar, la fricción entre las moléculas convierte la energía del sonido en calor y eso se traduce en una absorción del sonido en el proceso. La absorción varía directamente con la frecuencia. El sonido de baja frecuencia se propagará a través del agua con muy poca pérdida en distancias muy largas. Se pueden escuchar cantos de ballenas de baja frecuencia en las cuencas oceánicas. Por el contrario, la alta frecuencia se atenúa rápidamente. El sonido de alta frecuencia, como el producido por un motor de una embarcación deportiva, puede propagarse solo unos pocos kilómetros desde la fuente, a pesar de tener niveles sonoros elevados. La absorción del sonido por el agua de mar disminuye con la profundidad en aproximadamente un 2% por cada 330 m de profundidad. Esta circunstancia hace que los canales acústicos tengan poca atenuación, facilitando la propagación sonora a largas distancias.

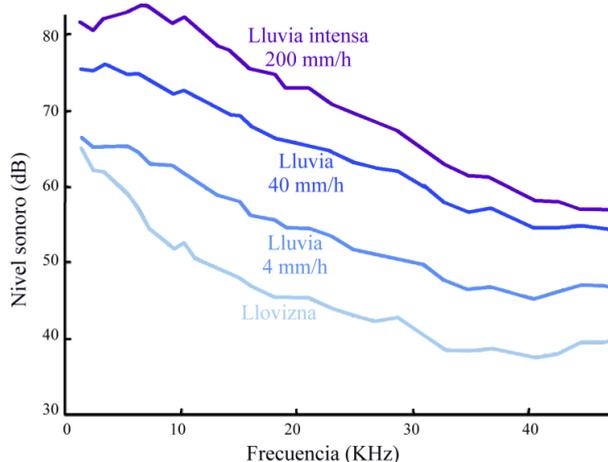
#### **7.4.1. Fuentes de ruido en el medio marino**

Las fuentes sonoras que nos podemos encontrar en el medio marino se pueden dividir en naturales (procedentes de fenómenos en los que no interviene el humano) y las artificiales (en los que la presencia humana es patente). Las intensidades sonoras y el intervalo de frecuencias que se pueden observar de ambas tipologías tienen ciertas similitudes, si bien los efectos acústicos de algunos fenómenos naturales no son equiparables a las fuentes artificiales.

##### ***7.4.1.1. Fuentes de ruido de origen natural***

Las fuentes de origen natural de ruido marino van desde procesos geológicos hasta fenómenos meteorológicos y fuentes biológicas. No todos los sonidos bajo el agua provienen de los animales: también se escuchan las olas rompiendo y la lluvia. Procesos geológicos como erupciones volcánicas, terremotos y deslizamientos de tierra se suman al ruido marino perceptible bajo el agua. En general, las fuentes de ruido naturales no biológicas suelen ser de gran tamaño, por lo que la energía radiada es elevada.

Respecto a las fuentes de sonido biológico marino en el agua, mayoritariamente se asocian a los mamíferos acuáticos, en particular las ballenas y los delfines. Estas fuentes sonoras siempre son puntuales y la energía radiada es limitada. Si bien estas son fuentes de sonido en el océano, no son las únicas fuentes biológicas de sonido marino. Varias especies de peces producen también sonidos bajo el agua. Entre los invertebrados, los camarones mordedores y algunos crustáceos suelen ser bastante ruidosos. Estos sonidos se pueden reconocer fácilmente cuando nos sumergimos cerca de la costa donde hay rocas, con presencia de fauna, por unos chasquidos. La lluvia no genera elevados niveles de ruido, pero por su extensión puede afectar a grandes zonas. La figura 7.10 muestra el nivel de ruido generado en función de la cantidad de precipitación (Dahl, Miller, Cato, & Andrew, 2007).



**Figura 7.10.** Espectro del nivel de ruido generado por diferentes intensidades de lluvia en el mar.

Otro factor climatológico que afecta al ruido marino es el viento. El viento levanta olas y el movimiento y los impactos que producen generan ruido. Solo las olas de cierta envergadura producen ruido apreciable. Wenz propuso un modelo para el ruido natural inducido por las ondas superficiales de altura significativa que se muestra en la figura 7.11. Dado que el modelo de Wenz es general y no describe la diversidad de niveles de ruido natural en aguas tanto profundas como poco profundas, estas curvas deben actualizarse en función de la situación particular.

La figura 7.12 muestra un detalle ampliado del nivel de ruido generado por el viento en función de su velocidad. Se muestra solo una parte de las curvas, desde la velocidad de viento de 3m/s (10,8 km/h) hasta la máxima de 33 m/s (118,8 km/h). El aumento de la velocidad del viento incrementa el nivel de ruido, pero mantiene la forma del espectro. El máximo de ruido se produce para la frecuencia de 300 Hz.

#### 7.4.1.2. Fuentes de ruido de origen humano

Las explosiones en el seno del agua, las perforaciones y otras actividades similares generan niveles de ruido muy elevados. Ciertos buques utilizan señales de elevada potencia que sirven para localizar objetos en las profundidades. Todas estas fuentes son puntuales y no suelen ser las más frecuentes. Las principales fuentes de ruido en los mares presentan características de persistencia en el tiempo y lugar. En este grupo encontramos el ruido producido por los buques, que en general utilizan rutas preestablecidas, como si se tratara de una vía de circulación.

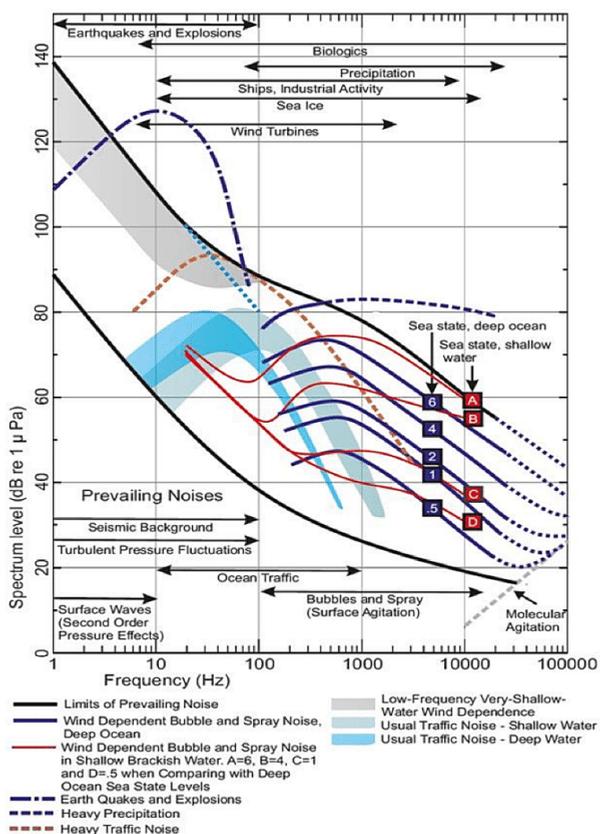


Figura 7.11. Niveles de ruido en el agua producidos por el viento comparados con otras fuentes de ruido marino (Wenz, 1962).

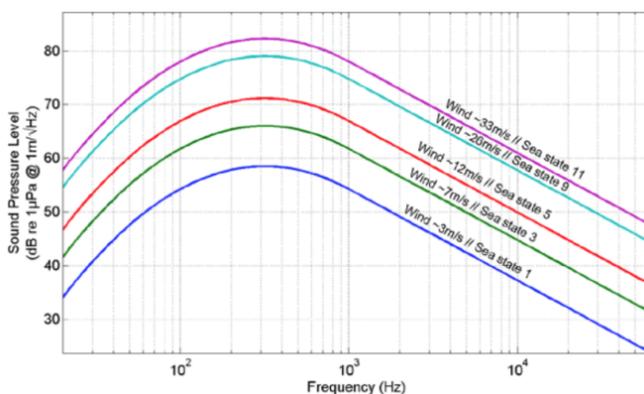
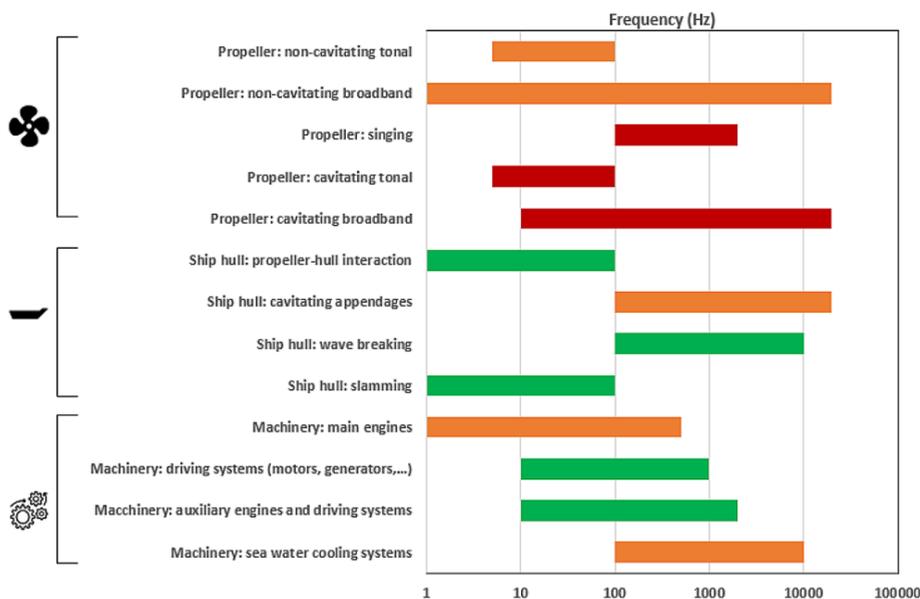


Figura 7.12. Niveles de ruido en el agua producidos por el viento (Wenz, 1962).

Las fuentes sonoras que tienen su origen en los buques se distribuyen en tres tipologías (EMSA, 2021): las palas de las hélices, el casco y la maquinaria a bordo de los buques. La figura 7.13 muestra el intervalo de frecuencias que radian los diferentes tipos de fuentes sonoras artificiales que podemos encontrar en medios marinos.



**Figura 7.13.** Contribución y margen de frecuencia radiado por diferentes tipologías de fuentes de ruido bajo el agua originado por los buques. Rojo: gran contribución; naranja: contribución media; verde: baja contribución (EMSA, 2021).

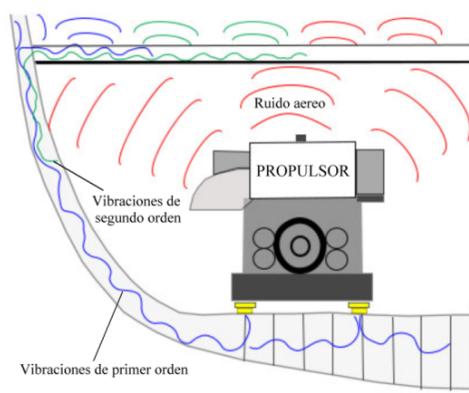
Como se puede observar, las hélices de los buques constituyen la fuente sonora más importante y además presenta una banda de frecuencias radiadas muy amplia, lo que posibilita un efecto enmascarador sobre las señales bioacústicas muy notable.

El giro de una hélice en el agua suele producir el fenómeno de cavitación. Este fenómeno implica la aparición espontánea de burbujas de vapor de agua. Estas burbujas, que tienen diferentes diámetros, estallan pasados unos segundos y esto genera ruido de banda ancha. A mayor velocidad de giro de la hélice, mayor nivel de cavitación. Por otro lado, incrementar de tres a cinco el número de palas reduce el empuje de la hélice y también el nivel de ruido en un 55%. Las fuentes tonales se producen en los armónicos de la frecuencia de paso de las palas de la hélice, así como en las frecuencias naturales del casco del barco en el caso del ruido de interacción hélice-casco. Los intervalos de frecuencia dados son indicativos de los buques mercantes.

### 7.4.2. Espectro en frecuencia del ruido marino

Una de las principales fuentes de ruido marino la forman los buques que surcan los mares. El contacto entre el agua y el casco del buque presenta una buena adaptación de impedancias y, por tanto, cualquier ruido o vibración producida en el seno del buque se transmite siempre al medio que lo rodea. Los buques de tamaño medio o grande tienen grandes superficies en contacto con el agua y esto aumenta la facilidad de transmitir ruido al medio marino. En este tipo de buques, el motor o los motores están ubicados en la parte inferior del buque. Por sus dimensiones, el peso y los esfuerzos que llevan a cabo, suelen estar fijados rígidamente al casco, lo que desde el punto de vista acústico supone un grave problema.

El casco por sí solo no genera vibraciones, pero el motor sí, como se muestra en la figura 7.14, donde se aprecia que las vibraciones procedentes del bloque motor se propagan por las diferentes subestructuras del buque, llegando al casco.

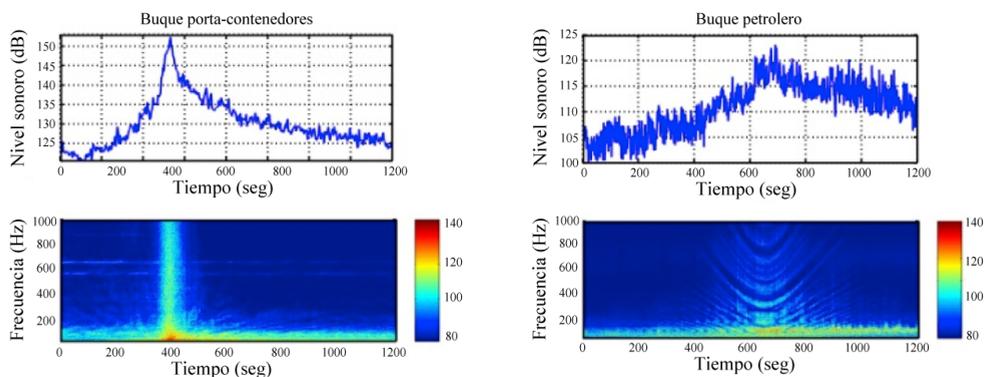


**Figura 7.14.** El propulsor del buque es el generador de vibraciones más importante.

Las vibraciones generadas directamente por el propulsor son las de primera generación y afectan a todas las estructuras del buque. El ruido a través de la propagación aérea puede impactar con los mamparos de la sala de máquinas, que al recibir la energía acústica vibrarán, y estos, a su vez, transmitirán esta vibración a las estructuras del buque. Estas tienen una energía menor y su espectro está claramente desplazado hacia las bajas frecuencias.

Una vez que las vibraciones llegan a las estructuras del buque, no es posible eliminarlas. Gracias a la gran superficie de la parte sumergida del casco, la energía sonora radiada al agua es bastante elevada. La figura 7.15 muestra el paso de dos buques de distinta tipología ante un punto de observación cercano (Jiang, Lin, Sun, Yi, & Shan,

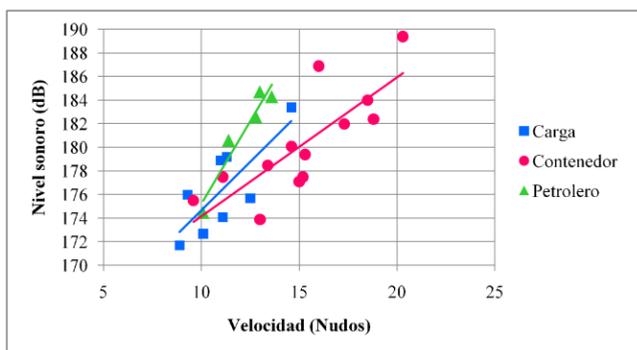
2020). A la izquierda, se muestra el espectrograma de un portador de contenedores. A la derecha, el espectrograma de un petrolero. Se puede observar como la firma acústica es aparentemente bastante diferente.



**Figura 7.15.** Izquierda: firma acústica de un portacontenedores de 366 m de longitud, un calado de 12,9 m y una velocidad de 20,3 nudos. Derecha: petrolero de 125 m de eslora, 5,5 m de calado y una velocidad de 11,4 nudos.

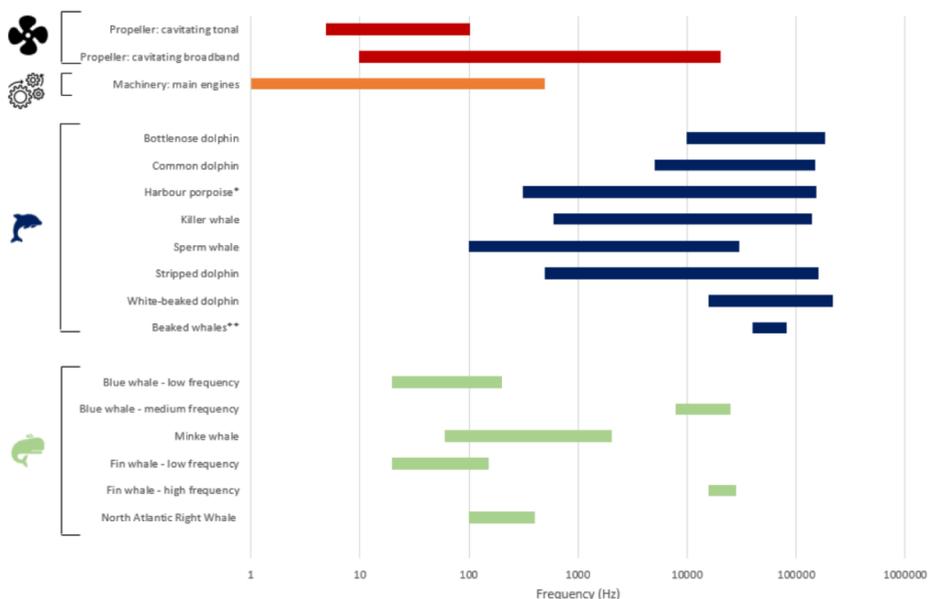
El buque portacontenedores presenta un pico de nivel muy pronunciado cuando pasa frente al punto de observación, mientras que el petrolero presenta un pico más suave debido a su menor velocidad. La mayor velocidad del buque portacontenedores genera más nivel de ruido, reflejado por los tonos rojos a los 400 s, aproximadamente. En las gráficas superiores, podemos observar que el pico de ruido del petrolero queda unos 30 dB por debajo del portacontenedores, debido a que pasaba a mayor distancia. Se puede apreciar también el efecto doppler en el sonido lejano del petrolero. Otra característica destacable es que las gráficas del nivel sonoro no son simétricas en ambos casos, lo que significa que los niveles de ruido de proa o popa son distintos debido a que en popa están la hélice o hélices, mientras que en proa no hay hélices. Por último, se comprueba que la máxima energía radiada está por debajo de los 200 Hz, siendo las hélices y el propulsor (generalmente, diesel) los causantes de dicha energía.

La velocidad del buque es un parámetro directamente ligado al nivel de ruido emitido. Otros factores importantes, como la longitud del casco y el calado, no tienen una relación directa con el nivel de ruido radiado. Como los buques pueden pasar a diferentes distancias del punto de medida, se calcula la distancia a la que pasa el buque y se mide el nivel sonoro recibido. Por cálculo se obtiene el nivel de referencia a 1 m de distancia, que, por este motivo, suelen dar valores elevados de presión sonora. La figura 7.16 muestra la correlación entre la velocidad del buque y el nivel de referencia a 1 m de distancia para las tres categorías de naves consideradas. Se muestra la curva de regresión lineal para cada caso.



**Figura 7.16.** Relación entre nivel sonoro de referencia y la velocidad para buques de carga, portacontenedores y petroleros.

Seleccionando las fuentes más ruidosas, la figura 7.17 muestra el grado de coincidencia entre las frecuencias emitidas por las fuentes artificiales. El margen de frecuencias perturbadoras producidas por las hélices y la maquinaria abarca desde 1 Hz hasta 20 kHz, aproximadamente. Las señales bioacústicas de los cetáceos marinos abarcan desde 15 Hz hasta 180 kHz, aproximadamente. Se puede comprobar cómo el grado de solapamiento es elevado, dejando «libre» las bandas de frecuencia más altas, por encima de 20 kHz.



**Figura 7.17.** Coincidencia entre las señales acústicas utilizadas por los cetáceos y los ruidos emitidos por las hélices y la maquinaria de buques en el medio marino (EMSA 2021).

Se observa que la coincidencia del ruido sobre las señales emitidas por las ballenas es notablemente superior que sobre los delfines, debido a que estos últimos emiten señales de mayor frecuencia que no pueden ser enmascarados totalmente por el ruido.

## 7.5. Funciones básicas del sonido en mamíferos marinos

Los cetáceos utilizan los sonidos para cuatro funciones básicas:

- Interacción social. Mediante los sonidos emitidos, se pueden comunicar con otros seres semejantes. Algunos estudios revelan que distintas comunidades de cetáceos tienen patrones sonoros distintos, por lo que pueden reconocer a un semejante de otra comunidad. Las señales emitidas se corresponderían con la vocalización humana. Estas señales están formadas por componentes tonales con modulación de frecuencia y tiempo. El ruido de hélices y maquinaria enmascara completamente las bandas de frecuencia utilizadas por los cetáceos.
- Detectar objetos cercanos. Los cetáceos emiten sonidos *burst* de corta duración y elevada frecuencia, que se reflejan en los objetos cercanos. En función del retardo entre la emisión y recepción acústica, el cetáceo deduce la distancia a los objetos, a veces sin necesidad de verlos. Es como un sistema sonar. Estas señales son más difíciles de enmascarar por el ruido de hélices y de maquinaria.
- Localización de presas. Es una señal similar a la anterior, pero con un barrido de frecuencia. El objetivo del cetáceo es localizar algo comestible. Si la reflexión del sonido muestra algo muy grande, puede ser un depredador. Si el reflejo procede del cuerpo de un pez, la reflexión presenta un máximo a la frecuencia de resonancia de este. El delfín mular (*Tursiops truncatus*) utiliza esta información para enviar una señal acústica de elevada intensidad a esa frecuencia que deja aturdido al pez el tiempo suficiente para acercarse rápidamente y atraparlo. Estas señales quedan completamente enmascaradas por el ruido de hélices y de maquinaria.
- Navegación. Las señales utilizadas son similares a las de localización de presas, pero tiene por objetivo enviar un mensaje a los semejantes de «estoy aquí». Suele tener más componentes tonales, con variaciones en frecuencia propias de la comunidad. El ruido de hélices y maquinaria enmascara completamente el espectro en frecuencia utilizado por los cetáceos.

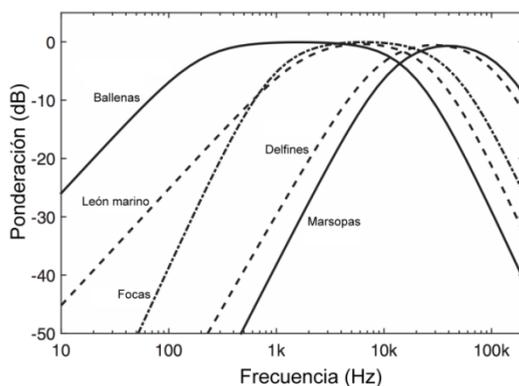
El impacto del ruido de los buques sobre la fauna marina sigue siendo motivo de gran preocupación. A pesar de esto y de la creciente atención de la investigación en los últimos años, existen varios problemas comunes desde el punto de vista de la física y la biología de este tema interdisciplinario. Valorar los niveles sonoros en los océanos es una tarea muy compleja, que actualmente se resuelve mediante modelos. En consecuencia, sigue habiendo una serie de lagunas de conocimiento que limita conocer el grado real de afectación sobre

las especies marinas. Sin embargo, la creciente conciencia, la mejora de la tecnología, el aumento de la disponibilidad de flujos de datos de múltiples variables y los avances analíticos han comenzado a proporcionar un contexto adecuado para las evaluaciones de impacto.

## 7.6. Sensibilidad auditiva de los mamíferos marinos

Los animales marinos no escuchan todos los sonidos con la misma intensidad. Esta es una deducción basada en la observación. Para tener en cuenta esta particularidad, en las mediciones acústicas se aplica una curva de ponderación para dar cuenta cuantitativamente de estas diferentes sensibilidades, sobre todo cuando se considera si un sonido puede afectar a la audición de un animal. Esta ponderación elimina o minimiza la influencia de todas aquellas frecuencias que no son perceptibles para el animal. Es obvio que hay una dificultad en obtener estos datos, dado que no sabemos comunicarnos con los mamíferos marinos para valorar su sensibilidad auditiva.

Sin embargo, los primeros trabajos establecieron las llamadas curvas M (mamífero marino) (Finneran & Schlundt, 2011). Estas funciones de ponderación de frecuencia M son análogas a las funciones de ponderación C de los humanos. Las funciones de ponderación M reducen la contribución a las frecuencias que están cerca de los límites superior e inferior del intervalo de audición estimado de cada tipo de grupo de audición. La figura 7.18 muestra las curvas de ponderación M. Las funciones M tienen la misma utilidad que la conocida ponderación A usada para medir el nivel sonoro a que se ven expuestos los humanos. Pretendidamente, la ponderación A valora cómo se perciben los sonidos, pero la realidad es que los resultados obtenidos con esta ponderación están muy lejos de coincidir con las valoraciones subjetivas de los humanos.



**Figura 7.18.** Curvas de ponderación para diferentes grupos de mamíferos marinos (NOAA, 2018) (Tougaard & Beedholm, 2019).

A pesar de la falta de datos relativa a la percepción sonora y el grado de molestia que puede causar a los mamíferos marinos el nivel de ruido, usar estas redes de ponderación permite obtener datos más fiables.

### 7.7. Mitigación del impacto sonoro bajo el agua

Existen diversas técnicas que pueden reducir apreciablemente el nivel de ruido y, en consecuencia, el impacto sonoro en el medio marino. Todas las soluciones se aplican al origen del sonido: las vibraciones. Cualquier vibración en el seno del agua se va a convertir en una señal acústica que puede llegar muy lejos. Las medidas de mitigación generalmente se dividen en dos categorías principales: medidas «técnicas» o de «diseño», que pueden aplicarse tanto a embarcaciones nuevas como existentes, y medidas «operativas», para la flota existente.

La selección adecuada de medidas de mitigación es una tarea compleja y debe evaluarse caso por caso (de Jong, Harmsen, Bekdemir, & Hulskotte, 2020). La mitigación efectiva requiere la evaluación de la huella de ruido de los buques y la derivación de mapas de sonido con información sobre el tráfico marítimo, los niveles de las fuentes de ruido y la propagación como entrada de datos. Además, es necesario incluir la fauna marina sensible presente y los impactos potenciales sobre ella, aunque esto puede tener que suponerse debido a la falta de información o conocimiento detallado.

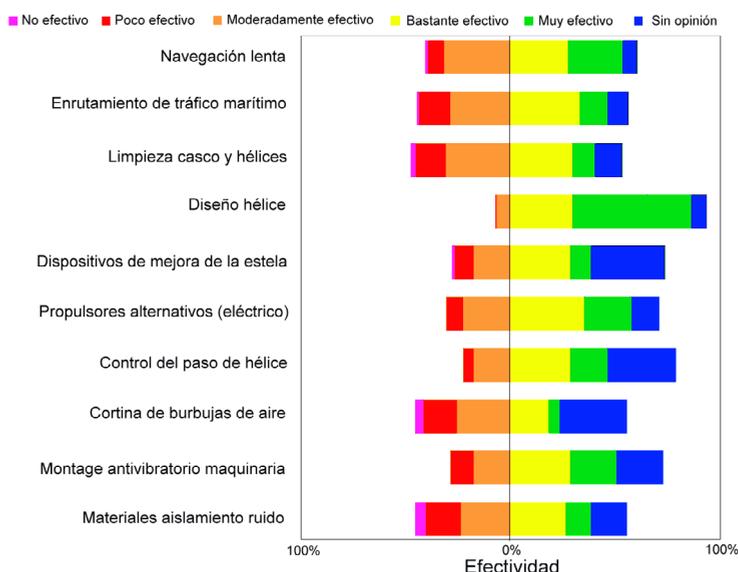
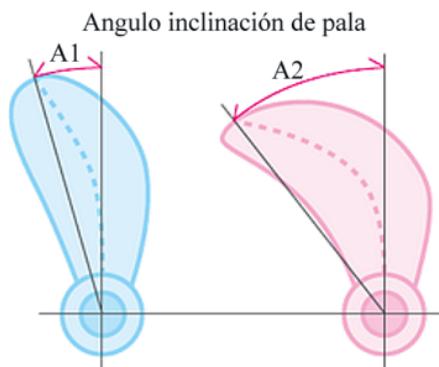


Figura 7.19. Efectividad de las medidas de mitigación del ruido en opinión de un panel de expertos (TNO, 2020).

La figura 7.19 muestra la efectividad prevista por un panel de expertos ante todas las posibles mejoras que se pueden aplicar. Se observa que, de las mejoras propuestas, la mayoría de ellas presentan soluciones eficientes. Entre todas, se constata que el diseño de la hélice aparece como la solución más eficiente para la reducción del nivel de ruido radiado por un buque. En el lado opuesto, la cortina de burbujas no se considera una solución eficiente. En este caso, realmente la cortina de burbujas reduce la transmisión del ruido producido por la hélice a cambio de introducir otro ruido, lo que mayoritariamente no se considera eficiente.

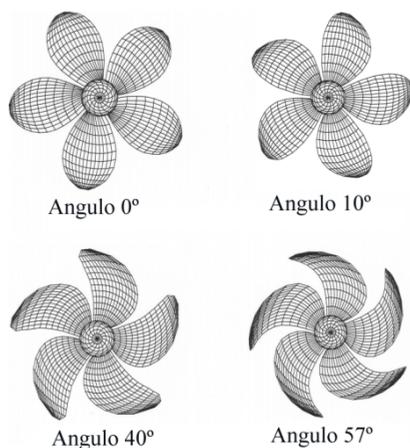
Reducir las vibraciones de los sistemas mecánicos es la manera más eficiente de minimizar el nivel de ruido radiado por una embarcación. En las pequeñas embarcaciones, el foco principal de ruido se concentra en el propulsor, mientras que en los grandes buques, el casco, los propulsores y las hélices por separado constituyen las principales fuentes sonoras. Mejorar el diseño de la hélice es sobre la que se ha trabajado más intensamente, dado que las soluciones no son triviales.

Las hélices Kappel desplazan el extremo de la pala lateralmente hacia el sentido contrario al giro de su posición tradicional, introduciendo el llamado ángulo lateral de pala. Con esto se mejora notablemente el rendimiento y se reduce la cavitación y el ruido generados. La figura 7.20 muestra este ángulo.



**Figura 7.20.** Concepto de ángulo lateral de la pala de una hélice Kappel.

La pala de la derecha presenta un mayor ángulo de inclinación. Esto ayuda a que la zona de transición entre palas sea más uniforme. Elevando este ángulo, podemos llegar a las hélices que utilizan los submarinos para tener una navegación más silenciosa y evitar ser detectados por otros buques, como se muestra en la figura 7.21, para un ángulo de  $57^\circ$ .



**Figura 7.21.** Ejemplos de la influencia del ángulo de inclinación de pala para un propulsor de cinco palas.

Se ha comprobado que incrementar en número de palas de tres a cinco reduce en un 55 % el nivel de ruido generado por la hélice. Esto es a costa de reducir el empuje que puede proporcionar la hélice: un mayor número de palas reduce la cavitación que pueden hacer las palas. Por otro lado, al incrementar el ángulo de pala de 12° a 40° se obtiene una reducción del nivel de ruido radiado del 48 %. Aplicando ambas mejoras, se reduce el nivel de ruido radiado en un 77 %, medido cerca del casco (Feizi, Ghadimi, Reza, & Soroushan, 2013).

Algunos trabajos de investigación con hélices Kappel muestran que pasar de siete a ocho palas reduce en 15 dB el nivel de ruido radiado. Por otro lado, el empuje se reduce en un 80 %; sin embargo, esto reduce drásticamente las vibraciones generadas en la hélice. Estas vibraciones van al casco de buque, dado que no hay sistema anti vibratorio que se puedan utilizar en este punto, lo que se traduce en la reducción del nivel de ruido del casco (Anderson, Kappel, & Spangenberg, 2009).

## 7.8. Electrificación del propulsor marino

La electrificación del propulsor marino ofrece diferentes ventajas. La primera es un elevado par que lo hace ideal para la propulsión marina, ya que con menos revoluciones se obtiene un buen empuje. En segundo lugar, cuando el motor eléctrico gira no genera vibraciones, ya que el rotor gira libremente sobre su eje. En el motor de combustión interna, recordemos que se pasa de un movimiento alternativo a uno rotativo, y esto conlleva siempre la aparición de vibraciones. Por último, el giro del motor eléctrico no

genera ruido, como sí lo hace el motor de combustión interna, ya que las explosiones dentro de los cilindros deben evacuarse al exterior y en ocasiones se hace bajo el agua.

Ilustramos, con un estudio llevado a cabo en Perth (Australia), las mejoras reales que puede suponer sustituir el propulsor convencional por uno eléctrico (Parsons, Duncan, Parsons, & Erbe, 2020). Los sonidos de dos tipos de embarcaciones se registraron en las aguas poco profundas del río Swan, en Perth. Se seleccionaron varios pases de dos transbordadores de pasajeros de 10 m alimentados con energía solar y, a modo de comparación, dos transbordadores de pasajeros de 25 m alimentados convencionalmente (motor diesel interior).

El primer análisis se realizó con 58 y 16 pases de transbordadores eléctricos (en 2016 y 2017-2018, respectivamente) y 10 y 14 pases de transbordadores convencionales (2016 y 2017-2018, respectivamente) a una distancia de 5 m. El segundo análisis se llevó a cabo con 17 y 1 pases del transbordador eléctrico (2016 y 2017-2018, respectivamente) y 9 y 3 pases del transbordador convencional (2016 y 2017-2018, respectivamente).

Los resultados indicaron que, para un intervalo de 55 m, el tipo de transbordador de propulsión convencional produjo 157 dB, mientras que las mismas métricas para el transbordador eléctrico fueron 12 dB más bajas. En frecuencias por debajo de 500 Hz, los niveles espectrales del transbordador eléctrico en un intervalo inferior a los 5 m fueron de 10 dB a 25 dB más bajos que los del transbordador convencional, lo que implica un beneficio potencial para los animales que usan comunicación de baja frecuencia si los motores eléctricos reemplazan los motores de combustión interna.

# Capítulo 8.

## Percepción binaural del sonido

### 8.1. Introducción

La percepción natural del sonido en el ser humano se efectúa a través de los dos oídos que tenemos a ambos lados de la cabeza. Muchos animales tienen la misma morfología que persigue el mismo fin: localizar la procedencia de un sonido. Para el ser humano, esta capacidad ha sido especialmente fundamental en la época prehistórica, para alertar de los peligros que le rodeaban. El primer estudio documentado sobre la localización de sonidos lo llevó a cabo Venturi en 1796. Venturi andaba alrededor de una persona que tenía los ojos cerrados, tocando notas con una flauta, y demostró que las personas podían saber la procedencia del sonido sin tener que verla. Posteriormente, otros estudios sobre el fenómeno de la localización del sonido utilizaron fuentes de sonido naturales (silbidos, campanas, diapasones, etc.) y pidieron a los oyentes que señalaran en la dirección percibida (*localización*, Rayleigh, 1876) o que determinaran una diferencia entre fuentes sonadas desde diferentes ubicaciones (*discriminación*, Almidón, 1905).

Nuestros oídos captan la información sonora que, una vez convertida en impulsos eléctricos, llegan al cerebro, el cual procesa los datos y da sentido a los sonidos y extrae la información. Si bien con un oído es suficiente para captar los sonidos, reconocerlos y extraer información, hay que tener en cuenta que todo esto es posible siempre que las señales sonoras que nos interesan destaquen suficientemente del ruido ambiental y que, en caso de haber reverberación, esta sea muy moderada. Ciertamente, esto no ocurre con frecuencia en el día a día y, a pesar de esto, nuestro sentido auditivo nos permite mantener conversaciones con relaciones de señal/ruido (S/R) negativas o entender mensajes de voz en ambientes reverberantes. Una de las primeras ventajas que se puede destacar de la audición con dos oídos, es el aumento de la sonoridad binaural respecto de la monoaural, 3 dB cuando estamos con niveles cercanos al umbral auditivo y 6 dB cuando tenemos niveles superiores. Disponer de dos oídos nos permite llevar a cabo dos funciones fundamentales en el proceso auditivo.

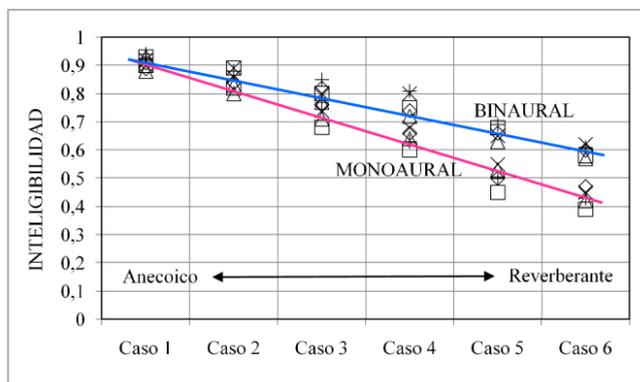
La primera función, localizar la procedencia del sonido, nos permite orientarnos en nuestro entorno. Si bien la visión cubre la mayoría de necesidades para orientarnos, el oído complementa esta función en algunas ocasiones y especialmente cuando la visión no es suficiente. Por ejemplo, podemos escuchar sonidos procedentes de la habitación contigua y llegar a deducir que hay gente sin ver nada o, mientras andamos por la calle, escuchar un vehículo que llega por detrás sin necesidad de verlo.

La segunda función es bastante más potente, porque gracias a ella podemos entender mensajes en entornos ruidosos o acústicamente complejos, es decir, permanecemos «conectados» con nuestros semejantes en condiciones en las que hoy en día una máquina no podría. Por ejemplo, una de las cosas que habitualmente las personas sin ninguna discapacidad auditiva puede hacer «gracias» a tener dos oídos es la «cancelación» parcial del ruido de fondo, aspecto muy útil cuando mantenemos una conversación en un entorno desfavorable. Aunque nos hablen en un ambiente ruidoso, conseguiremos fácilmente la información suficiente para entender el mensaje. Esto es posible, por un lado, gracias a la percepción y al procesado binaural del sentido auditivo, y, por otro, porque la señal del habla tiene mucha información redundante que no sería estrictamente necesaria para entender el mensaje. Gracias a esta redundancia, se puede perder parte de la información original y, sin embargo, entender el mensaje en condiciones acústicas realmente complejas. Asimismo, en los espacios con cierta reverberación, la audición binaural permite entender una locución o disfrutar de la música compuesta para órgano de Bach, por ejemplo. Podríamos decir que con la audición binaural se mejora la relación señal-ruido (S/R) percibida y también se disminuye la reverberación percibida (Barti R. , 2005), como muestran las figuras 8.1 y 8.2 basadas en pruebas realizadas a cinco personas en seis situaciones distintas.

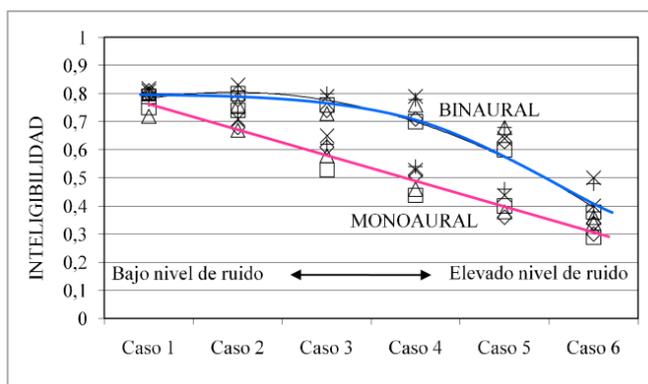
La figura 8.1 muestra la influencia de la reverberación. Las pruebas se realizan en salas de distinto tamaño, con volúmenes similares, pero con distinto tratamiento acústico. Se observa que, a mayor reverberación, más dificultad en entender el mensaje de voz. La audición binaural supone una ventaja respecto a la monoaural. Los tiempos de reverberación utilizados en las pruebas se corresponden con estancias comunes, es decir, alejadas de los extremos, de un ambiente anecoico o una sala reverberante.

La figura 8.2 muestra los resultados para seis escenarios distintos, donde se mantiene la misma sala con una reverberación bastante moderada, pero se añade mayor o menor nivel de ruido a la señal de voz. Se compara la inteligibilidad para una audición normal (binaural) o monoaural. Se observa que, con bajos niveles de ruido enmascarante, la inteligibilidad con audición binaural o monoaural es muy similar, mientras que, para entornos con mayor nivel de ruido ambiente, la audición binaural es mejor que la monoaural. Sin embargo, para niveles de ruido ambiente elevados, la audición binaural tampoco mejora los resultados respecto a la audición monoaural. Esto significa que

nuestro sistema auditivo precisa de un umbral mínimo de relación S/R para tener una inteligibilidad aceptable.



**Figura 8.1.** Mejora de la inteligibilidad con la audición binaural en entornos reverberantes.



**Figura 8.2.** Mejora de la inteligibilidad con la audición binaural en ambientes ruidosos.

Con un experimento muy sencillo se puede entender la importancia de tener dos oídos. Se trata de grabar el fragmento de una clase situándonos en primera fila para disfrutar de un mayor nivel directo del profesor y menos ruido (intentamos optimizar la relación S/R). La grabación de unos pocos minutos se efectúa con dos canales (estéreo). Al reproducir la señal grabada se escucha con un solo auricular, ya sea el derecho o el izquierdo, y posteriormente con dos auriculares. Observaremos una serie de diferencias destacables entre ambas reproducciones:

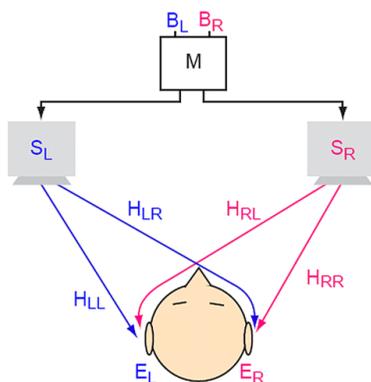
- Con la escucha monoaural (un canal), no reconocemos el espacio donde se hizo la grabación, ya que, si bien podemos escuchar la voz, el locutor parece estar mucho más lejos de lo que estaba en realidad. Además, el ruido ambiental dentro del aula ha aumentado desmesuradamente respecto de lo que se percibía *in situ* en la clase. Y, por último, la reverberación de la sala parece haber aumentado notablemente, como si la sala tuviera un volumen muy superior. Por todo ello, la locución reproducida con un solo canal no es clara y cuesta mucho de entender algunas palabras, y lo más probable es que «perdamos» algunos fragmentos de la locución.
- Con la escucha en estéreo, reconoceremos el espacio donde estábamos y notaremos que el profesor (fuente sonora) está ahora mucho más cerca de nuestra posición (igual que en la realidad) y que los ruidos del entorno y la reverberación de la sala coinciden con las que recordábamos en el momento de hacer la grabación. Este cambio de nuestra percepción, con la misma grabación, no se debe a la calidad de la grabación en sí, ni al tipo de soporte utilizado. Es la reconstrucción que el cerebro realiza del espacio 3D partiendo de una escena con dos canales, lo que posibilita la reconstrucción del espacio sonoro tal como era y nuestro cerebro puede «extraer» fácilmente la información deseada (voz del locutor). Destacamos que, para el proceso de «reconstrucción» espacial del sonido, no hace falta una señal binaural obtenida con un maniquí, gracias a la plasticidad de nuestro cerebro.

Para el experimento citado, tampoco precisamos de un micrófono de precisión. Con un simple micrófono electret estéreo, o dos de mono en una simple configuración A/B y separados pocos centímetros, se puede hacer la grabación estéreo que nos permita reconstruir el espacio sonoro. Los desniveles y los pequeños desfases de las señales que llegan a los micrófonos son suficientes para permitir al cerebro reconstruir la situación acústica original. Obviamente, si queremos hacer grabaciones con mayor realismo y en las que lo que queremos es determinar con exactitud la posición de la fuente sonora en el espacio, o realizar un análisis de las señales, deberemos recurrir a micrófonos de precisión y con una configuración binaural adecuada.

Una parte importante en el realismo sonoro son los retardos con que llegan las señales sonoras a los oídos. Estos retardos pueden llegar a ser de pocos milisegundos. Aunque son muy pequeños, son suficientes para dar una información de la procedencia del sonido. Los diferentes retardos aparecen cuando el sonido procedente de una o diversas fuentes llega a la persona. El cuerpo, los hombros, la cara, y especialmente el pabellón auditivo, producen interferencias con el sonido procedente de la(s) fuente(s) sonora(s), de manera que al tímpano no llega estrictamente la señal procedente de la fuente, sino una mezcla con las interferencias generadas por nuestro cuerpo más o menos acusadas que actúan a modo de filtrado en tiempo y frecuencia.

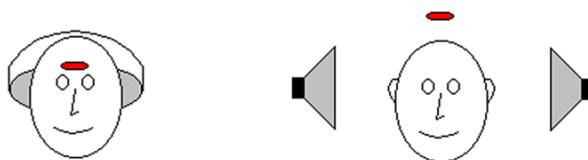
La audición de una señal binaural se puede hacer con auriculares o con altavoces. La audición con altavoces estéreo utiliza un altavoz por cada canal. El canal derecho envía información a la oreja derecha, y sucede lo mismo con el canal izquierdo. Pero una parte de la señal destinada únicamente a la oreja derecha llega también a la izquierda, y viceversa. Son los llamados *camino cruzados*, como muestra la figura 8.3. Estos caminos cruzados desvirtúan la reproducción estéreo y, especialmente, la binaural.

Para las técnicas binaurales, conociendo la posición de la cabeza es posible introducir un filtrado a ambos canales para eliminar estos caminos cruzados, aumentando el realismo del sonido 3D. La audición con auriculares tiene varias ventajas. Por un lado, aíslan acústicamente a la oreja del exterior. Por tanto, las condiciones acústicas de la sala no influyen y tampoco influye el ruido de fondo (si este es moderado). Por otro lado, no hay cruce de información entre canales, como ocurre con los altavoces, de manera que cada oído recibe su información. Se trata, pues, de un sistema que ofrece unas prestaciones superiores en cuanto a los efectos, pero, en general, una menor sensación de realismo ya que el sonido queda interno en la cabeza. Se dice que la reproducción de una señal binaural con auriculares da como resultado una imagen intracraneal. Esta imagen sonora, si bien puede representar la dirección o procedencia del sonido, no permite reproducir la distancia o sensación de proximidad a la fuente sonora.



**Figura 8.3.** Caminos cruzados ( $H_{LR}$  y  $H_{RL}$ ) en la audición estéreo con altavoces.

Si se desea localizar la procedencia de las fuentes sonoras utilizando un sistema reproductor con altavoces, resultará un poco más difícil que con auriculares. La reproducción binaural con altavoces del sonido es extra craneal, es decir, permite tener información de la profundidad o la distancia a la que se encuentra la fuente sonora. La figura 8.4 ilustra ambos fenómenos.



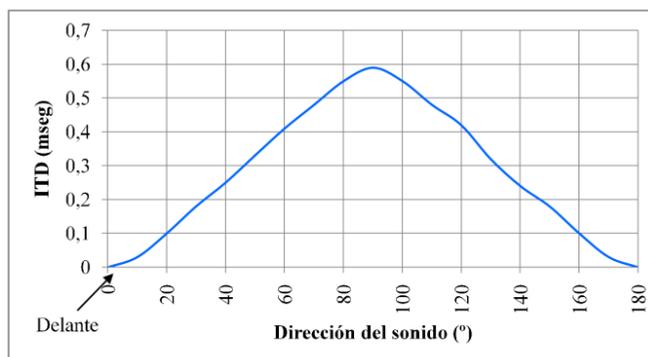
**Figura 8.4.** Percepción sonora intracraneal y extracraneal. La elipse roja muestra esquemáticamente la zona en la que ubicamos el sonido.

### 8.1.1. Mecanismo de la audición binaural

Una de las funciones fundamentales de la audición binaural es la detección direccional de la fuente de un sonido. Dado que las orejas están separadas unos 18 cm, se produce una diferencia de camino considerable entre el sonido que llega a una y a la otra, en función de la dirección desde donde procede el sonido. Esta diferencia se ve reflejada en diferencias de fase (o tiempo) e intensidad entre los sonidos detectados por cada oído. Se pueden definir estas diferencias como ITD e ILD. La audición binaural utiliza dos tipos de señales acústicas para identificar la procedencia del sonido en un espacio 3D. Son las llamadas *binaural cues* o *señales binaurales*.

#### 8.1.1.1. Diferencia temporal interaural

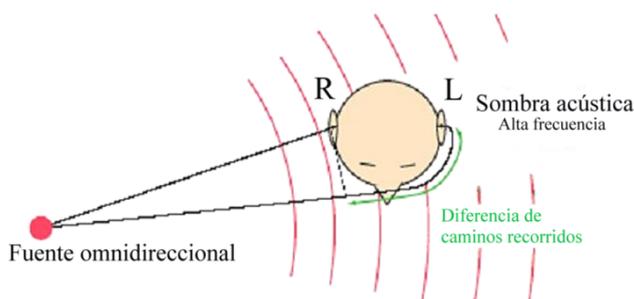
La diferencia temporal interaural (ITD) se basa en los retardos temporales entre los oídos, que produce una señal sonora procedente de cualquier punto del espacio. El diámetro de la cabeza es de unos 20 cm. Este mecanismo de ITD solo es válido para sonidos con una longitud de onda superior a la dimensión de la cabeza y, por tanto, solo sirve para frecuencias por debajo de los 1.500 Hz, aproximadamente. Para sonidos que llegan por un lado ( $90^\circ$ ), se produce un ITD máximo de 600  $\mu\text{s}$ .



**Figura 8.5.** Retardo temporal interaural para un oído.

### 8.1.1.2. Diferencia de nivel interaural

La diferencia de nivel interaural (ILD) se basa en los niveles que llegan a los oídos. Las señales sonoras llegan más o menos atenuadas, dependiendo de la sombra acústica que produce la cabeza. Por el tamaño medio de la cabeza humana, este indicador es eficiente para frecuencias superiores a los 1.500 Hz, aproximadamente. Para un sonido de procedencia frontal ( $0^\circ$ ), la ILD mínima es 0, mientras que es máximo para incidencia perpendicular a un oído. La figura 8.6 ilustra este concepto.



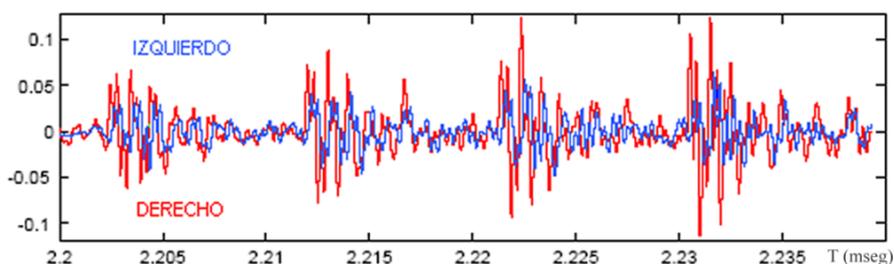
**Figura 8.6.** Los retardos ITD e ILD son los elementos que permiten la localización de fuentes en el espacio. El oído izquierdo (L) recibe un menor nivel sonoro (ILD), además de un retardo (ITD) respecto al oído derecho (R).

La zona de transición entre baja frecuencia y alta frecuencia en percepción binaural se extiende desde los 800 Hz hasta los 1.600 Hz, aproximadamente. Para esta banda de frecuencias, el proceso de localización es más dificultoso.

El retardo temporal interaural (ITD) es un elemento importante para la localización del sonido en humanos. Para un sujeto y una posición en el espacio concreto, el ITD depende de la frecuencia. El hecho de que la relación entre la posición y los ITD dependa en gran medida del espectro del sonido sugiere, a su vez, que los humanos hacen uso de esta relación para la localización de los sonidos.

La figura 8.7 muestra las señales acústicas recibidas por los dos oídos para una fuente situada a  $30^\circ$  a la derecha del paciente, en el plano horizontal. Nótese que la derecha (R) recibe un mayor nivel sonoro y que, además, la señal que recibe el oído izquierdo (L) está retrasada ligeramente respecto al derecho.

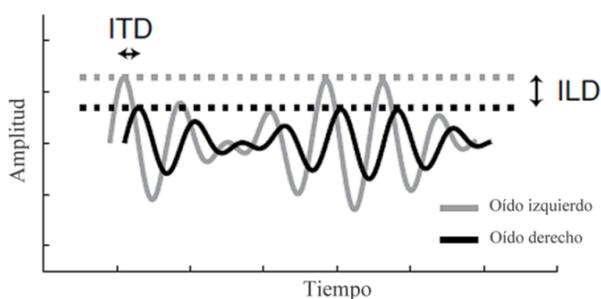
Aunque cuesta un poco apreciar el retardo temporal entre las señales mostradas en la figura 8.7, con señales de tipo impulsivo es posible ver con mayor detalle los retardos, al tener un punto de inicio de la señal bien definido.



**Figura 8.7.** Señales recibidas por ambos oídos ante el mismo estímulo procedente de una fuente puntual omnidireccional en campo libre.

Los sonidos a los que estamos sometidos diariamente son señales complejas en las que confluyen múltiples frecuencias y amplitudes que son cambiantes en el tiempo. En el caso de las ILD y las ITD, ambos parámetros trabajan conjuntamente para determinar la procedencia del sonido.

La figura 8.8 muestra de una manera gráfica e intuitiva de dónde saca la información el sentido auditivo para determinar la procedencia del sonido. Las señales de color negro y gris representan los sonidos que llegan al oído derecho e izquierdo, respectivamente. Para simplificar, la fuente sonora se encuentra en un plano horizontal interaural, ladeada hacia el lado izquierdo.

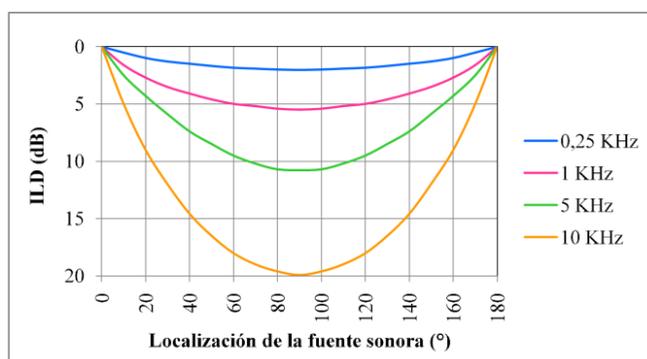


**Figura 8.8.** Señales recibidas por ambos oídos ante el mismo estímulo procedente de una fuente puntual omnidireccional en campo libre.

La ITD depende de la velocidad del sonido y la geometría de la cabeza y los oídos. Las fuentes de sonido situadas enfrente del oyente están equidistantes de los dos oídos, lo que da como resultado una ITD cercana a 0  $\mu$ s. Para las fuentes situadas lateralmente, la ITD máxima que se puede obtener en adultos es de 600  $\mu$ s, que para una velocidad del

sonido de 345 m/s corresponde a un incremento del camino recorrido por el sonido de unos 20 cm. Las ITD máximas medidas en oídos reales pueden exceder este valor porque el sonido se refracta alrededor de la cabeza, y también por la absorción de la piel, antes de llegar al oído más lejano.

Este último efecto depende de la frecuencia, por la acción absorbente y difusora de la cara, mientras que el tiempo de propagación en campo libre no. Por tanto, la magnitud de la ITD depende en cierta medida de la combinación de la frecuencia y la dirección del sonido, como muestra la figura 8.9. Estos retardos pueden ser detectados ya sea como retrasos de las características temporales a escala fina de la forma de onda en cada oído (escala fina ITD) o como retrasos entre las fluctuaciones de la amplitud del sonido en cada oído (envolvente ITD).

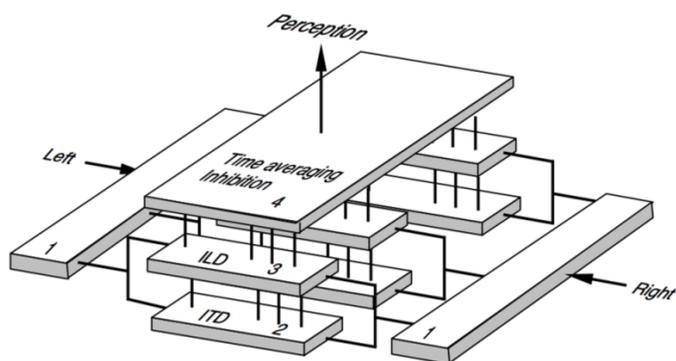


**Figura 8.9.** Diferencia de nivel interaural (ITD) para un oído.

Respecto a la percepción binaural, conviene distinguir dos situaciones:

- La percepción diótica: es la natural, en la que los sonidos procedentes de una o más fuentes llegan a ambos oídos.
- La percepción dicótica: en la que los sonidos que percibe cada oído pueden ser diferentes. Esto solo puede ocurrir reproduciendo el sonido mediante auriculares.

La figura 8.10 muestra una representación del sistema auditivo binaural humano propuesta por Jens Blauert. Los elementos de tipo 1 representan a los dos oídos, que reciben las señales del oído a derecha e izquierda y que transforman las señales acústicas en bandas de frecuencia con las terminaciones del nervio auditivo. Los elementos de tipo 2 simulan la correlación y la estimulación de los ITD entre los estímulos binaurales. Los elementos de tipo 3 representan el análisis de los ILD. El elemento de tipo 4 es un conjunto de procesos de alto nivel (percepción).



**Figura 8.10.** Modelo del sistema binaural humano (J. Blauert, 1983).

### 8.1.1.3. Batido binaural

Cuando dos tonos de frecuencias muy cercanas se superponen físicamente en una presentación diótica (ya sea procedente de una fuente que emite los dos tonos o de dos fuentes distintas, pero que llegan simultáneamente al oído), tiene lugar el fenómeno de batido. Este batido es el resultado de escuchar una frecuencia concreta modulada en amplitud con una muy inferior. El resultado es que se escucha una frecuencia con una pulsación.

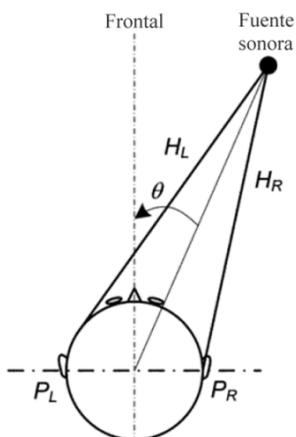
Si repetimos el experimento, pero se aplican por separado ambos tonos (presentación dicótica), el fenómeno de batido se percibe igual. Notemos que, en este caso, se trata de un batido virtual, puesto que no hay interacción física entre ambas señales.

### 8.1.2. Función HRTF

Esta función describe cómo recibe el oído humano los sonidos en campo libre en función de la posición de la fuente sonora en el espacio 3D. Esta respuesta en frecuencia es el resultado de la interacción del sonido con el pabellón auditivo, los hombros, el torso y la cara de una persona. La función HRTF es única para cada individuo y hay tantas funciones como puntos en el espacio 3D.

La figura 8.11 ilustra cómo se obtiene el par de funciones HRTF, una para cada oído ( $H_L$  y  $H_R$ ), para una fuente sonora situada en un punto del espacio y a una cierta distancia del observador.

Existen diversas bases de datos obtenidas generalmente en cámara anecoica (bien sea con personas o con maniqués) que, en función del número de puntos explorados del espacio 3D, y para una distancia a la fuente, obtienen una cierta cantidad de curvas o funciones HRTF.



**Figura 8.11.** Obtención de las dos funciones HRTF (una para cada oído,  $H_L$  y  $H_R$ ) para una sola fuente de sonido en el espacio.

La figura 8.12 muestra un ejemplo real para obtener la función HRTF, en este caso con una persona que lleva los micrófonos de precisión. La silla giratoria permite girar un paso de  $10^\circ$  en sentido horizontal. Los cilindros rojos son altavoces de respuesta plana montados en un cilindro relleno con material absorbente y fijados a una pletina rectangular de hierro haciendo una curva que da un radio de 2 m entre la cabeza y cada altavoz.



**Figura 8.12.** Obtención de las dos funciones HRTF (una para cada oído,  $H_L$  y  $H_R$ ) en una cámara anecoica con una precisión de  $10^\circ$ .

Hay un total de 18 altavoces, que nos da una precisión de  $10^\circ$  en el sentido vertical. El montaje se lleva a cabo en el interior de una cámara anecoica. La base sobre la cual va montada la silla giratoria queda enclavada sobre unos soportes fijados a la base de la sala sin tocar la red de cables por donde se anda, para evitar las oscilaciones (y los mareos) de la persona.

La persona lleva en la cabeza un pequeño soporte, extraído de un casco de protección, al que se ha añadido un puntero láser en la parte superior. Esto facilita que la persona pueda orientar la cabeza hacia el punto seleccionado, manteniendo siempre la misma orientación. Una vez sentada, la persona debe mirar a un punto concreto siempre en un plano horizontal. En las cuñas de la cámara anecoica hay unos marcadores (diana) espaciados  $10^\circ$  para que la persona pueda fijar la posición de la cabeza mirando a ese punto. La combinación de los movimientos de giro de la silla y la señal de cada uno de los 18 altavoces permite obtener un par de series de funciones HRTF 360. El dispositivo se puede montar y desmontar fácilmente. La figura 8.13 muestra los distintos componentes desmontados.

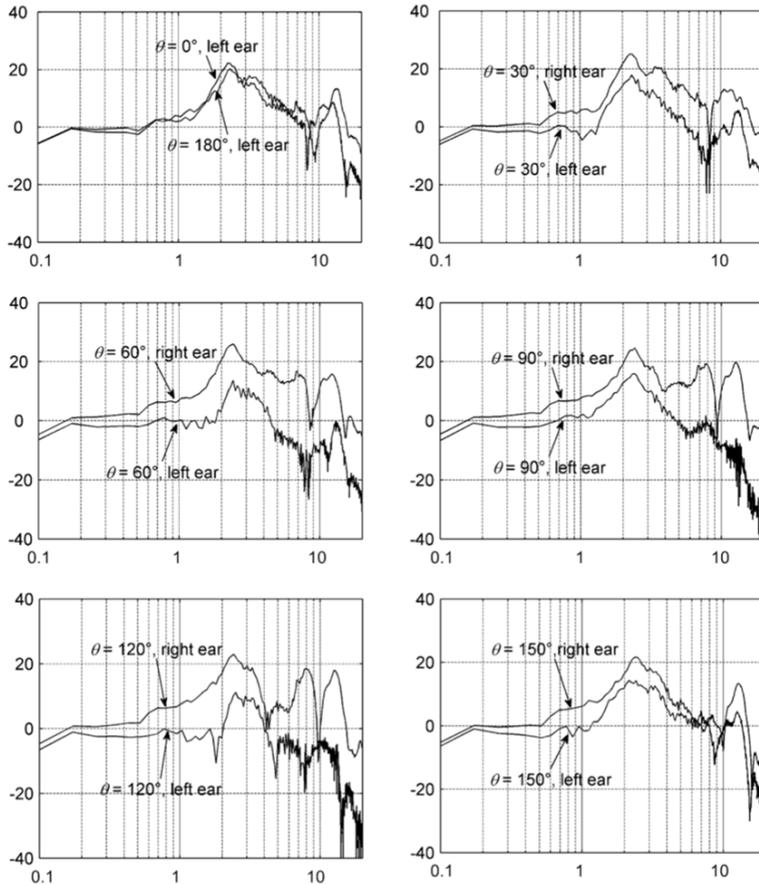


**Figura 8.13.** Sistema para la obtención de las HRTF, desmontado, junto a un maniquí experimental.

La posición y orientación de la cabeza y el torso respecto de la fuente sonora considerada es extremadamente importante. En las pruebas con maniquí, este mantiene su posición durante todo el tiempo que sea necesario. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen con personas, ya que la cabeza del maniquí suele tener una posición fija y no puede ladearse frontalmente. La figura 8.14 muestra unos ejemplos de funciones HRTF obtenidas cada  $30^\circ$ . Los buenos estudios utilizan un paso de  $2^\circ$  a  $5^\circ$  para obtener una mayor precisión. Estas funciones HRTF son solo para el plano horizontal.

Nótese como el oído izquierdo es el que recibe menos alta frecuencia porque se encuentra «tapado» por la cabeza cuando la persona gira hacia la izquierda o la fuente

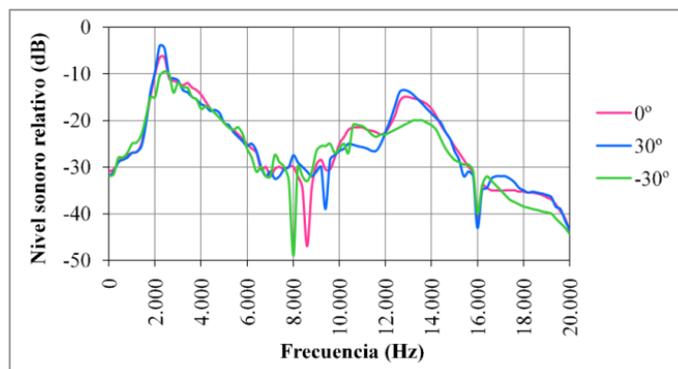
sonora hacia la derecha. El oído izquierdo muestra unas irregularidades puntuales a alta frecuencia superiores al oído derecho debido a los procesos de difracción-absorción de la cabeza. Resulta destacable ver cómo, comparando la posición frontal-posterior (primera gráfica superior izquierda), la señal posterior tiene un nivel de señal menor y es significativo el menor nivel en frecuencia elevada, por encima de 15 kHz de unos 10 dB. También se pueden obtener funciones HRTF para el plano vertical.



**Figura 8.14.** Funciones HRTF en el plano horizontal obtenidas en cámara anecoica. La persona realiza un giro sobre su eje vertical de 180°.

La figura 8.15 muestra tres funciones HRTF para incidencia del sonido perpendicular al sonido (0°) y para una elevación de 30° y de -30°. Las diferencias por debajo de los 6 kHz son poco significativas. Sin embargo, a partir de 6 kHz aparece un gran número de oscilaciones con efectos de cancelación puntuales y enfatizaciones de nivel sonoro.

Todas estas irregularidades son debidas al efecto del pabellón auditivo. La posición y los niveles presentados corresponden a un pabellón auditivo concreto y no se pueden extrapolar a cualquier oído.



**Figura 8.15.** Funciones HRTF para el plano vertical frontal, con incidencia sobre el oído derecho a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $-30^\circ$  de elevación.

### 8.1.3. Funciones HRTF dinámicas

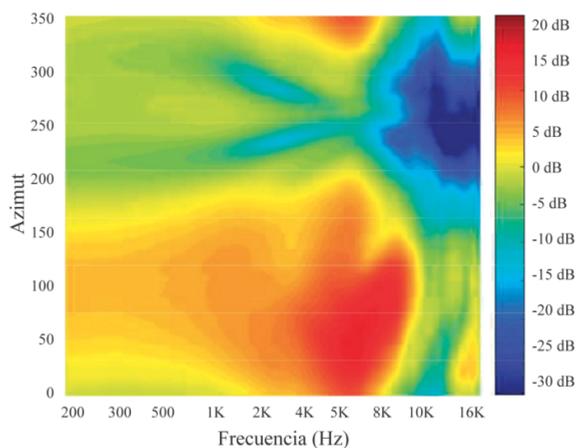
Las funciones HRTF consideran a la cabeza, el torso y los pabellones auditivos como elementos que siempre influyen en la percepción sonora. Se considera que la cabeza debe permanecer estática con el torso, que es lo que hace realmente un maniquí, y eso no siempre ocurre así. En la vida real, las personas giramos la cabeza para atender la llamada al teléfono que está a nuestro alcance sobre la mesa. No giramos el torso, esa es la diferencia entre la función HRTF y la HRTF dinámica. La figura 8.16 muestra un espectrograma de HRTF en un giro completo en el plano horizontal, obtenido por Dirac 3D Audio.

Aunque existen varias bases de datos públicas de HRTF (por ejemplo, <http://recherche.ircam.fr>), hasta el momento ninguna de ellas modela correctamente los movimientos dinámicos de la cabeza en relación con el torso. Las reflexiones en los hombros cobran especial relevancia cuando giramos la cabeza a izquierda o derecha. Para el oído situado al lado que giramos, las reflexiones aumentan al estar más cerca del hombro, mientras que ocurre lo contrario con el otro oído.

Esta dificultad de reproducir con precisión los movimientos dinámicos de la cabeza es una de las razones por las que las soluciones de sonido posicional existentes no suenan del todo realistas.

Otro problema que surge en la aplicación de las funciones HRTF es que el sonido procesado por estas funciones a menudo suena poco natural, debido a que ciertas partes

del espectro de audio se alteran. Estas inconsistencias pueden ser percibidas fácilmente por un oyente experimentado. La razón de este segundo problema no está clara. Algunos investigadores argumentan que las formas en que se miden las HRTF son defectuosas, lo que hace que las bases de datos HRTF existentes sean inadecuadas. Otros creen que la coloración del sonido es inevitable a menos que se individualicen las HRTF. Es probable que la realidad sea una combinación de ambos: incluso cuando se mide una HRTF individual, la coloración no desaparece por completo, aunque la precisión de la ubicación, obviamente, mejora mucho en comparación con una HRTF genérica.



**Figura 8.16.** Conjunto de funciones HRTF dinámicas del oído izquierdo.

#### 8.1.4. Localización de fuentes sonoras

En los sentidos del tacto y la visión, la ubicación del estímulo se codifica como mapas espaciales y se actualiza dinámicamente mediante copias de referencia de los movimientos intermedios. La integración sensoriomotora a través de estas representaciones espaciales dinámicas permite un rendimiento de localización visual preciso. Es decir, hay un mecanismo basado en la acción-reacción, que permite coger objetos y moverlos a otro lugar con precisión.

El sistema auditivo, en cambio, tiene una organización tonotópica a nivel de la cóclea y debe derivar la ubicación del estímulo y sus propiedades a partir de señales acústicas implícitas inducidas por la presión en los tímpanos. En este caso, no disponemos del mecanismo de acción-reacción y la información de la ubicación de la fuente sonora debe obtenerse de la propia señal acústica. Para la localización de la fuente en el plano

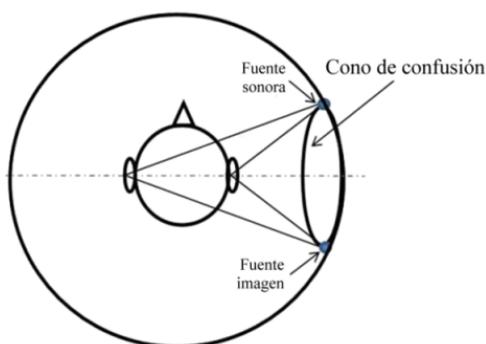
horizontal (acimut), el sistema aprovecha las señales de diferencia acústica binaural, al decodificar la posición a partir de las diferencias temporales y de intensidad en los oídos. Sin embargo, como todas las fuentes en el plano medio sagital y en el llamado «cono de confusión interaural» producen diferencias binaurales idénticas, estas señales no son suficientes para resolver de forma única la dirección bidimensional de un sonido. Para resolver el cono de confusión, el sistema auditivo también debe tener acceso al ángulo de elevación del sonido en el plano vertical.

La detección de elevación de un sonido se deduce de las interferencias relacionadas con el pabellón auditivo, que se describen mediante funciones de transferencia relacionadas con la cabeza, específicas de la elevación. El pabellón auditivo tiene una forma asimétrica, las reflexiones del pabellón tendrán diferentes longitudes según el ángulo de incidencia y la geometría particular de las cavidades y crestas del pabellón auditivo, lo que provocará una interferencia constructiva y destructiva a frecuencias específicas que difieren para cada dirección de elevación.

### 8.1.5. Cono de confusión

A pesar de su papel fundamental en la localización horizontal, las señales binaurales son solo marginalmente útiles para la localización vertical o la diferenciación entre incidencia sonora frontal-posterior. Esto se debe a la ambigüedad espacial causada por la simetría de la cabeza izquierda-derecha, comúnmente conocida como *cono de confusión*.

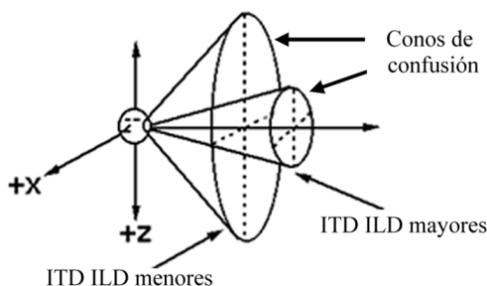
El cono de confusión es un cono imaginario que se extiende hacia fuera desde cada oído a lo largo del eje interaural y que representa las ubicaciones de las fuentes de sonido que producen las mismas diferencias interaurales. La figura 8.17 ilustra este concepto.



**Figura 8.17.** La posición de la fuente real puede confundirse con una posición errónea simétrica (eje interaural), simbolizada por la fuente imagen.

En general, las ubicaciones de las fuentes de sonido sobre la superficie del cono de confusión no se pueden identificar mediante señales binaurales (ITD, ILD). No obstante, la asimetría en la ubicación del oído en la cabeza y en la forma de los pabellones auditivos proporciona suficiente información para localizar su posición. Para diferenciar de manera certera entre posiciones específicas situadas en la superficie del cono de confusión, se necesitan otras pistas. Estas señales se denominan *señales monoaurales*, ya que no dependen de la presencia de dos oídos.

Las señales monoaurales se producen por la absorción acústica de la cabeza, efectos de reflexión en el pabellón auditivo y otras reflexiones en los hombros y el torso. Incluso la presencia o no de pelo en la cabeza afecta a las señales monoaurales. Todas estas absorciones y reflexiones producen cambios sobre el sonido que llega al oído. Por otro lado, los ITD e ILD no tienen los mismos valores para cada individuo. Distintas fisonomías proporcionan distintos valores. Esto conlleva que el cono de confusión puede variar su tamaño de un sujeto a otro, como sugiere la figura 8.18.



**Figura 8.18.** Distintos conos de confusión en función de las señales ITD e ILD.

### 8.1.5.1. Errores de localización simétricos

Los errores de localización simétricos suceden cuando la dirección de la ubicación de la fuente de sonido se encuentra en la dirección opuesta a la ubicación real de dicha fuente. Ocurren cuando la información binaural se correlaciona bien con dos ubicaciones espaciales opuestas (simétricas). El oyente apunta no a la fuente de sonido, sino a su imagen reflejada. Dichos errores pueden ser causados por reflejos de sonido de objetos que rodean al oyente o efectos de interferencia de otros sonidos presentes en el entorno circundante.

Los errores de simetría son más comunes para los sonidos de banda estrecha y su frecuencia disminuye con el aumento de la duración y la complejidad del sonido, ya que el oyente puede usar los movimientos de la cabeza, comprender la escena espacial y combinar señales en un intervalo de frecuencias de sonido. Sin embargo, pueden ocurrir

en cualquier entorno y para cualquier fuente de sonido en las circunstancias adecuadas. En general, los errores de simetría pueden ser de delante-detrás (detrás-delante), de izquierda-derecha (derecha-izquierda) o de arriba-abajo (abajo-arriba).

#### 8.1.5.1.1. *Error izquierda-derecha*

El disponer de dos oídos en el plano horizontal prácticamente evita que se produzcan errores de simetría de izquierda-derecha (derecha-izquierda) ante la presencia de fuertes señales de localización binaural en los seres humanos. Los errores en el plano horizontal solo se cometen debido a la incertidumbre de la ubicación de la fuente de sonido cuando esta está situada cerca del plano medio del oyente (justo enfrente). Los errores grandes de izquierda-derecha son muy poco frecuentes.

#### 8.1.5.1.2. *Error delante-detrás*

Los errores delante-detrás y detrás-delante son los errores de simetría más comunes y ocurren en todas las condiciones de escucha, pero son bastante raros para condiciones de campo libre y entornos relativamente absorbentes. Son más frecuentes para fuentes de sonido ubicadas cerca del plano medio, con sonidos de banda estrecha y sonidos limitados espectralmente a menos de 8 kHz.

En general, los errores delante-detrás superan los errores detrás-delante. La proporción depende de la visibilidad de la fuente sonora, del entorno acústico y del espectro del sonido. Estos errores disminuyen rápidamente al aumentar el contenido de energía de alta frecuencia. Las tasas de error se sitúan entre el 12% y el 20% para HRTF individuales y entre el 15% y el 35% para HRTF generales. Estos errores tienen su importancia en la vida real y pueden acarrear consecuencias importantes.

Un ejemplo que ilustra la importancia de este fenómeno se produjo en el año 2012. Dos oficiales de policía buscaban a un sospechoso en un área oscura en Baltimore. Uno de los agentes iba adelantado a su compañero persiguiendo al sospechoso y escuchó un disparo. Se giró y disparó hacia donde escuchó el disparo, hiriendo sin saberlo a su compañero. El oficial que disparó pensó que el disparo provenía de la parte posterior y devolvió el fuego en esa dirección, donde estaba su compañero, cuando realmente el disparo vino de la parte delantera. Esta situación ilustra la importancia que en determinadas situaciones puede provocar el llamado *cono de confusión*. En este ejemplo, la señal sonora era muy breve e inesperada, y esto no permitió que se pudiera determinar su procedencia mediante movimientos de la cabeza.

#### 8.1.5.1.3. *Error arriba-abajo*

Estos errores se producen al no posicionar correctamente la elevación de la fuente sonora. Se produce con frecuencia cuando la fuente sonora en el plano horizontal se en-

cuentra en el plano medio. En estos casos, es muy frecuente que el observador le atribuya una determinada elevación. Este error depende mucho del contenido de alta frecuencia que ayuda a minimizar este error.

### **8.1.6. Señales dinámicas**

Además de las señales binaurales y monoaurales, están las señales dinámicas, en las que la habilidad para localizar sonidos en el espacio 3D tanto en el plano horizontal como vertical depende también del movimiento de la cabeza, que causan cambios momentáneos (picos y valles) en el espectro de sonido recibido en cada oído. Estas señales dinámicas son las más importantes en la localización para sonidos de baja frecuencia (por debajo de los 2 kHz).

### **8.1.7. Localización de múltiples fuentes sonoras**

La mayoría de los estudios de localización auditiva se han centrado en la localización de una única fuente de sonido, ya sea de forma aislada o con un entorno acústico de fondo más o menos complejo. Sin embargo, las escenas auditivas diarias son mucho más complejas y pueden requerir que prestemos atención a más de una fuente de sonido a la vez. Por ejemplo, una persona sin visión que camina por la calle debe prestar atención a varias fuentes de sonido para poder caminar de manera segura y eficaz. Si bien las tareas de atención selectiva en las que el oyente se centra en una fuente de sonido específica están bien investigadas en la literatura psicoacústica, a menudo no se abordan las tareas de atención dividida.

La localización simultánea de dos o más fuentes de sonido ubicadas en diferentes posiciones en el espacio es una tarea muy exigente, especialmente si existe una superposición completa o incluso parcial entre los patrones espectrales y temporales de los sonidos emitidos. Cuando los sonidos producidos por dos o más fuentes de sonido tienen un inicio de sonido y una estructura armónica similares, pueden fusionarse en un evento como una única fuente de origen real o virtual. Este efecto de fusión es el resultado de las reglas del análisis de la escena auditiva (ASA) llevadas a cabo por el sistema auditivo central del oyente.

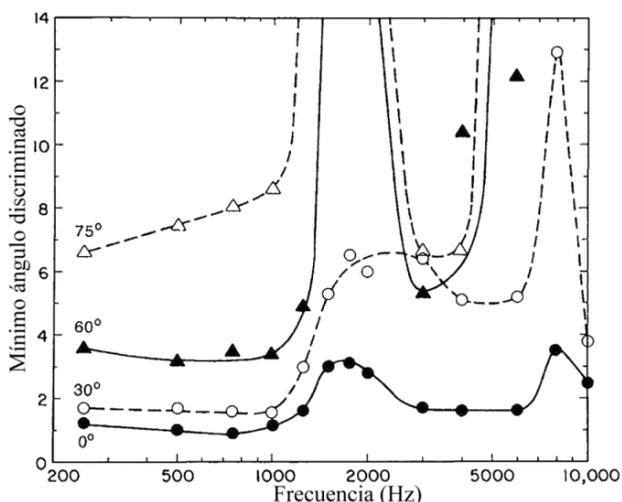
Un ejemplo común de tal efecto de fusión es el efecto de procedencia o efecto Haas. En general, si dos o más fuentes de sonido presentan sincrónicamente sonidos similares (por ejemplo, armónicamente relacionados) de diferentes ubicaciones en el espacio, su sincronización sirve como una señal de agrupación y solo se percibe la ubicación del sonido de frecuencia más baja si todos los sonidos llegan al mismo tiempo. Por tanto, para facilitar la localización de dos o más fuentes de sonido activas simultáneamente ubicadas

a la misma distancia del oyente, las fuentes deben estar bien separadas en el espacio y emitir sonidos que sean fáciles de distinguir por parte del oyente.

### 8.1.7.1. Localización auditiva horizontal

La técnica más utilizada para determinar la resolución auditiva horizontal es presentar dos tonos distintos ubicados en dos posiciones distintas para que el oyente pueda identificarlas y distinguir las. Los peores resultados se han obtenido usando señales de banda estrecha entre 1,5 kHz y 3 kHz, dando mejores resoluciones las frecuencias más elevadas y más bajas. Como en la vida real la mayoría de sonidos son complejos, muchos trabajos de investigación optan por señales de banda ancha para determinar la resolución auditiva.

La figura 8.19 muestra la precisión auditiva horizontal y su variación con la frecuencia. A la izquierda, se muestra el mínimo ángulo discriminado (MAD) para señales sinusoidales en función de la frecuencia. Cada curva muestra los resultados para diferentes ángulos de referencia.



**Figura 8.19.** Precisión en la localización auditiva horizontal para distintos ángulos de incidencia del sonido (Mills, 1972).

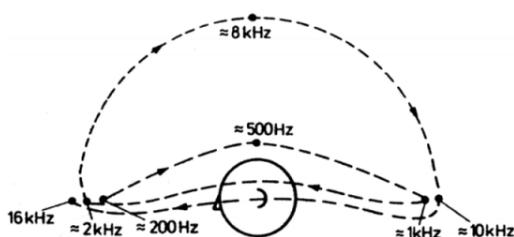
### 8.1.7.2. Localización auditiva vertical

Recientes estudios han demostrado que la localización de una fuente de sonido en el plano vertical se puede lograr con un solo oído y, por tanto, se asume que se basa en la información de señales espectrales monoaurales. Estas señales espectrales consisten en

valles y picos en el espectro de la señal percibida. La posición de estos valles y picos varían sistemáticamente con la elevación de las fuentes de sonido; de esta manera, se puede reconocer la elevación. Sin embargo, esto plantea varios problemas al sistema auditivo, como la extracción de señales relevantes y dependientes de la dirección, entre otras; es decir, se necesita un procesado binaural que «complete» al monoaural.

Curiosamente, en la fase de estimación de elevación, la información binaural de ambos oídos ya está disponible y parece razonable que el sistema auditivo aproveche esta información. De acuerdo con los hallazgos anteriores de la localización vertical, los resultados del modelado muestran que el sistema auditivo puede localizar fuentes de sonido tanto monoaural como binaural a partir de un mapa único, que se obtiene en la fase de aprendizaje desde la infancia de señales binaurales. La localización binaural es mucho más precisa que la localización monoaural.

Algunos estudios han revelado una mejor localización auditiva en la escucha binaural de los sonidos presentados desde el lado izquierdo en comparación con el derecho. Esta asimetría se atribuye a una capacidad superior para resolver las confusiones delanteras y traseras en el hemisferio cerebral izquierdo. Si se reproduce un ruido de banda estrecha en el plano medio, la procedencia del sonido parece que se modifica al cambiar la frecuencia, como muestra la figura 8.20. El grado de precisión en elevación se muestra en la figura 8.21.



**Figura 8.20.** Localización vertical. Aumentando la frecuencia inicial de 200 Hz ubicada enfrente, se varía la posición percibida de la fuente sonora.

### 8.1.8. Coherencia binaural

Nuestro cerebro recibe continuamente combinaciones complejas de sonidos procedentes de diferentes fuentes y que se relacionan con diferentes eventos en el mundo externo. Las diferencias de tiempo entre las señales sonoras en los dos oídos pueden usarse para localizar sonidos en el espacio, pero solo cuando estas señales tienen perfiles en el dominio del tiempo y frecuencias similares (alta coherencia binaural). La coherencia binaural se define como el valor máximo de la correlación cruzada de las señales

monoaurales (Gabriel, 1981). Los humanos tenemos una gran sensibilidad a pequeños cambios de la coherencia binaural. En la vida cotidiana, se nos presentan constantemente señales sonoras complejas que a menudo se originan en diferentes fuentes y que compiten entre sí en la transmisión de información. Con el fin de seleccionar información relevante para su procesamiento posterior y para guiar el comportamiento, el cerebro debe agrupar las señales relacionadas con el mismo evento y ubicación y debe segregar las señales que no están relacionadas. Un ejemplo clásico de esto es el efecto *cocktail party*. Cuando se escuchan muchas voces al mismo tiempo, en determinadas situaciones es posible seleccionar un orador y escuchar el contenido de un mensaje específico entre una cacofonía de voces con distintos mensajes. La coherencia binaural es elevada en entornos más anecoicos y disminuye rápidamente en entornos más reverberantes (Hartmann W. M., 2005).

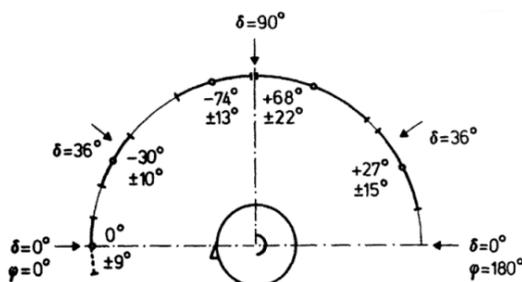


Figura 8.21. Precisión en la localización vertical de fuentes sonoras.

En una analogía con el procesamiento en el sistema visual se ha sugerido que se pueden formar «objetos de sonido» y que el procesamiento segregado para el reconocimiento y la localización del sonido tiene lugar en las regiones auditivas anterior y posterior a la circunvolución de Heschl del cerebro, respectivamente.

La selección de sonidos que nos resulten interesantes, entre otros sonidos ambientales, puede depender de varios indicadores. Por un lado, las características espectrales y temporales del evento sonoro suficientes para el reconocimiento de sonidos armónicos complejos o señales de voz. Por otro lado, lo importante para la selección auditiva (qué fuente sonora queremos escuchar) es la posición de las fuentes de sonido en el espacio respecto la cabeza. Normalmente, dos eventos auditivos separados se originarán en diferentes ubicaciones y, por tanto, la identificación de la ubicación de la fuente sonora se puede aprovechar para distinguir entre eventos auditivos en las cercanías.

En resumen, las dos señales binaurales principales que el cerebro puede utilizar para localizar los sonidos son las diferencias de tiempo (diferencia de tiempo interaural, ITD)

y las diferencias de presión sonora (diferencia de nivel interaural, ILD) entre los dos oídos. Sin embargo, para que el cerebro interprete con éxito estas señales, las entradas a los dos oídos deben tener características en frecuencia y en tiempo similares, es decir, alta coherencia de sonido binaural. Por tanto, solo los sonidos presentados con alta coherencia binaural darán como resultado la percepción de una única fuente que se puede localizar en el espacio y seleccionar como un objeto de sonido relevante. En el caso de que la coherencia binaural sea baja, no será posible seleccionar un sonido entre otros adyacentes. Para que la coherencia sea baja, las características de frecuencia y tiempo de las señales que llegan a ambos oídos, deben ser distintas.

### 8.1.9. Desenmascaramiento binaural

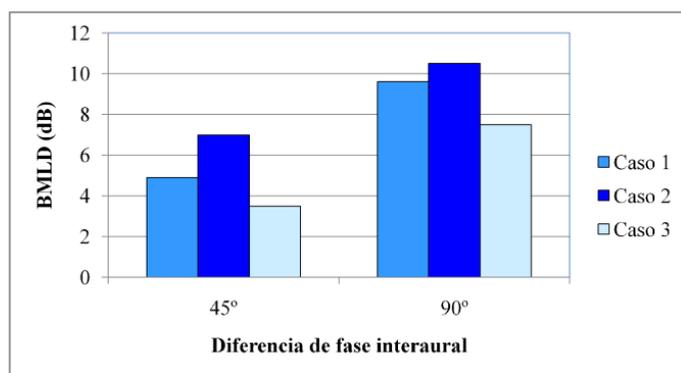
Generalmente, se considera que el estudio del desenmascaramiento binaural para tonos comenzó con el trabajo de Hirsh (Hirsh I.J., 1948), quien descubrió que la detección de un tono inmerso en un ruido presentado a través de auriculares podría mejorarse variando las diferencias de tiempo interaural del tono o del ruido. El desenmascaramiento binaural generalmente se mide en referencia al umbral de detección para la presentación monoaural tanto del tono como del ruido o a la presentación diótica de ambos. Para tonos en el intervalo de frecuencia entre 200 Hz y 500 Hz, el umbral de detección se puede reducir hasta en 15 dB simplemente invirtiendo la fase en el tono o en el ruido. Es decir, aumentamos la sensibilidad auditiva nada menos que en 15 dB.

La capacidad de seleccionar una fuente sonora entre otras de similares características y «centrar» la atención en esa fuente y no en otras es gracias al *binaural masking level difference* (BMLD). En la vida real, constantemente necesitamos detectar señales entre el ruido ambiente. Un caso bien conocido es el *cocktail party effect* (Arons B., 1992). Esta tarea es mucho más fácil de ejecutar con dos oídos. El BMLD mide la habilidad del oyente en usar las diferencias de los atributos binaurales para distinguir fuentes sonoras y mejorar la capacidad de discriminación respecto el ruido ambiente. Cuando escuchamos con dos oídos, la habilidad para detectar un sonido entre otros no depende únicamente de las características de frecuencia y temporales del objetivo y del ruido, como ocurre en percepción monoaural, sino de las diferencias binaurales del objetivo y del ruido.

Con el aumento de la frecuencia, el cambio en el umbral o la diferencia de nivel de enmascaramiento binaural (BMLD) se reduce, alcanzando un nivel fijo por encima de aproximadamente los 1.500 Hz. La importancia de la fase interaural para este resultado es sugerida por la dependencia de la frecuencia y se demuestra claramente por el hecho de que la BMLD crece de manera constante con el aumento de las diferencias de fase interaural entre el tono y el ruido.

La figura 8.22 muestra los resultados para la detección de un tono de 500 Hz presentado con dos fases distintas (45° y 90°) sobre un ruido blanco presentado dióticamente (Colburn & Durlach, 1965). El BMLD representa la diferencia entre los umbrales de detección cuando el tono se presenta dióticamente y cuando se presenta con una fase concreta.

Se han encontrado resultados similares para la inteligibilidad del habla inmersa en ruido (Licklider J.C.R., 1948). Concretamente, se descubrió que invertir la fase del habla o del ruido mejoraba los resultados en un 25 %.



**Figura 8.22.** Variación del BMLD con la fase, para tres sujetos, según Colburn y Durlach (1965).

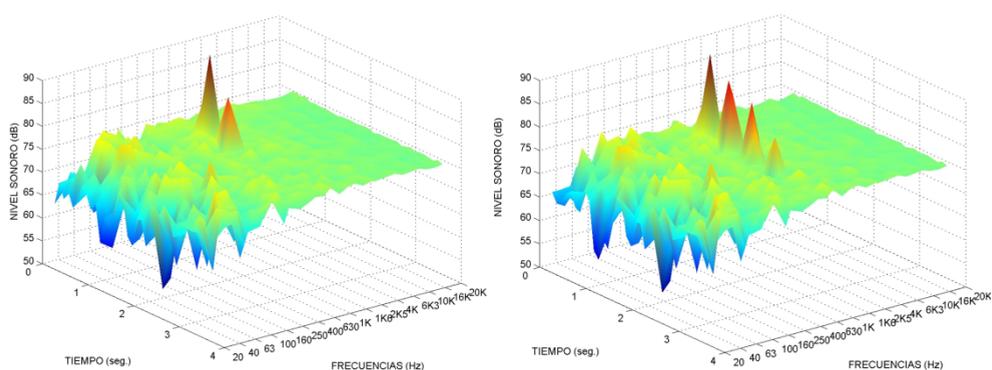
Utilizando métodos similares a los desarrollados para medir el BMLD, se demostró que invertir la fase de una señal de voz en un ruido de banda ancha dióptica permitía mantener una inteligibilidad fija del 50% de identificación correcta de palabras cuando el nivel de la señal de voz se había reducido en 6 dB (Levitt H., 1965). A este cambio en el umbral se le llamó *diferencia de nivel de inteligibilidad binaural* (BILD) y se demostró que estaba estrechamente relacionado con el BMLD para los tonos en las mismas regiones de frecuencia que el habla. De hecho, se sugirió que el desenmascaramiento que ocurre en bandas de frecuencia separadas parece contribuir de forma independiente a la inteligibilidad. Esto explica la ganancia reducida en inteligibilidad en relación con la ganancia en detección, ya que la inteligibilidad depende en gran medida de la información en regiones de frecuencia por encima de 1.000 Hz, para las cuales la liberación del enmascaramiento es pequeña o inexistente.

La BMLD y la BILD son generadas por las diferencias en la posición intracraneal de los dos estímulos. Cuando ambos estímulos son dióuticos, se escuchan en el centro de

la cabeza, mientras que, si uno es diótico y el otro se presenta con un retardo en un oído, se escuchan en posiciones distintas en el cerebro, lo cual sirve como señal de detección.

Sin embargo, aunque este argumento resulta exitoso para explicar muchos de los fenómenos del desenmascaramiento binaural, no puede predecir el hecho de que la mayor BMLD ocurre para un sonido objetivo invertido en fase en los dos oídos y un sonido enmascarador, presentado dióticamente, a pesar de que la diferencia de lateralización más clara se encuentra cuando un sonido se presenta monoauralmente y el otro dióticamente (Webster, 1951).

Con idénticos ruidos y tonos en los oídos, invirtiendo la fase del tono en uno de los oídos, se reduce el umbral de detección de ese tono de forma drástica. La diferencia en decibelios entre ambas situaciones es el llamado BMLD. El efecto más pronunciado se produce para la frecuencia de 500 Hz. La mejora de percepción se sitúa entre los 12 y 15 dB (Soderquist D.R., 1990) (Jiang d., 1997) (Gilbert H.J., 2015). La figura 8.23 muestra una representación de la capacidad de discriminación o detección de una señal enmascarada por ruido. Se muestra la respuesta del sentido auditivo en la detección de seis tonos de 500 Hz de nivel decreciente y de 0,1 s de duración cada uno, separados 0,5 s. Estos tonos se enmascaran con ruido rosa de amplitud constante. A la izquierda, se muestra la percepción monoaural aplicando la misma señal a ambos oídos, que permite distinguir o detectar dos de los seis tonos. A la derecha, la percepción binaural, donde se observa que se detectan cuatro de los seis tonos. En ambos casos, el ruido rosa enmascarador tiene el mismo nivel. Este ejemplo demuestra que con la audición binaural podemos captar sonidos que en monoaural no percibiríamos. Esto supone una ventaja, porque el oído humano, gracias al procesado binaural, hace más sensible al sentido auditivo, pero, por otro lado, también supone un inconveniente cuando se sufre contaminación acústica.



**Figura 8.23.** Representación visual de la capacidad de discriminación o detección de una señal enmascarada por ruido. Izquierda: audición monoaural. Derecha: audición binaural.

### 8.1.10. Selección de sonidos

¿Cómo hacemos para «seleccionar» a un orador entre muchas voces o «seguir» una melodía entre otros sonidos? El sistema auditivo tiene esta capacidad innata. Durante las últimas décadas, los científicos han identificado qué pistas usan los oyentes para el análisis acústico de la escena sonora (ASA, Auditory Scene Analysis). Se sugiere que este análisis precisa de un grado de atención por parte del sujeto. En este punto, se apuntan dos hipótesis para explicar este fenómeno:

- El análisis de la escena sonora se produce automáticamente, proporcionando una capacidad de atención con sonidos preestablecidos que son seleccionados.
- El grado de atención puede influir en el proceso necesario para la detección de los sonidos.

Hay dos aspectos que se deben tener en cuenta en la segregación de los sonidos. Primero, el fenómeno de *streaming* auditivo, que es la capacidad de organización de los sonidos en función del tiempo. Fenómeno usado por los compositores musicales y que es la esencia básica de nuestra capacidad para «seguir» una conversación inmersa entre otras. En segundo lugar, las diferencias de tonalidad entre oradores, que ayudan a distinguir una conversación de otra (Carlyon R.P., 2004).

La facilidad que tiene el cerebro para «detectar y seguir» señales con frecuencias concretas es bastante notoria (Holmes E., 2017). Esta capacidad se ve modelada o reforzada por la formación musical que tenga una persona en particular (Skoe E., Kraus N., , 2013). En todo caso, lo que resulta muy común entre las personas afectadas por un ruido no deseado mientras desean conciliar el sueño es la relativa facilidad que tiene el cerebro para detectar aquel sonido no deseado. Nótese que, incluso en períodos de somnolencia (es decir, cuando dormimos), nuestro cerebro sigue funcionando, no descansa nunca, lo que permite al ser humano estar en «alerta permanente» ante cualquier ruido no esperado. Además, se da la circunstancia de que la percepción de un determinado sonido o ruido tiene un gran componente subjetiva, que hace que la reacción o valoración sea distinta. Dicha subjetividad se justifica, esencialmente, por la experiencia previa de cada persona en el desarrollo del tronco encefálico auditivo basándose en el análisis que realiza este de la parte física del sonido, la frecuencia, la amplitud, la evolución temporal, y también del significado que producen dichos sonidos, y no por el deseo de llevar la contraria o exacerbar el problema, como, lamentablemente, sucede en ocasiones (Galbraith G.C., 2008).

#### 8.1.10.1. Separación de canales de voz

La separación de canales de voz, también llamado *cocktail party effect*, es el fenómeno por el cual los humanos podemos escoger una conversación entre muchas otras, aunque la que nos interese esté detrás de nosotros y nos llegue con un nivel sonoro

inferior a otras más cercanas. No deberemos girarnos; simplemente, no escuchamos lo que nos dicen a poca distancia, para centrarnos en la conversación que se produce a una distancia mayor, aun siendo las conversaciones en la misma lengua y con espectros de frecuencia muy similares, y mezcladas con otras conversaciones ininteligibles que actúan como ruido ambiente.

Este fenómeno se puede abordar de muchas formas distintas. Desde el punto de vista del oyente, la tarea es intuitiva y fácil, y realmente no requiere de ningún esfuerzo por parte de la persona. Desde una perspectiva psicológica o fisiológica, existe una amplia y compleja gama de pruebas que se han llevado a cabo para explicar el fenómeno, pero sin éxito. Existen muchas interacciones entre la señal sonora, el sistema auditivo y el sistema nervioso central. Acústicamente, el problema tiene una complejidad similar a separar una locución inmersa entre otras de un espectro en frecuencia que contiene señales de voz de varios locutores y, además, en condiciones ruidosas. A partir de un simple análisis espectral, no se pueden separar las distintas locuciones, como hacemos los humanos en determinadas circunstancias.

El fenómeno se puede analizar como dos problemas relacionados, pero diferentes. El principal problema de interés ha sido tradicionalmente el reconocimiento: saber cómo segregan los seres humanos los sonidos del habla y si es posible construir una máquina para llevar a cabo esta la función. ¿Qué elementos de la señal son importantes para separar una voz de otras conversaciones y del ruido de fondo? ¿Una máquina puede y debe usar las mismas señales para esta función, o puede usar otra evidencia acústica que los humanos no son eficientes en detectar?

Algunos autores sugieren que los humanos tenemos una facilidad para predecir secuencias de palabras que nos permiten entender un mensaje aunque algunas palabras no se hayan escuchado correctamente (Shannon C.E., 1963).

Hay una situación que se produce comúnmente cuando alguien nos formula una pregunta y no estábamos pendientes de recibir su mensaje, es la respuesta inmediata «No he entendido, puedes repetir?». Y justo al terminar la frase, «entendemos» la pregunta. Diversos trabajos apuntan que los humanos disponemos de una memoria temporal para situaciones en que no estamos atentos a la llegada de mensajes (Norman D.A., 1976). Esta propiedad actúa como si dispusiéramos de un grabador de sonido en funcionamiento permanentemente y que permite recuperar la información y entenderla (procesarla) unos instantes después de escuchar la pregunta.

En experimentos de seguimiento de una locución, se constatan aspectos sorprendentes de nuestro sentido auditivo. En un entorno con distintas locuciones en diferentes lenguas, si el idioma de las conversaciones rechazadas se cambia a otro idioma, las personas no notan el cambio; sin embargo, sus sonidos sí que llegan a nuestro sistema

auditivo. Por lo general, para las conversaciones rechazadas, se identifican los cambios de voz masculina a femenina y siempre se identifica un cambio a un tono puro. El habla invertida, reproducción al revés del audio (que tiene el mismo espectro que la señal original, pero sin contenido semántico), se identifica como «algo extraño» por algunos oyentes. En resumen, se reconocieron las amplias propiedades estadísticas de la señal en la locución rechazada, pero pasan desapercibidos detalles como el lenguaje, las palabras individuales y el contenido semántico.

El efecto *cocktail party* puede explicarse en parte por los BMLD. Cuando se escucha binauralmente, la señal deseada procedente de una dirección se enmascara menos eficazmente por el ruido que se origina en una dirección diferente (Blauer J., 1983). Esta técnica se utiliza a menudo en los auriculares de los pilotos de combate para ayudar a separar las señales de voz del alto nivel de ruido de la cabina y mejorar su inteligibilidad. Los canales R y L de los auriculares se conectan en contrafase, de modo que la señal presentada a un oído esté desfasada 180° respecto de la señal presentada al otro oído.

El espectro total de energía que llega al oído puede ser significativamente diferente en diferentes entornos. Para reconocer el timbre único de la voz de una persona conocida, tenemos que aislar las componentes de frecuencia que caracterizan esa voz respecto de otras que están presentes al mismo tiempo y lugar. Una elección incorrecta de las componentes de frecuencia cambiaría el timbre percibido de la voz. El hecho de que normalmente podamos reconocer el timbre implica que elegimos regularmente las componentes correctas en diferentes contextos. Al igual que ocurre con las constancias visuales, la constancia del timbre puede explicarse partiendo de un análisis complejo por parte del cerebro y no simplemente desde el punto de vista de un simple registro a la entrada de este.

El proceso de segregación de una voz, entre otras muchas, es un proceso complejo que tiene en cuenta una serie de factores:

- Proceso de agrupación. Hay dos clases de procesos de agrupación que pueden clasificarse en términos generales como integración simultánea e integración secuencial (también pueden denominarse agrupación espectral y agrupación temporal).
- Localización espacial. El análisis de escenas sonoras agrupa los sonidos que provienen de la misma ubicación y segrega los sonidos que se originan en diferentes ubicaciones.
- Continuidad espacial. Las voces (locutores) y los oyentes no se mueven demasiado lejos ni demasiado rápido.

- Diferencias de sonoridad. Es posible que las diferencias en el nivel sonoro no causen, por sí mismas, segregación; pero, al igual que con la ubicación espacial, tales señales pueden fortalecer la segregación del parlante.
- Continuidad. Los sonidos de la voz se mantienen unidos en un solo flujo de información. Esta continuidad puede estar en la frecuencia fundamental, la proximidad temporal, la forma espectral, intensidad u origen espacial. Cada lengua tiene su prosodia, de manera que es poco probable que una locución comience en el mismo instante en que termina la misma locución (normalmente hay pausas, entonación, expresión, etc.). Cuando los espectros de los datos sensoriales entrantes cambian repentinamente, llegamos a la conclusión de que ha comenzado o se ha detenido la locución.
- Efectos de canal visual. Tendemos a percibir las voces procedentes de ubicaciones de eventos visuales. Por ejemplo, cuando se mira la televisión, la voz del actor parece emanar de su boca sin importar dónde esté ubicado realmente el altavoz, que siempre estará cercano pero delante de nosotros. No obstante, si escuchamos la voz a través de un altavoz situado detrás de nosotros, esto causa extrañeza a nuestro sentido auditivo y no resistiremos mucho tiempo, hasta cambiar la posición del altavoz. Este efecto no debe confundirse con los efectos en el sonido 360, donde se escuchan sonidos y voces procedentes de otras partes. En estos casos, el actor no se ve, ya que permanecemos mirando la escena delante de nosotros. La visión tiene una gran influencia sobre la percepción sonora.
- Historia. Los procesos de análisis utilizan el historial para ajustar las estimaciones espaciales momentáneas. Usamos el hecho de que los sonidos y los objetos tienden a moverse lentamente en el espacio y el tiempo y, por tanto, generan una estructura coherente, formada por una serie de acontecimientos o eventos sonoros.
- Constante de tiempo de segregación. Se necesitan al menos cuatro segundos para crear y segregar una secuencia y cuatro segundos para que desaparezca una vez que se detiene la secuencia. Esta constante de tiempo prolongada probablemente evita que el sistema auditivo oscile en condiciones ambiguas. Sin embargo, un cambio repentino en las propiedades de una señal puede restablecer el mecanismo de transmisión más rápidamente de lo que puede silenciar.
- Armónicos y modulación de frecuencia. La tonalidad percibida de un tono complejo depende de una estimación de la frecuencia fundamental del conjunto de armónicos que componen el tono (incluso si falta la fundamental). Los mecanismos de análisis de la escena sonora favorecen la agrupación de armónicos de una misma fundamental. Por tanto, si se detectan diversas componentes fundamentales, se interpreta que hay varias voces o locuciones. Existen evidencias que sugieren que se utilizan dos

tipos de cambio de frecuencia (o modulación) para este propósito (Bregman A.S., 1990). Uno es la micro modulación, las pequeñas fluctuaciones del tono de las voces humanas, que ocurren incluso cuando los oradores piensan que están manteniendo un tono estable. El otro tipo de modulación de frecuencia es el tipo lento y se produce cuando variamos voluntariamente el tono de nuestra voz. Por ejemplo, elevamos el tono de una manera suave al final de una pregunta. La sincronización de la micro modulación o de la modulación lenta en diferentes partes del espectro parece hacer que esas partes sean tratadas como partes de un sonido.

Ponderación de la evidencia. Existe colaboración, así como competencia, entre las características utilizadas en una decisión de segregación. Si el número de factores que favorecen una agrupación particular de sonidos es grande, la agrupación será fuerte y todos los sonidos se escucharán como parte de la misma secuencia.

### **8.1.11. Grabación de sonidos. Técnicas estéreo, multicanal y binaural**

A la hora de grabar sonidos con el máximo realismo posible, existen básicamente tres sistemas que, *a priori*, podrían ser utilizables para obtener un realismo en la grabación del espacio sonoro.

#### **8.1.11.1. Técnica estéreo**

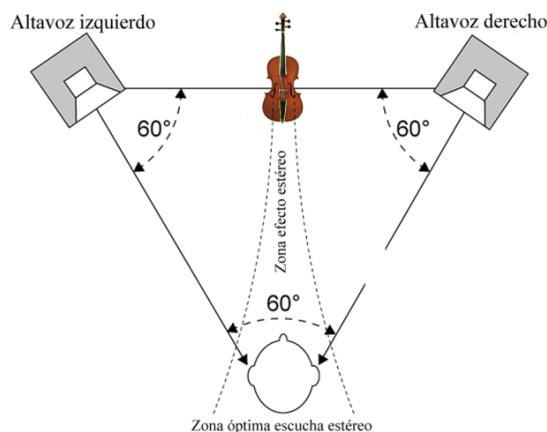
Es la más antigua y también la más usada. El audio estéreo consiste en grabaciones de sonido efectuadas a través de dos canales de audio distintos, usando dos micrófonos iguales montados en una configuración concreta. Como resultado, el audio que se transfiere a un lado del auricular será diferente al que se envía al otro. En este caso, el audio estéreo crea la ilusión de inmersión en la escena sonora, pero no crea un paisaje sonoro multidimensional o interactivo. Además, con la configuración estéreo, la escena sonora se mueve en un plano horizontal al de la posición de los micrófonos.

Por otro lado, la escena sonora siempre es frontal y sin llegar a los 90° a ambos lados (L-R). La figura 8.24 ilustra cómo se colocan los altavoces para una inmersión óptima del efecto estéreo. Nótese que en el ejemplo no se tiene en cuenta el *cross talk* entre canales.

La creación de una imagen estereofónica con dos micrófonos depende de las características direccionales de los micrófonos, su inclinación y la distancia entre ellos. El objetivo es crear una diferencia de nivel, una diferencia de tiempo o una combinación de ambas, para que el oyente tenga una sensación de inmersión sonora.

En un sistema estéreo hay dos canales, L y R (izquierdo y derecho), y las señales sonoras captadas por los dos micrófonos presentan variaciones de nivel y de retardo en-

tre ellos que permiten que, una vez reconstruidas por el cerebro, este pueda interpretar la procedencia del sonido. Cabe indicar que la imagen estéreo se produce siempre delante del individuo en un plano horizontal.



**Figura 8.24.** Disposición de los altavoces para una inmersión estéreo óptima.

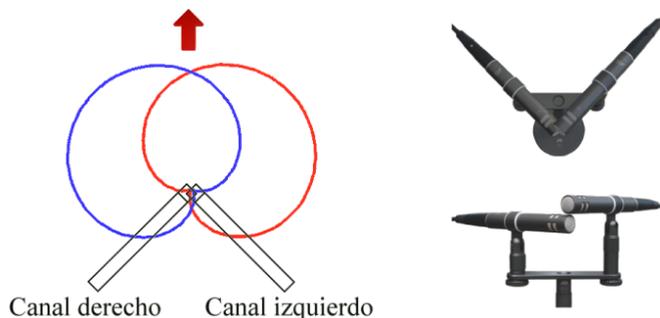
Hay distintas configuraciones de micrófonos estéreo; mostramos algunas de las que se pueden encontrar en algunos equipos de grabación digital.

#### 8.1.11.1.1. Configuración X-Y coincidente

Utiliza dos micrófonos de tipo cardiode. Uno de ellos está orientado al lado izquierdo (X) y el otro al lado derecho (Y) respecto del eje perpendicular a la fuente sonora. El ángulo que forman los micrófonos puede situarse entre los 90° y los 135°. Los micrófonos tienen las membranas lo más cerca posible y están en este caso a 90°, como muestra la figura 8.25. Sin embargo, no pueden tocarse entre sí para evitar ruidos mecánicos. La flecha indica la orientación del conjunto de micrófonos hacia la fuente de sonido.

Manteniendo un ángulo como el mostrado, de 90°, se consigue una buena presencia frontal a costa de perder un poco en la amplitud del estéreo. Esta configuración se usa frecuentemente con micrófonos con cápsulas pequeñas, permite acercar sus diafragmas al mismo punto y es adecuada para grabaciones cercanas a la fuente sonora. La configuración XY proporciona una imagen direccional estable, pero produce una impresión de espacio y reverberación ligeramente más débil en comparación con la configuración AB. Aunque el ángulo más habitual entre los micrófonos es de 90° (+45°, -45°), se pueden montar con otros ángulos que producen cambios en el ángulo

de grabación. Para obtener una imagen estéreo amplia, debe reducirse el ángulo entre los micrófonos, y viceversa.



**Figura 8.25.** Izquierda: configuración estéreo X-Y coincidente, con dos micrófonos cardioides. Derecha: imagen del montaje real con dos micrófonos cardioides.

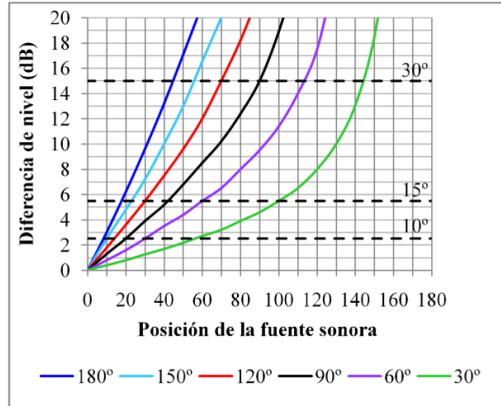
La figura 8.26 muestra los gráficos para determinar el ángulo óptimo entre los micrófonos cardioides para una configuración XY. Las líneas discontinuas representan tres ángulos de reproducción posibles; el más habitual y recomendable es el de  $30^\circ$  ( $30^\circ$  a ambos lados del punto de escucha, v. figura 8.24).

Para el ángulo de  $90^\circ$  entre micrófonos cardioides, el más habitual, se utiliza la curva de color negro. Con esta configuración, una fuente omnidireccional centrada frente al par de micrófonos con una configuración XY ofrece un ángulo aparente de  $30^\circ$  en la reproducción y la diferencia máxima de nivel entre micrófonos es de 15 dB. Si aumentamos el ángulo entre los micrófonos (por ejemplo, a  $120^\circ$ , gráfica azul), entonces tenemos una mayor diferencia de nivel sonoro entre canales y la imagen estéreo se estrecha, focalizamos el sonido. A la inversa, se amplía la imagen estéreo. El paso a monoaural puede padecer de problemas de cancelación. Se suele utilizar uno de los dos canales, aunque, en este caso, la señal entre canales puede ser distinta, por lo que la elección del canal puede alterar los resultados.

#### 8.1.11.1.2. Configuración MS

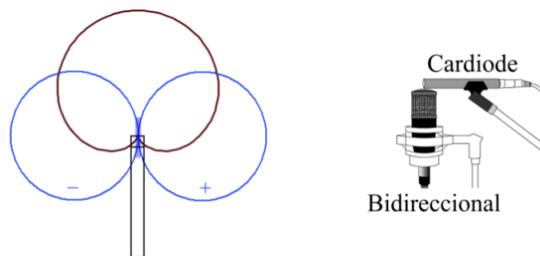
La configuración MS, llamada también Mid-Side, fue diseñada por Alan Blumlein en 1933 y ofrece unas prestaciones superiores a la configuración XY, aunque es un poco más compleja. La gran ventaja de este formato es que es compatible 100% con un registro monoaural, que se puede destinar a una medición con sonómetro, por ejemplo, sin necesidad de hacer conversiones, o escoger un canal del estéreo al azar. Utiliza dos

micrófonos, uno cardiode dirigido hacia la fuente sonora y el otro bidireccional, perpendicular a la fuente sonora, como muestra la figura 8.27.



**Figura 8.26.** Determinación del ángulo entre los micrófonos cardiodes para una configuración XY en función de la posición de la fuente sonora.

Esta técnica no se considera un par estéreo clásico, ya que usa micrófonos distintos. Las señales captadas precisan de un procesado previo para obtener la imagen estéreo. Esta configuración es perfecta para convertirla a mono, ya que la suma de señales del micrófono cardiode se cancelan mutuamente.



**Figura 8.27.** Izquierda: configuración estéreo MS con un micrófono cardiode y uno bidireccional. Derecha: montaje real.

La configuración MS ofrece dos ventajas respecto a la XY. Por un lado, es posible modificar el ancho de la escena estéreo, incluso después de efectuar la grabación. Por

otro lado, el paso a señal monoaural es directo y sin posibilidad de cancelaciones, como puede suceder en la XY. El concepto de Mid-Side tiene su origen en la configuración de los dos micrófonos. El micrófono cardiode (Mid) se coloca orientado hacia la fuente sonora y actúa como un canal central, mientras que el micrófono bidireccional (Side) añade la información sonora a ambos lados.

El inconveniente de esta configuración es que no se pueden obtener las señales L y R directamente. Los canales grabados son el MS, que no se corresponden con el L-R del estéreo. La señal S se introduce a dos canales de la mesa de mezclas y uno de ellos se invierte. Se panea un canal a L y el otro a R. Lo que se escucha en estos canales corresponde a la señal a ambos lados del punto de grabación. Mezclando la señal S con el canal M (central), se obtiene una señal estéreo, con la ventaja de que el ancho de la imagen estéreo se puede variar en función de la cantidad de canal S que se ponga en la mezcla. Esto se puede hacer después de la grabación, lo que ofrece muchas ventajas en la postproducción.

El paso a monoaural es directo y procede del canal M; cuando el otro canal, correspondiente al S, conmuta a «mono», se suman ambos canales, que se cancelan al tener polaridad invertida. Cabe indicar que el micrófono M suele ser cardiode, pero también se pueden utilizar micrófonos supe cardiodes o bidireccionales.

#### 8.1.11.1.3. Configuración AB

Se usan dos micrófonos idénticos que pueden ser omnidireccionales o cardiodes, separados una cierta distancia y orientados ambos hacia la fuente sonora. Permite obtener buenas escenas estéreo tanto en pequeños espacios cerrados como espacios abiertos y para medias distancias. Además, es uno de los sistemas más usados para grabaciones estéreo, por su simplicidad y facilidad de montaje. Los micrófonos se orientan hacia la fuente sonora, como se muestra en la figura 8.28. Esta configuración aprovecha la respuesta de baja frecuencia de los micrófonos de presión (omnidireccionales). La información direccional, sin embargo, es un poco menos distintiva en comparación con otras configuraciones. La configuración AB generalmente no es adecuada para monoaural, ya que la señal sumada puede sufrir un filtrado en peine. (Para mono, se usa solo uno de los canales).

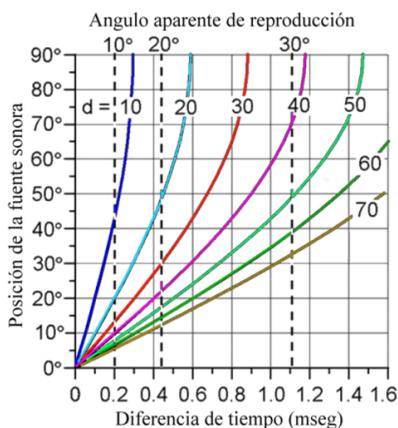
La distancia de separación entre los micrófonos, que puede oscilar entre los 30 y los 120 cm, aproximadamente, en teoría permite obtener imágenes estéreo sorprendentes. A mayor separación entre micrófonos, mayor sensación estéreo. Los micrófonos se orientan hacia la fuente sonora y con una separación entre ellos unas tres veces superior a la distancia a la fuente sonora. En caso de una fuente principal, esta debe quedar equidistante de ambos micrófonos. Es ventajoso utilizar dos micrófonos omnidireccionales para

esta técnica, aunque otros patrones direccionales podrían funcionar bien ante sonidos no deseados.



**Figura 8.28.** Izquierda: configuración estéreo AB con micrófonos omnidireccionales o alternativamente de tipo cardiode. Derecha: imagen de un montaje real.

Con técnicas estéreo se consigue una sensación de realismo que permite entender locuciones en ambientes muy ruidosos o reverberantes, como si estuviéramos inmersos en ese ambiente sonoro. Se pueden utilizar micrófonos de bajo coste, con una respuesta en frecuencia, figura de ruido y sensibilidad suficientes, para obtener buenos resultados. La separación entre micrófonos se determina mediante las gráficas de la figura 8.29.



**Figura 8.29.** Diagrama para determinar la distancia ( $d$ ) entre dos micrófonos omnidireccionales en una configuración AB.

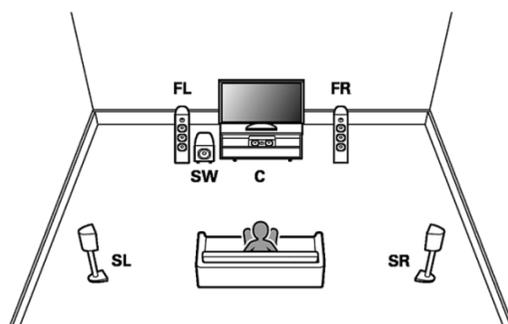
La escala del eje horizontal indica la diferencia de tiempo entre los micrófonos en milisegundos, y la escala del eje vertical indica la posición (ancho) en grados de la fuente de sonido. Muchos ingenieros de sonido usan la técnica llamada de 3 : 1, que significa que la distancia entre micrófonos (A y B) sea tres veces la distancia entre la fuente de

sonido y los micrófonos. El objetivo es reducir los efectos de fase cuando la fuente no se encuentra centrada entre ambos micrófonos. Esto es importante cuando las fuentes sonoras están cercanas a los micrófonos. Sin embargo, no podemos obtener un sonido envolvente 3D, que para algunas aplicaciones resulta beneficioso. Tampoco podemos obtener métricas del sonido, ya que generalmente los micrófonos utilizados no son de precisión.

### 8.1.11.2. Técnica multicanal. Sonido envolvente

Tanto el sonido estéreo como el sonido llamado envolvente son lo que los ingenieros de audio llaman *formatos basados en canales*: codifican el audio para una determinada configuración de altavoces. Las grabaciones estéreo ordinarias solo tienen información básica izquierda/derecha. No contienen información direccional detallada sobre el sonido grabado.

El sonido multicanal envolvente funciona un poco mejor. El formato de sonido envolvente más conocido a nivel doméstico es el sonido Dolby AC-3, que controla seis altavoces, también conocido como Dolby 5.1 y presentado en 1992 por Ray Dolby, fundador de la empresa, que permite al ingeniero de mezcla colocar el sonido en relación con cinco ubicaciones de referencia diferentes y agrega un canal de baja frecuencia que se reproduce a través de un *subwoofer* (figura 8.30).



**Figura 8.30.** Sistema de sonido multicanal Dolby 5.1.

El formato asume que los altavoces están colocados en la parte delantera izquierda, delantera central, delantera derecha, trasera izquierda y trasera derecha del oyente y se completa con un *subwoofer* colocado preferentemente en una esquina. Este esquema nos brinda más información que el estéreo simple, pero aún no es lo suficientemente bueno para convencer a nivel de realidad virtual. Los sonidos quedan en un plano horizontal, es decir, o hay información de elevación.

Un segundo enfoque más nuevo es el formato basado en objetos. En lugar de asumir un determinado sistema de reproducción, una grabación basada en objetos codifica el campo de sonido etiquetando las fuentes de sonido. Por ejemplo, un violonchelo, un piano y un vocalista se identifican con información sobre sus posiciones, intensidades y otros datos. Con Dolby Atmos se pueden usar hasta 128 objetos. Este método luego permite a los dispositivos de reproducción inteligentes interpretar las etiquetas de acuerdo con sus capacidades y emitir los sonidos de una manera consistente con las etiquetas. Dolby Atmos, introducido en 2012, y DTS: X, introducido en 2015, utilizan este enfoque.

Los formatos basados en objetos se crearon inicialmente para mejorar la experiencia del audiovisual en casa. La reproducción del audiovisual con Dolby Atmos, por ejemplo, incorpora altavoces de techo, obteniendo el Dolby 5.1.2. Como en una casa no es fácil poner altavoces en el techo, se recurre a añadir unos altavoces dirigidos hacia el techo en las posiciones FR y FL, como muestra con un sombreado azul la figura 8.31.



**Figura 8.31.** Sistema de sonido multicanal Dolby 5.1.2.

Un tercer enfoque es el formato basado en escenas. Ambisonics adopta este enfoque, desarrollado en la década de 1970 por Peter Fellgett, Michael Gerzon y otros investigadores patrocinados por la National Research Development Corp., en el Reino Unido.

La codificación basada en escenas crea una representación espacial del campo de sonido grabado como se ve desde una posición específica. En su configuración básica, una grabación Ambisonics utiliza cuatro cápsulas de micrófono dispuestas en un patrón tetraédrico (las grabaciones de mayor resolución usan más cápsulas microfónicas). La codificación basada en escenas establece cómo ordenar el sonido que rodea al oyente en una serie de contenedores direccionales preestablecidos, en comparación con los formatos basados en objetos, que no predeterminan los contenedores, sino que permiten que cada objeto de sonido se coloque en cualquier lugar arbitrario.

La tecnología Ambisonics actual tiene algunas debilidades, particularmente para su uso en grabaciones del mundo real. La resolución espacial es baja y los micrófonos de grabación tienden a difuminar un poco la direccionalidad. Pero es una forma conveniente de grabar el sonido. Debido a que es un formato de código abierto que está fácilmente disponible, tiene mucha difusión y aceptación por los generadores de contenido. Entre los más conocidos están Facebook, que lo incorpora en los videos 360° de la compañía, y Google, que lo usa en su tecnología de audio VR.

Hasta la fecha, dos importantes empresas comerciales de audio han lanzado formatos de codificación que admiten audio 3D que incorporan algunas de estas técnicas. El sistema de audio MPEG-H 3D, desarrollado por el Instituto Fraunhofer en Erlangen Alemania, admite audio basado en objetos, canales y escenas, así como combinaciones de ellos. El Dolby AC-4 admite audio basado en canales y en objetos. Si bien todos estos esquemas han tenido cierto éxito, ninguno se ha elevado por encima del resto y no está claro si uno de ellos eventualmente dominará en un futuro. Estos enfoques, hasta la fecha, se han centrado en la codificación de audio para su reproducción a través de altavoces. La reproducción de los sistemas multicanal con auriculares presenta mayores desafíos y no puede llegarse al mismo nivel.

### 8.1.11.3. Técnica binaural con HATS

Esta técnica se basa en el uso de dos micrófonos de precisión y un maniquí que actúa como soporte de estos. Los micrófonos van insertados en el pabellón auditivo del maniquí, siendo este en algún caso una aproximación a un pabellón auditivo humano estándar. Con esta disposición, teóricamente se pueden obtener grabaciones con realismo 3D, es decir, podremos escuchar la grabación e identificar la procedencia de cualquier sonido desde cualquier lugar del espacio 3D. Además, al disponer de micrófonos de precisión, se pueden obtener métricas para valorar los niveles sonoros. La figura 8.32 muestra dos maniquíes (HATS) comerciales y una cabeza artificial que llevan incorporados dos micrófonos de precisión.



**Figura 8.32.** Sistemas comerciales de HATS y cabeza artificial, para la grabación y el análisis profesional de sonido binaural.

El acrónimo HATS proviene de las palabras *head and torso system*. Para hacer una grabación binaural, el maniquí o la cabeza se colocan sobre un soporte, para que la altura de los oídos se corresponda con un valor real. Antes de iniciar el registro, se orienta al maniquí de la forma que se considere más adecuada. Los sistemas HATS permiten recoger la influencia de los hombros y el torso, que les permiten obtener resultados mucho más precisos en la reproducción binaural.

Para los amantes del bricolaje, un maniquí «binaural» se puede hacer a partir de un maniquí comercial (torso y cabeza). Los micrófonos tendrán que ser de precisión y debidamente emparejados para que tengan la misma sensibilidad (que se corrige electrónicamente en el preamplificador de entrada del equipo de medida) y respuesta en frecuencia. El maniquí suele ser de fibra, que no tiene la misma absorción que la piel humana. No obstante, hay una solución muy simple y económica: revestir toda la superficie del maniquí con unas capas de látex. La figura 8.33 muestra el proceso.



**Figura 8.33.** Aplicación de distintas capas de látex a un maniquí textil comercial para hacer un maniquí HATS experimental.

El látex se aplica con pincel y se dan varias capas, dejando que seque bien entre ellas, hasta tener un grosor cercano a 1 mm. Previamente, el maniquí debe estar preparado para alojar a los micrófonos de precisión. El ajuste se hace mediante masilla. En este caso, el micrófono quedó enrasado con el pabellón auditivo, dado que el maniquí no dispone de conducto auditivo. Se escogió un modelo donde la oreja tenía una forma aceptable. La figura 8.34 muestra un detalle del maniquí experimental.

El uso del maniquí no resultó adecuado para usarlo en situaciones concretas. Como ejemplo, la figura 8.35 muestra el maniquí «sentado» en la posición del conductor, para la grabación del *door slam* («cierres de puerta»), con el objetivo de valorar la calidad acústica percibida tanto en el interior del vehículo como en el exterior.



**Figura 8.34.** Detalle de la cabeza y del maniquí experimental (1997).

Como se puede apreciar, al ser el maniquí rígido, y a pesar de poner el asiento muy «recto», no permite inclinar la cabeza hacia delante, como lo hace un humano. El resultado es que la posición no se corresponde exactamente con la real. Este problema también lo tienen los maniqués comerciales profesionales.



**Figura 8.35.** Detalle de la posición del maniquí sentado en el interior de un vehículo para la medida de la calidad del sonido de cierre de puerta.

#### **8.1.11.4. Técnica binaural con headset**

Para solucionar el problema expuesto en el apartado anterior, y como alternativa o variante al maniquí, existe la posibilidad de que una persona haga la función de maniquí, llevando los dos micrófonos insertados en sus oídos. En estos casos, tanto el pabellón auditivo como la fisionomía de la persona influyen en los resultados obtenidos. Esto tam-

bién ocurre con un HATS, ya que el pabellón auditivo siempre es el mismo. Este equipo es mucho menos invasivo que el maniquí y en determinadas circunstancias es preferible. Por ejemplo, para grabar sonidos en las calles y plazas de una ciudad, es beneficioso pasar desapercibido, para no condicionar ni alterar el comportamiento ciudadano. La experiencia demuestra que siempre hay gente que se acerca excesivamente al micrófono con curiosidad y hace preguntas, obviamente en voz alta, dando al traste con la medida/grabación.

Si la medición debe ser larga y en un punto estático, el maniquí ofrece la ventaja de que no se mueve. La figura 8.36 muestra dos equipos comerciales profesionales para la grabación de señales binaurales llamados *headset*. En ambos casos, se usan micrófonos de precisión y una persona hace de «maniquí». Esta versión ofrece notables ventajas respecto al maniquí. Aunque ciertamente la forma del pabellón auditivo, las medidas de la cabeza, el torso y los hombros influyen en la función HRTF obtenida, llevar estos auriculares permite posicionar la cabeza exactamente como se haría en la realidad.

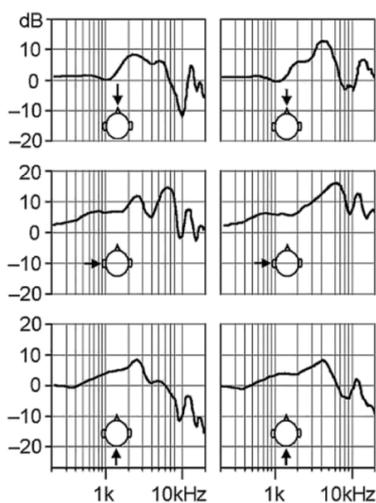


**Figura 8.36.** Sistemas comerciales para la grabación binaural basados en dos micrófonos de precisión que lleva el usuario y que ofrecen mayor realismo.

El binaural *headset* permite adoptar posiciones de observación más naturales, a veces mirando ligeramente al suelo, o simplemente ladeando la cabeza a un lado y otro, que es lo que generalmente todos los participantes hacen durante un *soundwalk* o paseo sonoro. Nótese que el maniquí tiene una posición estática, rígida, mientras que las personas nos movemos, aunque sea un poquito. Los *binaural headsets* permiten, por ejemplo, hacer un recorrido por una calle o plaza y grabar en binaural, cosa que el maniquí estático no puede hacer.

A parte de la evidente diferencia entre ambos sistemas binaurales, hay un detalle importante que destacar. En el maniquí, los micrófonos se encuentran al inicio del conducto auditivo, quedando más escondidos, mientras que en el *binaural headset* los micrófonos están ligeramente fuera del conducto auditivo. En todo caso, ninguno de los dos sistemas recoge la influencia del conducto auditivo, que deberá ser tomada en cuenta a efectos de reproducir o analizar el sonido con naturalidad.

La figura 8.37 muestra cómo cambia la función HRTF, para distintas procedencias del sonido, con y sin conducto auditivo. Con el conducto abierto, aparecen las resonancias acústicas propias de un tubo.



**Figura 8.37.** Ejemplos de función HRTF en humanos. Izquierda: para conducto auditivo abierto. Derecha: para conducto auditivo cerrado. Se aprecia cómo se modifican algunos picos y valles.

En el mercado se pueden encontrar distintos dispositivos supuestamente para la grabación binaural, como los micrófonos binaurales en una sola cápsula, o pares de orejas (sin cabeza), que son relativamente económicos. No deben confundirse estos equipos de uso doméstico como alternativa a los HATS, las cabezas artificiales o los micrófonos de precisión binaurales.

Si combinamos la codificación basada en objetos y escenas con el procesamiento HRTF, teóricamente deberíamos poder producir audio 3D, con auriculares para realidad virtual montados en la cabeza, y ajustarlos de forma interactiva a medida que el oyente se mueve a través de mundos virtuales.

Pero, hasta la fecha, aplicar esta tecnología conlleva muchas dificultades. El aspecto clave de la reproducción HRTF es la confusión entre el anverso y el reverso. Aquí está el problema. La ubicación de los oídos de un humano hace que un sonido producido en el punto muerto delante/detrás (o arriba/abajo) del oyente presente el mismo tiempo de llegada e intensidad en cada oído (cono de confusión). Entonces, para determinar la posición del sonido, el cerebro aprovecha los pequeños cambios causados por las reflexiones sobre el pabellón auditivo, la cabeza y el torso. Los finos detalles de esta anatomía, las sombras y los reflejos que crean, amplifican preferentemente ciertas frecuencias en relación con otras, según la dirección de donde provenga el sonido. Estos detalles varían de una persona a otra, principalmente debido a la distancia entre nuestros oídos, pero

también debido a otras diferencias anatómicas especialmente en el pabellón y conducto auditivos.

### **8.1.12. Aplicaciones de la grabación binaural**

La grabación binaural se puede usar para un análisis objetivo de las señales y también para un análisis subjetivo, escuchando los sonidos y rellenando una encuesta sobre las sensaciones percibidas. Las aplicaciones más habituales se detallan seguidamente.

#### **8.1.12.1. Simulación en salas. Auralización**

El concepto de *auralización* fue introducido en 1990 por Mendel Kleiner, de la Universidad Tecnológica de Chalmers (Suecia). Permite valorar la calidad acústica de una sala mediante parámetros específicos y con la reproducción de un sonido grabado previamente en entorno anecoico y reproducido virtualmente en la sala que se está diseñando. Es decir, podemos escuchar cómo sonará un sonido o música en una posición situada en el interior de esa sala. Es una herramienta extraordinariamente potente, ya que permite valorar de forma subjetiva cómo será el sonido antes de construir o modificar la sala.

Los sistemas de auralización se desarrollan por lo general para ayudar en el diseño arquitectónico y para el ajuste de salas de conciertos, auditorios, teatros, etc. Se pueden modificar virtualmente los acabados de las paredes y escuchar cómo cambia el sonido. También permiten valorar distintos sistemas de refuerzo de sonido o seleccionar el sistema de refuerzo de sonido más adecuado para las necesidades de la sala.

#### **8.1.12.2. Sonido envolvente para auriculares**

El uso de sistemas de reproducción de sonido multicanal está aumentando. La compatibilidad con la reproducción con auriculares no es trivial. Mediante la síntesis binaural, los seis canales de un Dolby 5.1 se pueden transformar en una señal de dos canales para la reproducción de auriculares. La idea no es nada nueva y también se ha propuesto para la reproducción con auriculares de grabaciones estéreo tradicionales, donde existe el mismo problema de compatibilidad. En principio, hay dos enfoques: por un lado, el que prioriza simular el entorno óptimo y, por otro, el que prioriza simular la configuración y el entorno multicanal del usuario final, cualesquiera que sean las propiedades y cualidades de este.

#### **8.1.12.3. Sistemas de mezcla binaural**

Una forma común de hacer grabaciones en los estudios es grabar cada instrumento o voz por separado con su propio canal y luego mezclarlos en la perspectiva estéreo de-

seada, usando diferencias de tiempo e intensidad. Con una consola de mezcla binaural, estas grabaciones multicanal se transfieren a señales binaurales en la fase de mezcla. Por tanto, la mesa de mezclas binaural puede considerarse como una cabeza artificial. Si se utiliza un cabezal artificial para la grabación, la configuración física en el estudio de grabación define la posición de la fuente de sonido para la situación de reproducción. Estas grabaciones, así como las grabaciones ordinarias procesadas por medio de la consola de mezcla binaural, se pueden mezclar para formar señales binaurales. Sin embargo, el éxito del uso de grabaciones binaurales en audio ha sido limitado, posiblemente debido a la falta de métodos estandarizados para los procedimientos de procesamiento.

#### **8.1.12.4. *Proyectores acústicos 3D***

La idea de los proyectores acústicos 3D es crear «iconos audibles» dispuestos espacialmente para situaciones en las que el canal de información visual no esté disponible o esté completamente ocupado. Estos iconos se pueden usar para transferir información que no tienen un origen acústico.

Una aplicación está en el pilotaje de un avión de combate. En combate, la toma de decisiones por parte del piloto debe ser muy rápida. Su sentido visual debe procesar mucha información, no solo de lo que acontece en el exterior, sino del panel de control con múltiples indicadores del estado de vuelo, radar, infrarrojos, presencia de otras aeronaves, etc. En el caso de ser atacado, los proyectores acústicos 3D pueden indicar al piloto a través del casco la posición exacta en que un misil va a impactar con él mediante una señal sonora específica ubicada en un espacio virtual 3D.

La información acústica complementa a la visual y es mucho más rápida de procesar que leer una pantalla o ver una indicación, ya que al oír la señal virtual 3D en tiempo real puede llevar a cabo la maniobra de evasión de forma inmediata con mayor facilidad y precisión.

Hay múltiples aplicaciones para las personas sin visión. El uso de cámaras para detectar objetos y sensores radar, infrarrojos y ultrasónicos para medir distancias, temperatura, etc., permite crear entornos sonoros virtuales 3D para que la persona pueda escuchar distintos iconos sonoros que le ayuden a situarse en el entorno cercano.

#### **8.1.12.5. *Realidad virtual***

En aplicaciones de realidad virtual (VR), el objetivo final es la simulación virtual de un entorno inexistente, donde el sujeto se sienta integrado y viva una experiencia con inmersión total. La distinción entre los sistemas de VR y otros sistemas de simulación de sonido a veces puede ser difícil de ver. Los sistemas de VR tienen como objetivo proporcionar estímulos a los sentidos de una persona, que son perceptiblemente plausi-

bles hasta tal punto que estas personas desarrollan una experiencia persistente de estar realmente en otro lugar: es el llamado sentido de «presencia». El mundo perceptivo que están experimentando de esta manera solo puede existir como un modelo virtual que la máquina usa para controlar varios tipos de actuadores, que estimulan todos los sentidos del ser humano y que, además del auditivo, son el visual, táctil, olfativo y gustativo.

Hay muchas e interesantes aplicaciones en realidad virtual o aumentada que van a desarrollar nuevas técnicas. El sonido virtual tiene un gran futuro en el *gaming*, donde la sensación de realismo visual y sensorial actualmente ya tiene un elevado nivel de realismo. También en todas aquellas aplicaciones que recientemente se han desarrollado, como las videoconferencias. Las reuniones telemáticas virtuales pueden subir un escalón en cercanía usando los proyectores acústicos 360 para conseguir un nivel de realismo máximo.

# Capítulo 9.

## Medición del sonido

### 9.1. Caracterización y descripción del sonido

El sonido es esencial para la vida humana. Poder escuchar a otros seres y comunicarse con ellos es, quizá, la función más extendida y usada. Pero el sonido tiene otras utilidades aparte de la comunicación, como, por ejemplo, escuchar música, y también situarnos, orientarnos y reconocer el entorno sonoro donde nos encontramos en todo momento. Los sonidos nos acompañan a lo largo de nuestra vida, desde antes de nacer, cuando escuchamos sonidos a través del vientre de la madre, hasta que fallecemos. Con nuestra actividad generamos sonidos y estos, curiosamente, no nos molestan. Sin embargo, nuestros semejantes también generan sonidos y estos a veces sí que nos molestan y entonces los llamamos *ruidos*.

Físicamente, no hay diferencia entre un sonido y un ruido. Tanto el sonido como el ruido son variaciones de presión que se producen por la vibración de uno o más objetos. Subjetivamente, el ruido es un sonido no deseado o que puede resultar molesto o perjudicial para las personas. La palabra *sonido* tiene un aspecto positivo para las personas, aunque no siempre puede ser deseado o aceptado. Sonidos agradables de día son molestos escuchados de noche (como la música, las voces, etc.). Por eso no se puede definir el ruido únicamente basándose en parámetros físicos para distinguirlo del sonido. El grado de afectación del ruido sobre las personas no es solo una cuestión de nivel de presión acústica, sino de la valoración del grado de dificultad para realizar una tarea o una necesidad (por ejemplo, dormir) o simplemente porque molesta. Es decir, no existe ningún indicador que permita diferenciar entre sonido y ruido, dado que la diferencia es puramente subjetiva.

Una fuente sonora se suele asociar con una señal que lleva información, como puede ser la música o la voz. No obstante, el ruido de un motor o el de una máquina también nos transmite información, aunque de manera distinta. El sonido transmite información

*per se*, sea esta deseada o no. En cambio, el ruido por sí mismo no transmite ninguna información. Cuando relacionamos el ruido con una acción o con una fuente sonora concreta, es cuando se obtiene esa información.

El ruido de una sierra o una radial puede resultar muy molesto, pero este ruido tiene una utilidad: le sirve al usuario de la máquina para saber que está operando correctamente y que el disco no se va a romper. Escuchar la mecánica de un vehículo también es útil para detectar o prever averías, aunque eso requiere una formación en mecánica para «entender» los ruidos y asociarlos a las distintas partes de la máquina.

En cambio, el ruido de una lavadora no sería necesario escucharlo, salvo quizá los primeros instantes para comprobar que el agua entra y que la bomba de agua funciona correctamente. En general, se asocia el término *sonido* a algo positivo, ya que aporta información, dando por sentado erróneamente que el ruido no aporta información. Notemos que unas voces o la música aportan siempre información y, en cambio, se consideran ruidos si estos no son deseados.

Los mismos sonidos o ruidos producen sobre las personas reacciones distintas. Las valoraciones de las personas son siempre subjetivas, ya que no disponemos de ningún medidor. Estamos, pues, ante una decisión totalmente arbitraria en la que, para un mismo sonido o ruido, distintas personas pueden dar distintas opiniones.

Las mediciones de nivel sonoro se hacen basándose en medir las características físicas del sonido. El parámetro más utilizado es el de la presión acústica. Para la medida de la presión acústica se utilizan unos equipos de medida llamados genéricamente *sonómetros*. Se trata de unos equipos electrónicos que pueden medir el nivel de presión acústica en un punto. Estos equipos miden tres características del sonido: la amplitud, las frecuencias y su estructura temporal. A partir de estos datos, se pueden calcular multitud de parámetros para cuantificar el sonido.

Los principales requisitos para un análisis de un sonido son, por un lado, la estructura temporal. Esto se puede obtener registrando la forma de onda como una señal digital. Cualquier fluctuación de presión dentro de un período de muestreo de la señal digital, estará representada por un solo valor. Una frecuencia de muestreo más alta proporcionará un mayor detalle de la señal sonora, mejorando la estimación de los valores máximos y las características temporales de las señales transitorias (es decir, el tiempo de subida y bajada).

Por otro lado, la resolución de frecuencia permitirá detectar todas las señales de distinta frecuencia presentes en un sonido complejo. La investigación sobre filtros auditivos y ancho de banda rectangular equivalente sugiere que la selectividad de frecuencia del sistema auditivo es una función de la frecuencia de excitación. Por encima de 1 kHz, los anchos de banda del filtro auditivo son aproximadamente del 10 al 17% de la frecuencia central. Esto corresponde a filtros de bandas de 1/6 de octava.

Para frecuencias más bajas, el ancho de banda del filtro auditivo aumenta a más de 1/3 de octava por debajo de 200 Hz. Sin embargo, en el intervalo de frecuencia superior de las audiencias (por encima de 1 kHz) se sugiere que un análisis de banda de octava fraccional variable (como la escala Bark utilizada en los cálculos de sonoridad) podría ser adecuado para la evaluación de las características de frecuencia de una exposición sonora.

### **9.1.1. Evento auditivo**

Cuando se desean comparar o valorar distintos sonidos, se puede hacer de forma subjetiva (mediante apreciaciones) o de forma objetiva (utilizando las métricas que haya disponibles en ese momento). Como se ha mostrado en el capítulo 7, el pabellón auditivo permite que las personas puedan percibir distintas sonoridades para un mismo sonido con distintos ángulos de incidencia. Los parámetros psicoacústicos permiten distinguir estos aspectos mucho mejor que el nivel equivalente  $L_{eq}$  expresado en dBA. Algunos aspectos del sonido relacionados con la estridencia o la fluctuación producen sensaciones negativas y mayor molestia, a pesar de reducir el nivel sonoro. Un sonido de banda estrecha se percibe con menor sonoridad que un sonido de banda ancha con el mismo nivel en dBA.

#### **9.1.1.1. Valoración objetiva del sonido**

Las tres métricas que podemos aplicar para saber cómo es el sonido se basan en tres cualidades físicas: la amplitud de la señal (medida en dB), la frecuencia (medida en hercios) y la estructura temporal (medida en segundos). Desde el desarrollo de los medidores de nivel sonoro promedidores/integradores y las redes de ponderación de frecuencia en la década de 1950, la medición de las características físicas del sonido no ha cambiado mucho. Se han producido avances en la forma en cómo se utilizan los valores medidos (promedios día-noche, valores límite y de acción, etc.), pero, en esencia, el principio de medición sigue siendo el mismo. Existen ventajas de tener una metodología bien establecida a nivel mundial, tales como: uniformidad de medidas, amplia variedad de equipos de medida, conocimiento basado en la experiencia, etc. El problema surge de la ambigüedad de la medida, donde una amplia variedad de características sonoras que tienen diferentes efectos en la audición conducen al mismo resultado. Hoy en día, los avances tecnológicos permiten mediciones precisas de las características de tiempo y frecuencia del sonido, que pueden almacenarse y analizarse para dar una mejor descripción del grado de exposición (Ordoñez, Aranda de Toro, & Hammershoi, 2010) (Barti R. , 2007).

#### **9.1.1.2. Límite inferior de medida del sonómetro**

Para obtener un valor del nivel sonoro, se emplean equipos electrónicos de precisión, llamados *sonómetros*. Estos equipos, por muy perfectos que sean, tienen una serie de limitaciones, es decir, no pueden medir cualquier nivel sonoro. Existe siempre un um-

bral de medida, por debajo del cual el equipo no detecta ningún sonido. Este umbral se llama *límite inferior de medida*. El nivel mínimo de señal que puede medir un sonómetro lo determina el conjunto micrófono-preamplificador, de manera que el equipo no mide correctamente cuando los valores sonoros se acercan al límite.

#### 9.1.1.2.1. Limitaciones de los micrófonos de precisión

El diámetro del micrófono define tanto la banda de frecuencias a la que responde como, sobre todo, su sensibilidad y nivel sonoro máximo que puede soportar. Los diámetros de los micrófonos están estandarizados en unidades submúltiplos de la pulgada (25,4 mm). Los diámetros comerciales van de 1" a 1/8". El más usado, con diferencia, es el de 1/2". El intervalo de frecuencias por la parte superior queda limitado por el diámetro del micrófono. A mayor diámetro, menor intervalo de frecuencias. Por ejemplo el micrófono de 1" tiene un límite de frecuencia ligeramente superior a los 10 kHz, mientras que el de 1/8" tiene un límite de 140 kHz. El micrófono de 1/2" cubre los 20 kHz.

En cuanto a la capacidad de medida de presión sonora, los de 1" van desde niveles inferiores a 0 dB hasta los 140 dB, y los de 1/8" van de los 40 dB a los 172 dB, aproximadamente. Los de 1/2" abarcan de los 17 dB a los 140 dB, aproximadamente. Si analizamos todas las prestaciones, el micrófono de 1/2" abarca todo el margen de audio y los niveles sonoros «más habituales» desde poco menos de 20 dB hasta los 140 dB. Por este motivo, se adoptó este diámetro como el más adecuado para medir el nivel sonoro al que puede estar sometido el humano en distintas condiciones y lugares. Para aplicaciones y mediciones en determinadas situaciones, es posible utilizar otros micrófonos más adecuados. Sin embargo, todas las mediciones «legislativas» se hacen con micrófonos de 1/2". Usar otro tipo de micrófono haría que las mediciones, aun siendo técnicamente correctas, no cumplieran con lo establecido en la legislación.

El nivel mínimo de presión acústica que puede detectar un micrófono está ligado a su diámetro. El umbral mínimo medible, independientemente del diámetro, viene condicionado por el ruido térmico. Este ruido térmico aparece por las oscilaciones de las partículas de aire con la temperatura ambiente, que establece la mínima presión acústica detectable por cualquier micrófono. Esto comporta una tensión estimada en bornes del micrófono de 5  $\mu\text{V}$  y, por tanto, cualquier micrófono no puede dar ninguna señal por debajo de este valor. En función de la sensibilidad del micrófono, se establece la presión mínima medible (límite inferior de medida). Los micrófonos de condensador de precisión tienen sensibilidades que van de 1 mV/Pa a 1.100 mV/Pa. Para un micrófono con una sensibilidad de 50 mV/Pa son 16 dB, mientras que para un micrófono con una sensibilidad de 12,5 mV/Pa son 26 dB. Al comprar un micrófono, hay que fijarse mucho en el valor de la sensibilidad. Si se pretende medir niveles sonoros en ambiente interior y de noche (dormitorio), una sensibilidad por debajo de 50 mV/Pa debe descartarse.

#### 9.1.1.2.2. Preamplificador de micrófono

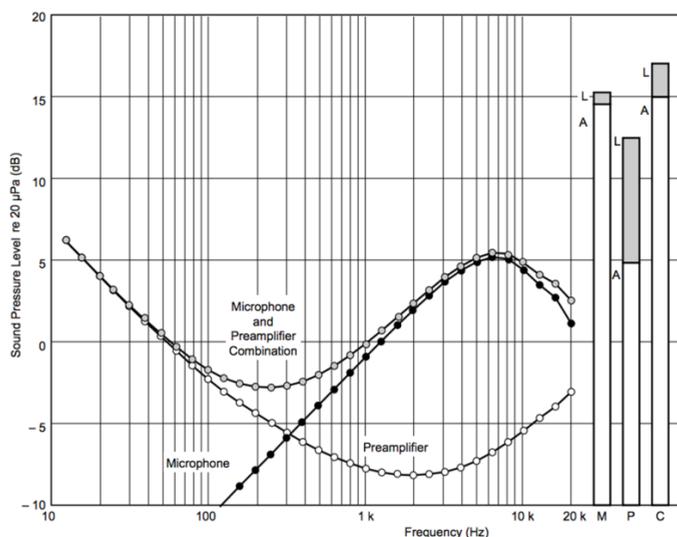
Es un dispositivo que siempre va unido mecánicamente a la cápsula microfónica. Es el llamado *conjunto micrófono-preamplificador*. En función del micrófono seleccionado, el fabricante recomienda un preamplificador determinado. Saltarse estas recomendaciones reducirá siempre las prestaciones técnicas del sistema de medida, empeorando la calidad de los resultados.

El preamplificador tiene una impedancia de entrada muy elevada, normalmente entre 1 y 100 G $\Omega$  (por lo general, 20 G $\Omega$ ), y una capacidad de entrada entre 0,1 y 1 pF, que permite transferir la máxima energía posible. Al conectar el micrófono de condensador al preamplificador, se forma una célula RC que limita la baja frecuencia. Esta capacidad depende principalmente del diámetro de la cápsula, y también de su sensibilidad y si la cápsula es prepolarizada o no. Esta capacidad de la cápsula varía entre 3 pF para el micrófono de 1/8" y 70 pF para el micrófono de 1". Por ejemplo, para un micrófono de 1/2" la capacidad equivalente es de 17 pF, lo que da una frecuencia de corte inferior de 2,94 Hz. La alta frecuencia se limita a 200 kHz, para evitar problemas con las interferencias electromagnéticas que puedan existir.

Generalmente, el preamplificador se alimenta a través de un conector LEMO con el equipo de medida. Las tensiones más habituales son de 28 V o de 120 V. Esta tensión limita el margen dinámico del conjunto micrófono-preamplificador. Por ejemplo, para una cápsula de 12,5 mV/Pa de sensibilidad, con 28 V, puede medir hasta los 150 dB, mientras que, si usa la tensión de 120 V, puede medir hasta 164 dB.

Como en todo equipo electrónico analógico, hay un ruido eléctrico permanente, que se ha establecido en 3  $\mu$ V y que se añade al ruido térmico de la cápsula microfónica. Sin embargo, el contenido espectral de ambos ruidos eléctricos es distinto, como se muestra en la figura 9.1.

La figura 9.1 muestra con trazo continuo y círculos negros la contribución al ruido de fondo generado por el conjunto micrófono-preamplificador en tercios de octava, y que es la suma energética de ambos componentes por separado (trazos con círculos blancos). A la derecha, se muestra el nivel global para el micrófono (M), preamplificador (P) y el conjunto (C). Para el conjunto mostrado, se obtiene un límite inferior de medida de 15 dBA o 17 dB. Con el uso del equipo y los sucesivos cambios de temperatura (estrés térmico) a que se somete este dispositivo en las mediciones *in situ*, se acelera el envejecimiento de los componentes electrónicos, lo que puede incrementar el nivel de ruido generado, aumentando el límite inferior de medida con el paso del tiempo. Es recomendable evitar someter este dispositivo a cambios bruscos de temperatura y a temperaturas extremas, por ejemplo, dejando el equipo en el interior de un vehículo a pleno sol.



**Figura 9.1.** Ruido eléctrico de la cápsula microfónica y del preamplificador de 1/2" y 50 mV/Pa de sensibilidad (B&K.).

Los fabricantes establecen mayoritariamente un margen de 6 dB entre el nivel medido y el límite inferior de medida. Eso quiere decir que si, por ejemplo, nuestro equipo tiene un límite inferior de medida de 20 dB, las medidas por debajo de los 26 dB deben descartarse por ofrecer una incertidumbre elevada. No obstante, algún fabricante establece que son 3 dB los que considera suficientes entre el nivel de inmisión y el ruido de fondo. Esta afirmación puede ser cierta cuando se hacen mediciones en entornos controlados (laboratorio), con fuente sonora controlada y con determinados sonidos. En mediciones *in situ* nunca se debe admitir un margen de 3 dB entre el límite inferior de medida y el nivel de inmisión medido.

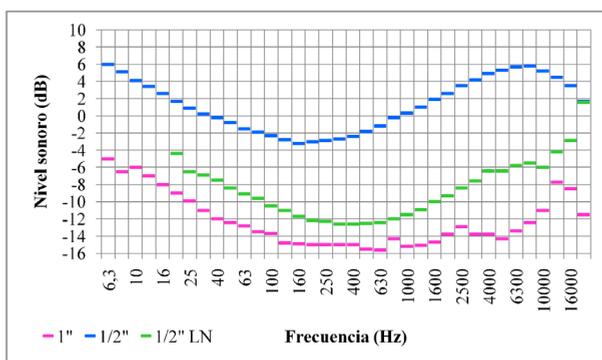
Los micrófonos de 1/2" de tipo o clase 1 usados en las mediciones *in situ* suelen tener su límite inferior de medida sobre los 16-17 dBA, aproximadamente. Con este umbral inferior, y sumando 6 dB, el nivel mínimo medible sería de 22-23 dBA. Las lecturas por debajo de estos valores no son precisas y deberían descartarse, aunque los procedimientos de las ordenanzas municipales no lo indican. Por encima de los 22-23 dBA, y hasta los 26-27 dBA, los resultados pueden en algunas ocasiones ser discutibles.

### 9.1.1.2.3. Micrófonos de precisión de bajo ruido

Para mejorar la precisión y exactitud de los resultados en entornos con muy bajo nivel sonoro (valores inferiores a 30 dBA), es aconsejable utilizar micrófonos más sensi-

bles. Existen dos posibilidades: usar micrófonos de 1" o usar los micrófonos de 1/2" LN (*low noise*).

El micrófono de 1" es más sensible que el de 1/2" estándar y proporciona mayor nivel de señal gracias a su mayor diámetro. Esto permite reducir en nivel de ruido de fondo generado por el conjunto micrófono-preamplificador. El micrófono de 1/2" LN tiene una sensibilidad 1.100 mV/Pa que le permite tener un ruido de fondo más bajo que un micrófono de 1/2" convencional. La figura 9.2 compara el nivel de ruido generado por un micrófono de 1/2" convencional (azul), el micrófono de 1/2" LN (verde) y el nivel de ruido generado por un micrófono de 1" (rojo).



**Figura 9.2.** Nivel de ruido generado por el conjunto micrófono-preamplificador de 1" de 1/2" y 1/2" LN (B&K).

Se puede apreciar que el nivel de ruido del micrófono de 1" es inferior, y eso le permite medir niveles sonoros inferiores a los que puede medir un micrófono de 1/2". Los niveles de ruido correspondiente a las gráficas de la figura 9.2 se resumen en la tabla 9.1.

**Tabla 9.1.** Nivel de ruido generado por el conjunto micrófono-preamplificador para cápsulas de 1", 1/2" y 1/2" LN (B&K.)

| Nivel de ruido    | dBA  | dB   |
|-------------------|------|------|
| Micrófono 1"      | -1,5 | 4,6  |
| Micrófono 1/2"    | 15,2 | 17,9 |
| Micrófono 1/2" LN | 4,2  | 8,0  |

En la práctica, significa que con un micrófono de 1" podemos medir sonidos desde 5,5 dBA, con el de 1/2" podemos medir sonidos desde 21,2 dBA y con el de 1/2" LN podemos medir sonidos desde 10,2 dBA. Como vemos, hay una diferencia muy notable.

Si el micrófono de 1" ofrece la posibilidad de medir niveles muy bajos de sonido, ¿por qué no se utiliza en las mediciones «legislativas»? Se esgriman tres razones, a saber:

- El micrófono de 1" no llega a cubrir la banda de audio en su totalidad, quedándose en el tercio de octava de 10 kHz.
- El micrófono de 1" no puede medir niveles por encima de los 105 dBA, ya que el preamplificador satura la señal.
- El mayor tamaño del conjunto micrófono-preamplificador distorsiona el campo acústico con su presencia, eso quiere decir que altera ligeramente el nivel sonoro medido.

Estos tres puntos son ciertos para mediciones de precisión en laboratorio, con condiciones controladas. En primer lugar, en la medida del nivel sonoro en interior, que es donde se requiere de mayor sensibilidad, es absurdo pretender medir señales acústicas hasta 20 kHz cuando a partir de 400 Hz no queda energía sonora. En segundo lugar, los niveles sonoros en ambiente interior en período nocturno distan mucho de los 105 dBA. Y, por último, la distorsión del campo acústico causada por la presencia del micrófono de 1" es absolutamente despreciable, puesto que el campo acústico puede ser muy variable. Por tanto, técnicamente, para mediciones *in situ* se podrían utilizar micrófonos de 1".

Para solucionar este conflicto con el diámetro del micrófono, existen los micrófonos de precisión llamados *low noise* (LN). Estos micrófonos tienen una sensibilidad entre 800 mV/Pa y 1.200 mV/Pa, aproximadamente. Para incrementar la sensibilidad sin modificar el diámetro de la cápsula, se recurre a bajar la tensión de la membrana del diafragma, lo que limita el nivel máximo de presión acústica que puede captar el micrófono. Sin embargo, este «inconveniente» es irrelevante, ya que el nivel de inmisión en el interior de una sala, difícilmente puede medirse para niveles de presión elevados. La respuesta en frecuencia cubre todo el margen de audio hasta los 20 kHz.

La tecnología desarrollada para estos micrófonos LN trata de evitar al máximo la entrada de ruido eléctrico del exterior. En algún modelo, se recurre a soldar con láser la cápsula al preamplificador. El ajuste del conjunto se realiza en fábrica dentro de una sala con entorno limpio.

El uso de los micrófonos de 1/2" LN permitiría cumplir con las «especificaciones» de la legislación vigente y, a su vez, se conseguiría hacer mediciones de bajo nivel sonoro con total garantía, pudiendo medir a partir de los 10,2 dBA, lo que permite detectar y separar con precisión el ruido de fondo de cualquier inmisión sonora, aspecto que con los micrófonos de 1/2" convencionales es imposible de conseguir.

### 9.1.2. Mediciones convencionales. Legislación vigente

Las mediciones convencionales se basan en la medida de la presión sonora, como indicador principal del grado de contaminación acústica. Las mediciones convencionales o clásicas establecen, en general, unos puntos de medida y unos procedimientos de evaluación del nivel de ruido que se basan en la hipótesis de que, a mayor presión sonora, mayor contaminación y mayor grado de molestia. Las distintas legislaciones que podemos encontrar en el territorio utilizan los métodos de media convencionales, donde se especifican unos procedimientos de medida en función del tipo de fuente que se va a medir y un procedimiento para la evaluación del sonido, donde a los resultados obtenidos de la medida física se le aplican unos factores correctores  $K$  en función de si el sonido se considera que tiene componentes tonales ( $K_t$ ), componentes de baja frecuencia ( $K_p$ ) o componentes impulsivas ( $K_i$ ). El resultado final, llamado *evaluado*, se compara con unas tablas en las que se indica el nivel sonoro máximo que se permite.

Si el nivel evaluado supera estos valores, se considera que hay una afectación por ruido y se infringe la legislación por parte del causante del ruido. Si, por el contrario, los niveles evaluados son inferiores a los indicados en las tablas, se considera que no hay afectación alguna y se cumple la legislación.

Los casos más complejos y delicados en una medición, siguiendo los procedimientos que establece la legislación vigente, se dan generalmente en interiores, con niveles de inmisión por debajo de los 30 dBA. En estas situaciones hay algunos elementos clave que deben tenerse en cuenta.

#### 9.1.2.1. Corrección por ruido de fondo

Es una cuestión de acústica básica: el ruido de fondo debe descontarse siempre, y en todos los casos, del nivel sonoro medido. Esto es aplicable solo cuando el desnivel entre la fuente sonora y el ruido de fondo es igual o inferior a 10 dB. Cuando la diferencia entre el nivel de inmisión y el ruido de fondo es de 3 dB, la fuente sonora tiene el mismo nivel que el ruido de fondo. Salvo que se estén haciendo mediciones con métodos de ingeniería, y se utilice instrumentación con dos o más canales de medida simultáneos, por debajo de 3 dB no es recomendable descontar el ruido de fondo, ya que la incertidumbre de la medida es elevada. Algunas legislaciones sugieren repetir en otro momento o día las mediciones. En estos casos, el texto legislativo presupone que la actividad evaluada contamina acústicamente siempre, lo cual no tiene por qué ser cierto. Se ha sugerido que, en estos casos, se descuenta directamente los 3 dB del nivel de inmisión por ruido de fondo.

Respecto a la corrección por ruido de fondo, alguna ordenanza municipal vigente da un paso más allá y especifica que no se puede aplicar la corrección por ruido de fondo si

existe una penalización por componentes K. Este concepto no figura en ninguna norma ni documento técnico que avale dicha afirmación.

Las entidades de inspección acreditadas, que actúan en nombre de la Administración, tienen un grave problema al aplicar esta ordenanza municipal en sus informes. Por un lado, cualquier entidad acreditada debe respetar escrupulosamente el documento legislativo. Pero, por otro lado, cuando el ruido de fondo se acerca al nivel de inmisión (está a menos de 10 dB de este), debe restarse siempre su influencia para obtener el valor verdadero de la inmisión sonora, que, no hay que olvidar, es el objetivo prioritario de cualquier inspección acústica. Los criterios de calidad permiten que la entidad acreditada pueda enmendar, suplir o modificar aquellos procedimientos de medida con carencias técnicas en aras de obtener la veracidad del resultado. Ante el dilema generado, las entidades optan por el camino más fácil y seguir al pie de la letra el documento legislativo, a sabiendas de que los resultados no son correctos.

Para el caso que nos ocupa, la Ley 16/2002 de 28 de junio y el Reglamento que la despliega, 176/2009 de 10 de noviembre, de protección contra la contaminación acústica, especifica claramente en los anexos 3 y 4 (medida de niveles de inmisión acústica en ambiente exterior e interior, respectivamente) que siempre hay que restar la influencia del ruido de fondo cuando este se encuentra entre 3 y 10 dB por debajo del nivel de inmisión, y en este apartado no hacen referencia a la presencia o no de componentes K.

A nivel jurídico, el principio de jerarquía normativa es una cuestión clave para interpretar las leyes y normas jurídicas en general. Un principio no admite ninguna excepción en ningún caso. Las normas jurídicas se vertebran por el rango de importancia o relevancia jurídica. Las Ordenanzas Municipales, aunque tienen rango reglamentario, quedan por debajo de los Decretos.

Una Ordenanza Municipal es un documento legislativo que tiene un rango inferior al de un Decreto (sobre ruido, como es el caso), que es de rango superior, y ninguna Ordenanza puede ir en contra de un Decreto de rango superior. Por tanto, en este caso, seguir al pie de la letra la Ordenanza Municipal es incorrecto y puede tener graves consecuencias. Si llegara el caso ante un tribunal, lo que establece la Ordenanza es nula de pleno derecho y el juez puede no aplicarla, a la espera de que el Tribunal competente (Supremo o Superior) anule dicho apartado de la Ordenanza.

Pongamos un ejemplo: supongamos que el nivel de inmisión en un punto es de 25,6 dBA y que el ruido de fondo es de 23,6 dBA. Se detectan componentes K = 3 dBA. La tabla 9.3 resume los cálculos realizados. A la izquierda se muestra el cálculo correcto, descontando el ruido de fondo, y a la derecha se muestra el cálculo incorrecto, sin descontar el ruido de fondo.

**Tabla 9.3.** Ejemplo de cálculo correcto e incorrecto del nivel sonoro evaluado

| <b>Procedimiento correcto</b> | <b>dBA</b> | <b>Procedimiento incorrecto</b> | <b>dBA</b> |
|-------------------------------|------------|---------------------------------|------------|
| Inmisión neta                 | 21,3       | Inmisión                        | 25,6       |
| Penalización K                | 3          | Penalización K                  | 3          |
| Inmisión evaluada             | 24,3 < 25  | Inmisión evaluada               | 28,6 > 25  |

Como se puede apreciar en los resultados de la tabla 9.3, la diferencia (redondeando los resultados) entre ambos métodos es de 5 dBA (29-24 dBA). Los niveles de inmisión cumplen perfectamente con el límite establecido de 25 dBA, mientras que el método erróneo indica que los niveles evaluados superan ese límite. Esto crea una confusión.

Dicho lo anterior, cabe preguntarse cuál es el origen de esa decisión de no tener en cuenta el ruido de fondo o residual. Si no se tiene en cuenta el nivel del ruido de fondo o residual, el nivel de inmisión siempre será más elevado que el nivel de inmisión neto. Existiendo un límite máximo de nivel sonoro permitido, esta circunstancia beneficia a los posibles receptores de esa inmisión y, por tanto, se tiende a proteger al receptor en detrimento de la fuente origen del sonido. Tratar de proteger a los receptores sería una estrategia correcta, pero a costa de falsear los resultados. El procedimiento técnico aplicado por la ordenanza no es correcto.

Cuando los niveles de inmisión son muy bajos y se miden niveles inferiores a 25 dBA, hay que ser muy cautelosos con los resultados. Se observan dos cuestiones importantes. En primer lugar, porque con un micrófono de 1/2" los valores por debajo de 25 dBA no son fiables. En segundo lugar, se observa que, «a pesar» de penalizar el ruido con 3 dB, los niveles de inmisión «cumplen» la legislación. ¿Qué hacer en estos casos? No parece razonable que saltarse los conceptos técnicos de acústica básica sea el camino que se deba seguir.

Se podría conseguir esta «protección del receptor» sin hacer evaluaciones del nivel de ruido erróneas ni falseando resultados, modificando la redacción de la ordenanza y añadiendo que, cuando los niveles de inmisión estén cercanos al ruido de fondo, no deben detectarse componentes K en la inmisión. Este texto sería suficiente y supone una solución mucho más elegante, ya que resuelve el problema sin crear uno de nuevo y, además, protege a las personas sin saltarse el principio de jerarquía.

### **9.1.2.2. Correcciones K**

Se valora la presencia de componentes tonales, de baja frecuencia e impulsivas, en la señal sonora. Las componentes tonales utilizan el método simplificado de la ISO 1996, que, en general, cumple bien su función. La metodología para el cálculo de las compo-

nentes de baja frecuencia no está armonizada en el territorio y, además, utiliza recursos poco eficaces.

#### 9.1.2.2.1. Componentes impulsivas

La metodología usada actualmente para el cálculo de componentes impulsivas no solo es errónea, sino que el anexo C de la norma para sonómetros IEC 61672:2014 cita: «Varias investigaciones han concluido que la ponderación temporal I (Impulse) no es adecuada para la valoración de los sonidos impulsivos en relación con su sonoridad. La ponderación temporal I tampoco es adecuada para evaluar el riesgo de daño auditivo, ni para determinar la “impulsividad” de un sonido. Debido a la posibilidad de obtener resultados equivocados, la ponderación Impulse no se recomienda para los propósitos antes descritos».

La llamada ponderación Impulse realmente no existe como tal, es un «apaño» técnico que se ha heredado de los sonómetros analógicos. Esta función, que se puede encontrar en todos los sonómetros digitales, se utiliza actualmente para la supuesta detección de componentes impulsivas dentro de una señal sonora.

El sonido impulsivo se puede generar ya sea por la liberación rápida de gases comprimidos o por la colisión de objetos sólidos entre ellos. El impulso se puede definir como el cambio instantáneo en la presión del sonido durante un corto período de tiempo. La duración de los impulsos puede variar desde decenas de microsegundos para disparos de armas pequeñas hasta varios cientos de milisegundos para un estampido sónico, el cierre de una puerta o la caída de un objeto duro sobre un suelo también duro. Los sonidos impulsivos pueden ser perjudiciales para el oído si estos tienen presiones muy elevadas, como en el caso de petardos o disparos en las cercanías. Salvo estos casos, la mayoría de impactos medidos en entornos residenciales no resultan perjudiciales para el oído, pero producen molestias.

La función Impulse de los equipos de medida de sonido se desarrolló en la década de los sesenta para que los sonómetros o analizadores analógicos pudieran mostrar de forma aproximada el nivel del impulso (de duración muy breve) al usuario. Esta función estaba pensada para los equipos de medida analógicos que tenían indicadores de aguja que no permitían una lectura fiable pudieran mostrar el resultado y «retenerlo» unos instantes para que el observador tuviera tiempo de ver el valor aproximado y anotarlo, ya que no se disponía de «memoria». Nótese que la función Impulse permitía a la aguja del indicador subir rápidamente (constante de tiempo de 35 ms), mientras que el decrecimiento es de 1.500 ms. Este decrecimiento suave del desplazamiento de la aguja permitía que esta bajara lentamente, y así daba tiempo al observador para ver el nivel del impulso, facilitando una lectura aproximada.

La función Impulse fue una solución técnica para suplir unas carencias de los indicadores de aguja analógicos. Recordemos que, mientras se medía con la función Im-

pulse, no se podía medir el nivel sonoro, ya que ambas medidas eran excluyentes. Hoy en día los equipos son digitales, con procesado digital y con indicadores digitales que analizan todos los parámetros simultáneamente y almacenan toda la información en la memoria, de manera que no hay que estar pendiente de ver el indicador todo el rato. La función Impulse no se puede usar con estos equipos de medida, puesto que no cumple el cometido original. Notemos que la función  $L_{eq}$  tampoco se podía hacer con equipos analógicos.

No parece razonable utilizar la función Impulse con los equipos actuales con el mismo fin que con los analógicos, puesto que estos no tienen aguja que controlar en el indicador. El uso de la función Impulse en los equipos digitales actuales, para supuestamente medir los impulsos que contiene una señal, no es correcto por dos motivos: *a)* en primer lugar, porque produce una sobrevaloración debido al exagerado nivel integrador del tiempo de caída, y *b)* en segundo lugar, porque su cometido era variar la velocidad de respuesta de la aguja del indicador y conseguir una visualización adecuada; es decir, se trata de un control de la visualización y no es una función integradora temporal. Por último, no existe ningún documento ni estudio que demuestre que la función integradora temporal Impulse permita «medir» componentes impulsivas.

El método usado por las legislaciones actuales confunde la integración visual pensada para controlar el desplazamiento de la aguja de un indicador analógico con la integración temporal como cadencia de integración de la toma de muestras, que no es lo mismo. Los documentos legislativos reproducen los mismos textos de mediados del siglo XX, sin tener en cuenta los avances técnicos, y utilizan este indicador para valorar la presencia de componentes impulsivas en el sonido, confundiendo integración visual con el muestreo (que no tienen nada que ver) y propiciando, con ello, evaluaciones erróneas.

La excesiva sencillez de esta función se basa en la subida repentina del nivel de sonido con el objetivo de «detectar» la presencia de impulsos dentro de una señal, pero eso en la práctica no siempre es cierto. Los cambios bruscos de nivel de señal, aun sin tener impulsos, pueden favorecer que la función Impulse presente un resultado positivo a pesar de que dicha señal no tenga impulsos, esa es la perversión de este método tan arcaico. Nótese que, además, la subida repentina de nivel sonoro puede dar positivo en impulso, mientras que el decrecimiento repentino no. Una señal impulsiva tiene una subida repentina de nivel y una bajada de nivel similar en un corto espacio de tiempo. Si la señal solo presenta una subida o solo una bajada, no se trata de un impulso.

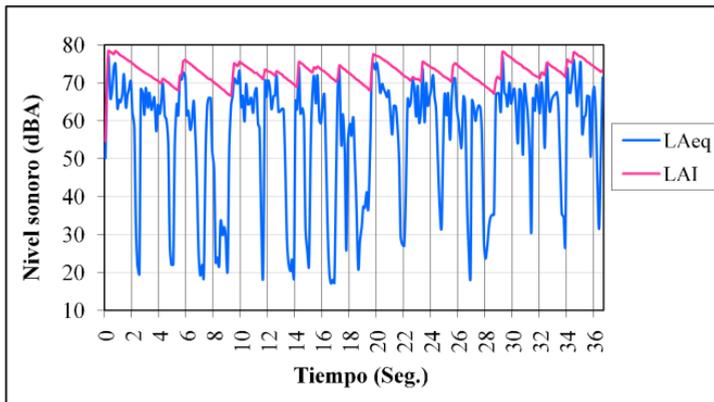
#### 9.1.2.2.1.1. Ejemplo de componentes impulsivas con señal de voz humana

Un ejemplo de señal carente de componentes impulsivas es la voz humana. La vocalización produce oscilaciones notables de nivel sonoro emitido por la voz, pero estas

grandes oscilaciones de nivel no se pueden considerar señales impulsivas. Sin embargo, una locución con niveles de ruido ambiente o de fondo moderados presenta, según la función Impulse, componentes impulsivas.

Para mostrar lo comentado anteriormente, la figura 9.4 muestra una locución obtenida en un estudio de grabación, es decir, en un entorno extraordinariamente silencioso. El registro de la voz presenta una gran dinámica, mostrada en color azul  $L_{Aeq}$ , y la gráfica en rojo corresponde a la función Impulse  $L_{AI}$ .

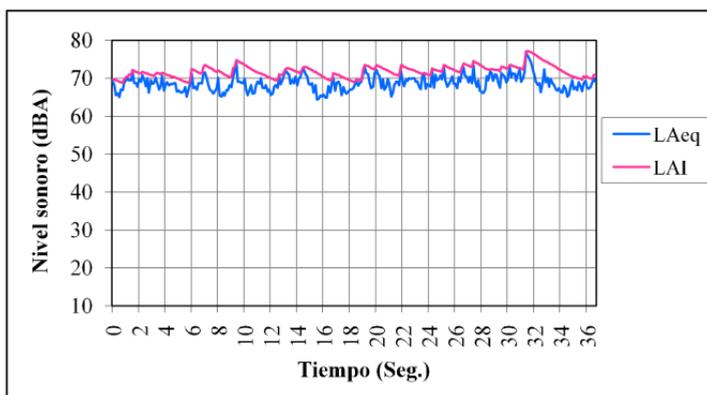
En el registro anterior se puede observar cómo el nivel sonoro en las pequeñas pausas de la locución, momento en que el locutor respira o toma aire, llega a los 20 dBA, que sería el ruido de fondo del estudio o la sala de grabación. El elevado desnivel entre el ruido de fondo y el nivel sonoro de la voz hace subir a la función Impulse (mostrada en color rojo en la figura 9.4). El tiempo de caída de dicha función es constante (1.500 ms) y son las pendientes inclinadas que podemos ver en el gráfico de color rojo. Se observa que la dinámica de la voz (color azul) es de unos 50 dBA.



**Figura 9.4.** Evolución temporal de una locución en un estudio de grabación.

Para contrastar lo anterior, la figura 9.5 muestra unas voces grabadas en un mercado, donde se aprecian unos desniveles sonoros pequeños (curva en azul), ya que el ruido ambiente es notablemente superior al del estudio de grabación. Se puede observar como la dinámica de la locución, en color azul, es bastante inferior respecto de la locución en estudio de grabación, siendo en este caso de unos 14 dBA.

La figura 9.5 mantiene la misma escala que la figura 9.4 para poder comparar fácilmente ambos resultados. Los valores promedio de los indicadores  $L_{Aeq}$  y  $L_{AI}$  correspondientes a las gráficas anteriores se resumen en la tabla 9.4.

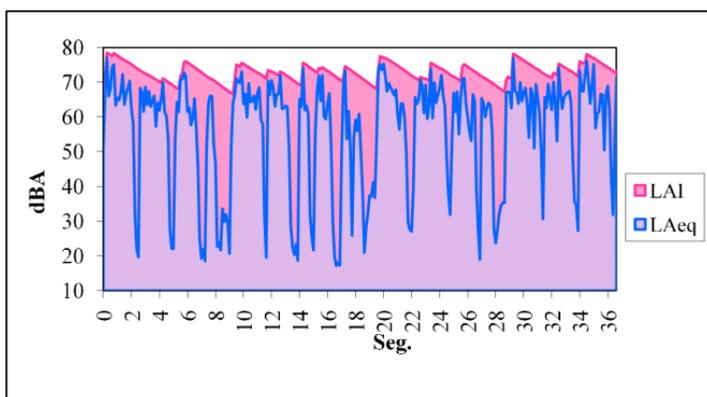


**Figura 9.5.** Evolución temporal de una locución en un mercado.

**Tabla 9.4.** Niveles sonoros correspondientes a las figuras 9.4 y 9.5

| NIVELES SONOROS  | LAI  | LAeq |
|------------------|------|------|
| Locución estudio | 73,6 | 67   |
| Voces mercado    | 71,7 | 68,8 |

Las ordenanzas municipales más recientes utilizan la diferencia de niveles  $L_{AI}-L_{Aeq}$  para valorar la presencia de componentes impulsivas. Al hacer la diferencia entre  $L_{AI}$  y  $L_{Aeq}$ , estamos restando la energía bajo las curvas rojo y azul de la figura 9.6. El resultado de la diferencia energética es la diferencia de áreas bajo cada curva.



**Figura 9.6.** Ejemplo de cálculo de la «impulsividad» de un sonido según la legislación vigente mediante la diferencia  $L_{AI}-L_{Aeq}$ .

Gráficamente,  $L_{AI}$  es el área de color rosa y  $L_{Aeq}$  es el área gris rosado. La diferencia  $L_{AI} - L_{Aeq}$  en este caso es de 6,6 dBA para la locución en estudio y de 2,9 dBA para la locución en el mercado. De forma arbitraria, y sin ningún documento técnico que lo avale, algunas legislaciones consideran que hay componentes impulsivas si la diferencia supera los 10 dBA, por lo que en este caso no habría componentes impulsivas. Sin embargo, otras legislaciones consideran que, si la diferencia es de 3 dBA, hay señales impulsivas. En el caso mostrado, la voz grabada en estudio tendría componentes impulsivas, mientras que la locución en el mercado no. Realmente, la locución humana carece de componentes impulsivas.

Es destacable que, usando los resultados de la misma medición y aplicando distintas legislaciones, se obtienen diferentes resultados para el mismo caso, lo cual es bastante incongruente. Independientemente del valor del desnivel de la señal sonora, la metodología utilizada es incorrecta, aunque al aumentar el valor de corte se acierte por casualidad el resultado en algún caso. Hay que tener mucho cuidado con el uso del indicador  $L_{AI}$ . Si se aplica de forma sistemática, puede conducir a errores de bulto, como el ejemplo de la voz humana. Resumiendo, la función Impulse que podemos encontrar actualmente en los sonómetros no sirve para medir impulsos y se desaconseja su uso.

### 9.1.3. Mediciones de precisión con métodos de ingeniería

Si bien los métodos de ingeniería pueden conseguir una mayor precisión y veracidad en los resultados, los niveles de presión sonora y las frecuencias asociadas no son suficientes para reflejar lo que perciben las personas expuestas a un sonido.

El elemento más trabajado y buscado durante décadas era cómo valorar el grado de molestia que genera un sonido sobre la población. Los primeros trabajos se remontan a finales de los años veinte del siglo XX, pocos años después del descubrimiento del micrófono de condensador por E.C. Wente en 1917. Los primeros equipos de medida funcionaban a válvulas y no eran portátiles por el gran consumo de energía eléctrica. En las décadas de los cuarenta a los sesenta, se buscó encontrar un indicador para valorar el grado de molestia que el sonido podía producir sobre las personas. Sin embargo, la irrupción del transistor en el mercado a finales de los años cincuenta propició la aparición de equipos portátiles para la medida del sonido. A partir de este momento, realmente se hicieron avances importantes, sobre todo por la mayor estabilidad y precisión de los equipos electrónicos de medida del sonido. A pesar de las mejoras de la tecnología y de los múltiples trabajos de investigación realizados, no se consiguió encontrar un indicador capaz de coincidir con las percepciones del sonido por los humanos.

A finales de los años ochenta, empieza a irrumpir la tecnología digital en los equipos de medida. Los primeros modelos tenían un indicador digital en lugar de analógico y podían calcular el nivel equivalente, pero todo el tratamiento de señal seguía siendo

analógico. A finales de la década de los noventa, al disponer de convertidores A/D con suficiente precisión y fiabilidad, apareció el concepto de «medir todo», gracias a que el sonómetro ya era 100% digital, los datos se almacenaban en formato electrónico en el sonómetro y ya no era necesario ir tomando lecturas mientras se estaba pendiente del indicador de aguja del equipo de medida.

Con el paso del tiempo, las necesidades también han evolucionado. La industria automovilística de la década de los setenta impulsó y desarrolló nuevos conceptos y nuevas métricas para poder diseñar el sonido de sus productos y diferenciarse de la competencia, un aspecto que era imposible conseguir solo con el  $L_{Amax}$ , que se usó y se usa únicamente para la homologación.

Las medidas acústicas de precisión no utilizan un procedimiento rígido de medida, sino que se deja al ingeniero responsable la decisión de la elección del punto o puntos de medida, su duración, etc. El objetivo final no es obtener un número, sino dar un resultado lo más cercano a la realidad. Para ello, el proceso denominado de *selección de muestras* resulta especialmente importante. Durante una medición, es muy frecuente que aparezcan incidencias por la irrupción de sonidos ajenos que nos alteran el nivel sonoro. En la selección de muestras, se tratará de seleccionar aquellos datos que se corresponden realmente con la fuente sonora evaluada, y es un proceso siempre *ad hoc*. Es el proceso más importante y delicado que requiere experiencia y, sobre todo, conocimientos sólidos de acústica. Las señales que más problemas generan, tanto en la medida como en su evaluación, son las señales impulsivas. Los métodos de ingeniería pueden utilizar diferentes técnicas de medida y análisis que permiten valorar con precisión la presencia de dichas componentes en una señal sonora.

### **9.1.3.1. Medida de la impulsividad de una señal**

Existen diversas alternativas técnicamente consistentes que permiten medir de forma correcta la impulsividad de un sonido. Las señales impulsivas son de muy corta duración. Dependiendo de la naturaleza donde se produce el impacto, su duración puede variar notablemente. Por ejemplo, los impulsos más cortos en duración son los producidos por las detonaciones (no deflagraciones), como los petardos y los disparos de armas de fuego con unos tiempos inferiores a 40 ms. Si el impacto se produce por el choque de dos elementos duros (por ejemplo, caída de una canica en el suelo cerámico o el tacón), la duración suele ser inferior a 110 ms. Si el impacto se produce con algún material blando (por ejemplo, un objeto duro que golpea sobre el parquet o el cierre de una puerta de un coche), la duración del impulso es inferior a 300 ms.

En este último caso, hay que tener en cuenta que el sonido del cierre de una puerta de un vehículo debe transmitir sensación de seguridad y de calidad del producto

al posible comprador, y eso requiere radiar energía a baja frecuencia que precisa de tiempos más largos. En general, se pueden producir impulsos de mayor duración, pero conllevan oscilaciones de nivel porque el primer impulso desencadena un fenómeno de vibración, como en el caso de los instrumentos de percusión, que lleva asociada una tonalidad.

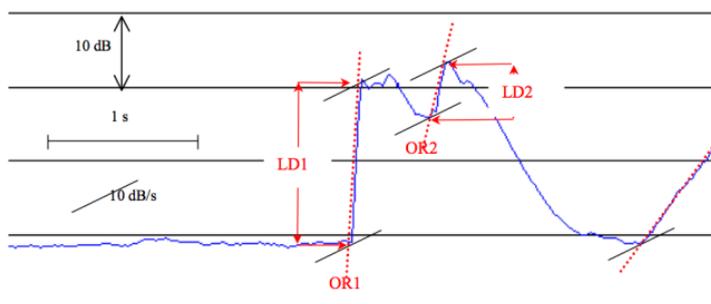
#### 9.1.3.1.1. *Factor de cresta acumulativo*

Una primera alternativa para medir señales impulsivas consiste en aplicar el concepto de *factor de cresta acumulativo* (FC) para clasificar los entornos de ruido en impulsivos o no impulsivos (Starck & Pekkarinen, 1987). Según este método, un entorno de ruido se considera impulsivo cuando la diferencia entre los niveles de pico y RMS de una señal sonora es igual o superior a 15 dB. La diferencia entre los niveles de pico y efectivo varía aleatoriamente en función del tipo de señal. Por tanto, el método calcula la función de distribución acumulada, que consiste en cálculos de la FC en pequeños intervalos de tiempo. De esta forma, el método determina el porcentaje de tiempo en la muestra, donde el CF supera los 15 dB.

Sin embargo, el método no establece un valor límite con respecto al porcentaje de tiempo que el factor de cresta debe exceder los 15 dB para que un ruido se considere impulsivo. Por ello, en lugar de indicar que el método permite clasificar los entornos ruidosos en impulsivos/no impulsivos, se puede afirmar que los entornos ruidosos pueden clasificarse en función de su impulsividad.

#### 9.1.3.1.2. *Método Nordtest*

Otros trabajos publicados posteriormente desarrollaron una metodología basada también en la curtosis para calcular el carácter impulsivo de una señal (Nordtest, 2002). El método tiene como objetivo predecir la prominencia de los sonidos impulsivos en correspondencia con los juicios subjetivos promedio. Basado en la prominencia predicha,  $P$ , se define un ajuste graduado,  $KI$ , del  $L_{Aeq}$  medido. El método se basa en la presunción de que la molestia aumenta con el incremento de la audibilidad (prominencia percibida) de los impulsos. La audibilidad de los impulsos se expresa por la prominencia, que debe superar un cierto límite antes de realizar un ajuste del nivel equivalente ( $L_{Aeq}$ ). Por debajo de este límite no se realiza ningún ajuste. Cuando la prominencia aumenta, el ajuste aumenta. La prominencia  $P$  se define mediante una medida logarítmica basada en la diferencia de nivel y la tasa de inicio del nivel de presión sonora ponderado  $A$  con ponderación temporal Fast. En la práctica, la escala logarítmica junto con la ponderación temporal Fast establece un límite superior para el ajuste.



**Figura 9.7.** Cálculo de la pendiente de subida (OR) y del desnivel (LD) para dos impulsos que aparecen en una señal (método Nordtest).

Este método, a diferencia del anterior, está orientado a valorar la molestia y no es aplicable para la evaluación del riesgo de pérdida auditiva. Parte de la valoración del impulso a partir de la evolución del nivel sonoro ponderado A y con la función Fast. La señal debe muestrearse con un tiempo de 10 a 25 ms. El método detecta el inicio de un impulso cuando el tiempo de subida de la señal supera los 10 dB/s y acaba la subida cuando está pendiente queda por debajo de los 10 dB/s. La figura 9.7 ilustra el tiempo de subida (*rise time*) para obtener la pendiente y la diferencia de nivel para las dos señales de carácter impulsivo mostradas.

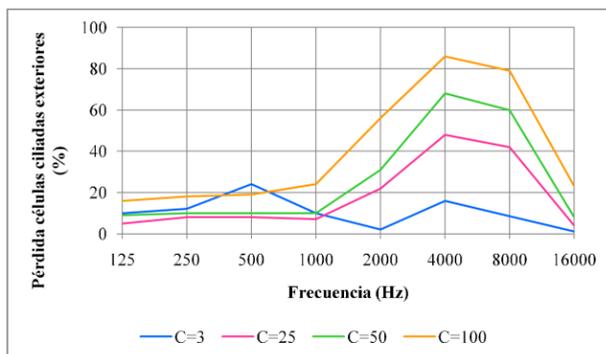
#### 9.1.3.1.3. Curtosis

La tercera alternativa para medir señales impulsivas consiste en utilizar las propiedades de la curtosis. Una de las primeras técnicas para medir el carácter impulsivo de una señal se desarrolló usando esta función, basada en la distribución estadística de muestras de la señal sonora (Erdreich J., 1986). También se tenía en cuenta el TTS auditivo provocado por los impulsos. El enfoque de este trabajo era valorar la presencia del carácter impulsivo en cuanto a su nocividad fisiológica sobre el oído y no a su simple detección (Fuente, y otros, 2018).

La curtosis es un parámetro estadístico que sirve para caracterizar la distribución de probabilidad de una variable aleatoria, indicando el grado de concentración de los valores alrededor de la medida central. Esto también se conoce como *grado de pico*. Se utiliza para caracterizar la morfología de una distribución. Justamente, esta propiedad es la que resulta tan interesante para la detección de picos de forma independiente a los niveles de la señal.

La curtosis calcula el pico de un sonido en función de su evolución temporal. La ventaja de usar la curtosis sobre otras técnicas es que todos los picos se tienen en cuenta en el cálculo y, además, también se incorpora la diferencia relativa entre el nivel máximo y el nivel de fondo. Un valor bajo o negativo indica que no hay picos, mientras que un valor superior a

20 indica la presencia de señales impulsivas en la señal. Existen evidencias de la afectación fisiológica sobre las células ciliadas del oído en mamíferos. La figura 9.8 muestra diferentes pérdidas de capacidad auditiva, causadas por la exposición a sonidos con el mismo espectro y energía, pero con diferente estructura temporal (Qiu, Hamernik, & Davis, 2013).



**Figura 9.8.** Porcentaje de pérdida de células ciliadas exteriores para tres grupos expuestos a 97 dB de ruido blanco con curtosis de 25 (rojo), 50 (verde) y 100 (naranja). La curva con una curtosis de 3 (azul) sin componentes impulsivas se representa a modo de referencia.

Los resultados indicaron que la hipótesis de energía igual es un principio unificador válido para estimar las consecuencias de una exposición a sonidos impulsivos, si (y solo si) las exposiciones de energía equivalente tienen el mismo nivel de curtosis. Además, para el mismo nivel de curtosis, la estructura temporal de la exposición no tiene un fuerte efecto sobre el trauma acústico producido.

No obstante, la mayoría de señales que podemos encontrar en situaciones reales son señales que se alejan del ruido blanco, tanto por la distribución de su densidad espectral como por su perfil espectral y variabilidad temporal. Para la evaluación de señales «reales», se definió el concepto de *exposición al ruido acumulado* (ERC) (Earshen, 1986), mediante la expresión 9.1:

$$ERC = L_{Aeq,8h} + K \left[ \frac{\text{Log } T}{\text{Log } 2} \right] \quad (9.1)$$

Donde:

$L_{Aeq,8h}$  es el nivel sonoro ponderado A promediado durante 8 horas.

T es la duración en años de la exposición al ruido:

$$K = \ln(C) + 1,9$$

C es la curtosis.

Para estudiar el fenómeno de los sonidos con componentes impulsivas, se hizo un experimento de dosis-respuesta para dos grupos de trabajadores industriales, uno en un entorno textil y otro de fabricación de metal, expuestos a tipos de ruidos continuos gaussianos (G) y no gaussianos (NG) (complejos) y se analizó la función curtosis para la evaluación de la pérdida auditiva inducida por el ruido industrial (Zhao, Qiu, Zeng, Cheng, Davis, & Hamernik, 2010).

Un análisis de los entornos de ruido en las dos plantas industriales mostró que las exposiciones al ruido en la planta textil eran de tipo G con un  $L_{eqA,8h}$  que variaba de 96 a 105 dBA, mientras que las exposiciones en la planta de fabricación de metal tenían un  $L_{eqA,8hr}$  de 95 dBA y eran de tipo NG que contenían altos niveles (hasta 125 dBA SPL pico) de ruido de impacto. La estadística de curtosis se usó para cuantificar la desviación del entorno de ruido NG del G. La relación dosis-respuesta para los sujetos no expuestos al ruido G mostró una mayor prevalencia de pérdida auditiva para una exposición acumulativa que la de los sujetos expuestos al ruido G. Al introducir la variable de curtosis en el componente temporal del cálculo de la exposición acumulada al ruido, las dos curvas de dosis-respuesta podrían superponerse, produciendo esencialmente un efecto equivalente inducido por el ruido para los dos grupos de estudio.

Posteriormente, se ha llevado a cabo un estudio más amplio con 178 sujetos expuestos a un ruido complejo NG en dos plantas siderúrgicas y 163 sujetos expuestos al ruido G de una planta textil. Los resultados mostraron que, para exposiciones al ruido acumulado similares, el ruido complejo causó una pérdida auditiva significativamente mayor que para el ruido G. Al usar la misma medida de exposición al ruido acumulada ajustada por curtosis, las curvas de pérdida auditiva del ruido complejo y el ruido G se superpusieron una vez más (Xie, et al., 2016). Estos resultados respaldaron los resultados de Zhao *et al.* (2010).

A partir de las investigaciones de Zhao *et al.* (2010) y de Xie *et al.* (2016), el cálculo de la ERC viene dado por la expresión 9.2:

$$ERC = L_{Aeq,8h} + \frac{\ln(C) + 1,9}{\log(2)} \text{Log}(T) \quad (9.2)$$

A partir de los resultados de las investigaciones de Zhao *et al.* (2010), Goley (Goley, Song, & Kim, 2010) propuso otra forma de usar la función curtosis para evaluar el riesgo auditivo. Su propuesta usa la curtosis para ajustar directamente el nivel de presión acústica medido, a partir de la expresión 9.3:

$$L'_{Aeq} = L_{Aeq} + \gamma \log\left(\frac{C}{C_G}\right) \quad (9.3)$$

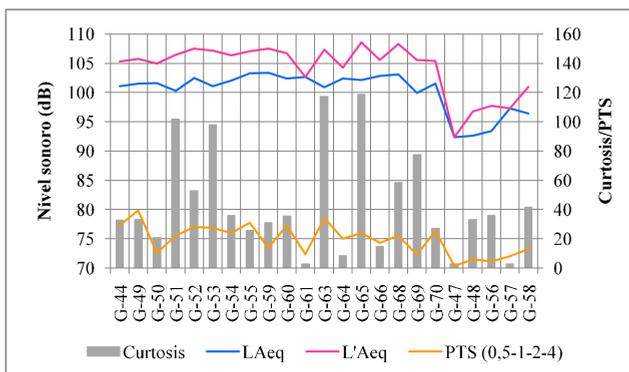
Donde:

$\gamma$  es una constante determinada por la correlación dosis-efecto ( $\gamma = 4,02$ ).

$C$  es la curtosis.

$C_G$  es la curtosis para ruido  $C_G = 3$ .

El trabajo de Goley se basa en analizar 23 casos de ruido distintos con diferentes niveles, espectros y componentes impulsivas. La figura 9.9 muestra los resultados obtenidos.



**Figura 9.9.** Nivel equivalente  $L_{Aeq}$  (azul) de 23 casos distintos y nivel corregido con el método de Goley  $L'_{Aeq}$  (rojo), curtosis (gris) y pérdida auditiva permanente (naranja) evaluada para las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.

Se puede observar como en los casos donde la curtosis es muy baja no hay corrección de nivel.

El método desarrollado por Goley permite obtener un valor corregido para el nivel equivalente ( $L'_{Aeq}$ ), que tiene su utilidad principalmente en la valoración de la nocividad de los impulsos. Sin embargo, la detección de componentes impulsivas no implica una nocividad, puesto que los niveles de las componentes impulsivas son inferiores. La valoración de la detección de dichas componentes se puede determinar a partir del uso de la función curtosis, estableciendo un escalado para correlacionar este indicador con la percepción de dichas componentes.

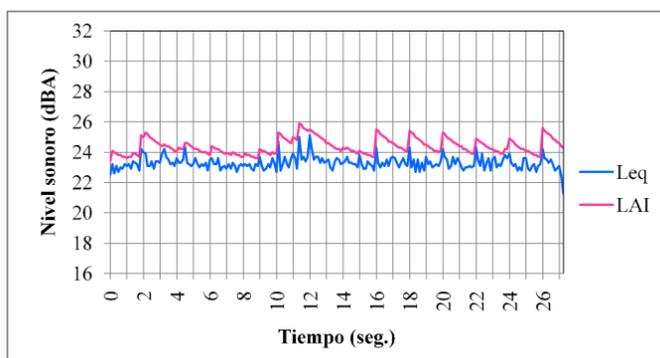
De los tres métodos expuestos anteriormente, la curtosis ofrece los mejores resultados y es un método muy fácil de implantar y, por tanto, susceptible de añadir a los equipos de medida para que el usuario pueda visualizar esta función en tiempo real mientras realiza una medición de nivel sonoro. Seguidamente, se muestran tres ejemplos que ilustran la bondad de este indicador. La aplicación quizá más interesante es en las evaluaciones de los niveles de inmisión producidos por una actividad sobre un dormitorio en período nocturno.

#### 9.1.3.1.4. Ejemplo 1: dormitorio con sonidos impulsivos

Se parte del registro de 27,25 s de duración en un dormitorio con un nivel sonoro muy bajo (23,3 dBA). A esta señal se le añaden tres impactos de forma aleatoria. La posición de los impactos, así como su intensidad, se varían. Se añaden las señales de impacto con niveles muy bajos que no son perceptibles, pero están, y se sube su nivel hasta hacerlos perceptibles.

La figura 9.10 muestra la evolución temporal del nivel sonoro medido en el interior del dormitorio. Se representa en color azul la evolución del nivel equivalente y en color rojo la función Impulse  $L_{AI}$  que da el sonómetro. Se observa que esta señal detecta las subidas abruptas de nivel, pero no las bajadas, ya que se integra la señal artificialmente con un tiempo de caída de 1,5 s. Toda la energía que se observa bajo la curva de color rojo, debido a esta integración temporal, no se ajusta a la realidad, es decir, es energía añadida.

Las figuras 9.10, 9.11 y 9.12 muestran la evolución temporal de la señal sonora para distintos niveles de impulsividad creciente. Las señales resultantes se analizan y se obtienen los indicadores  $L_{eq}$  y  $L_{AI}$  para calcular su diferencia y determinar el grado de impulsividad según la legislación vigente. También se aplica el indicador de curtosis para comparar resultados.



**Figura 9.10.** Nivel sonoro en el interior de un dormitorio sin impactos.

La tabla 9.5 resume los niveles sonoros medidos mostrados en las gráficas 9.10, 9.11 y 9.12. Como se muestra, el caso sin impactos tiene un índice  $L_{AI} - L_{eq}$  de 1,1 correspondiente al ruido de fondo, donde realmente no hay componentes impulsivas. Este valor debería restarse a los valores obtenidos ante la presencia de componentes impulsivas. Nótese que, en el caso del impacto perceptible, el indicador  $L_{AI} - L_{eq}$  es de 1,9 dB, que, según el D179/2009, no tiene penalización, y según el Real Decreto 1367/2007, tampoco.

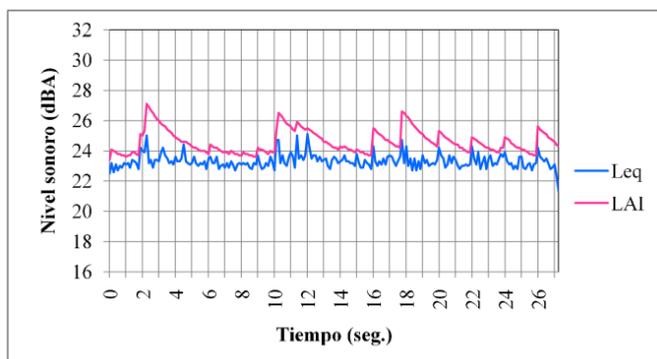


Figura 9.11. Nivel sonoro con tres impactos no perceptibles auditivamente.

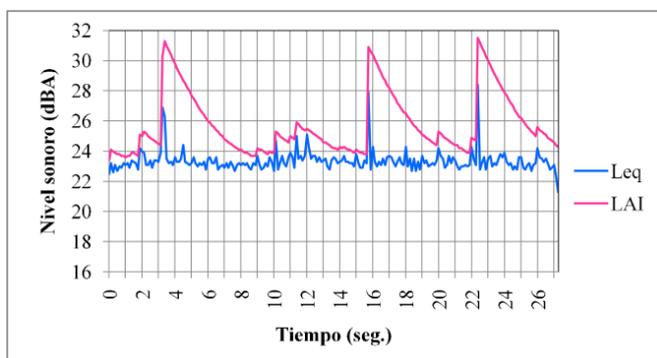


Figura 9.12. Nivel sonoro con tres impactos algo perceptibles auditivamente.

Sin embargo, dado el nivel sonoro tan bajo dentro del dormitorio, los impactos son claramente perceptibles. Como se muestra en la tabla 9.5, la curtosis detecta perfectamente los impactos, presentando un valor superior a 20, mientras que los métodos legislativos no los detectan.

Tabla 9.5. Niveles medidos correspondientes a las figuras 9.10, 9.11 y 9.12

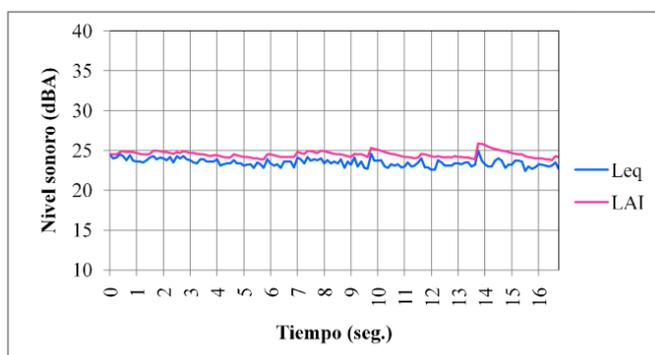
| Ruido fondo dormitorio 1 | Sin impacto | Impacto no perceptible | Impacto perceptible |
|--------------------------|-------------|------------------------|---------------------|
| Leq                      | 23,3        | 23,3                   | 23,4                |
| LAI                      | 24,4        | 24,7                   | 26,4                |
| LAI-Leq                  | 1,1         | 1,4*                   | 3*                  |
| * valor corregido        |             | 0,3                    | 1,9                 |
| Curtosis                 | 3,84        | 3,61                   | 22,97               |

### 9.1.3.1.5. Ejemplo 2: dormitorio con voces

Se parte de un registro de 16,75 s de duración en un dormitorio distinto al anterior caso, con un nivel sonoro medido *in situ* muy bajo (23,5 dBA). A esta señal se le añaden voces procedentes de otra unidad familiar. Se añaden las señales de voces con niveles muy bajos que no son perceptibles, pero están, y se sube su nivel hasta hacerlos perceptibles.

Las señales resultantes se analizan y se obtiene los indicadores  $L_{eq}$  y  $L_{AI}$  para calcular su diferencia y determinar el grado de impulsividad según la legislación vigente. También se aplica el indicador de curtosis para comparar resultados. La voz no tiene componentes impulsivas; no obstante, el indicador  $L_{AI} - L_{eq}$ , como es sensible a los desniveles y no discrimina el carácter impulsivo, suele indicar presencia de componentes impulsivas, sin haberlas. No debe confundirse a las señales de vocalización explosivas con señales impulsivas.

La figura 9.13 muestra en color azul la señal sonora original ( $L_{eq}$ ) en el dormitorio sin voces; en color rojo, se muestra la función Impulse ( $L_{AI}$ ). Las figuras 9.14 y 9.15 muestran el nivel sonoro con voces no perceptibles y perceptibles, respectivamente. En ambos casos, se muestran en color azul los niveles sonoros  $L_{eq}$ , mientras que la función  $L_{AI}$  se muestra en color rojo.



**Figura 9.13.** Nivel sonoro en el dormitorio, en completo silencio y sin voces.

La tabla 9.6 resume los niveles sonoros medidos mostrados en las gráficas 9.13, 9.14 y 9.15. Como se muestra, en el interior del dormitorio sin voces (ruido de fondo), el índice  $L_{AI} - L_{eq}$  es de 1. Este valor debería restarse a los valores obtenidos ante la presencia de componentes impulsivas. Notamos que, en el caso de las voces perceptibles, el indicador  $L_{AI} - L_{eq}$  es de 3,6 dB, que, según el D179/2009, tiene una penalización de 3 dB, y según el Real Decreto 1367/2007, ninguna. Sin embargo, dado el nivel sonoro tan

bajo dentro del dormitorio, las voces son claramente perceptibles auditivamente, aunque la voz carece de componentes impulsivas. Nótese que, en este caso, la curtosis distingue perfectamente las señales de voz que no tienen carácter impulsivo y presenta un bajo valor, indicando que no existen componentes impulsivos en la muestra analizada.

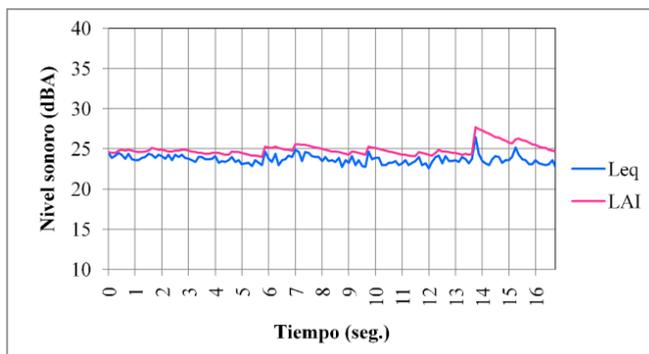


Figura 9.14. Nivel sonoro en el dormitorio, con voces no perceptibles.

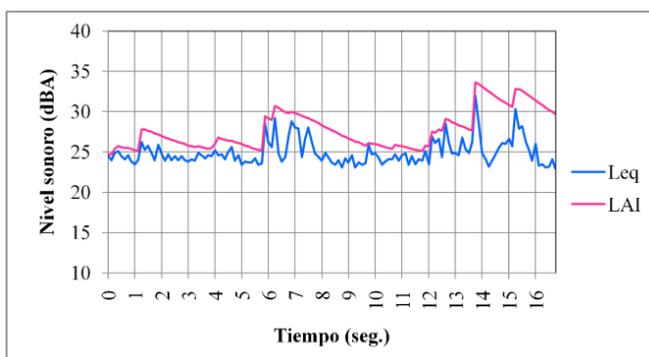


Figura 9.15. Nivel sonoro en el dormitorio, con voces perceptibles.

Tabla 9.6. Niveles medidos correspondientes a las figuras 9.13, 9.14 y 9.15

| Ruido fondo dormitorio 2 | Sin impacto | Voces no perceptibles | Voces perceptibles |
|--------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|
| Leq                      | 23,5        | 23,7                  | 27,3               |
| LAI                      | 24,5        | 25,0                  | 31,9               |
| LAI-Leq                  | 1           | 1,3*                  | 4,6*               |
| * valor corregido        |             | 0,3                   | 3,6                |
| Curtosis                 | -0,1        | -0,1                  | 1,38               |

### **9.1.3.2. Componentes de baja frecuencia**

Cuando se habla de componentes de baja frecuencia, nos referimos al sonido no deseado que se produce dentro de la región más baja del intervalo audible. Las personas a menudo están expuestas al sonido de baja frecuencia en espacios exteriores, ya que es producido por fuentes de transporte (aviones, automóviles y locomotoras), industriales (bombas, compresores, turbinas) y naturales (viento). Las dos fuentes de ruido más destacables en entornos urbanos, que generan elevados niveles de baja frecuencia y que son muy familiares, son el ruido de automoción (motor) y el ritmo musical. El primero afecta tanto en exteriores como en interiores, mientras que el segundo principalmente se percibe en interiores. A menudo, existe confusión con respecto a la separación entre el sonido de baja frecuencia y el infrasonido. Se podría argumentar que no existe una separación clara y que el infrasonido es simplemente un sonido de muy baja frecuencia. Sin embargo, el infrasonido se considera para frecuencias por debajo de 20 Hz y el sonido de baja frecuencia se considera en el intervalo de 10 Hz hasta aproximadamente 200 Hz. Existe, pues, un pequeño solapamiento entre ambos conceptos.

La valoración del contenido de baja frecuencia de un sonido está sujeta a unos límites que establece la legislación vigente. Estas legislaciones tienen por objetivo detectar la presencia de estas componentes que puedan resultar molestas para las personas. Las legislaciones establecen unos límites de inmisión sonora valorados en dBA. En ocasiones, los niveles de inmisión sonora están por debajo de los límites máximos, pero se percibe claramente esa energía de baja frecuencia que molesta. Las llamadas correcciones  $K_f$  tienen por objetivo «compensar» los resultados. Esta valoración resulta especialmente interesante en aquellos casos en los que la fuente sonora genera bajas frecuencias. Es el caso, por ejemplo, de las actividades musicales y del tráfico rodado, entre otros.

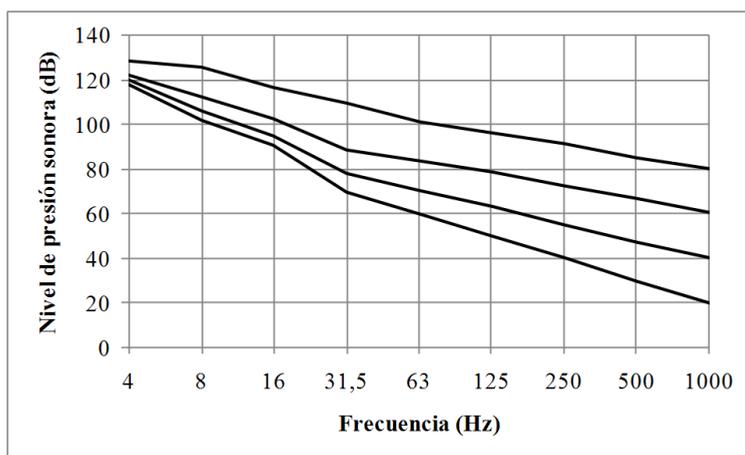
Los problemas relacionados con la baja frecuencia se manifiestan con más intensidad en los espacios interiores y son especialmente delicadas las valoraciones en período nocturno, donde los niveles de inmisión se encuentran por lo general muy próximos a los niveles de ruido de fondo o residual. El sonido que se percibe dentro de una sala colindante con una actividad musical viene determinado por el grado de aislamiento acústico de los elementos constructivos, las condiciones acústicas del recinto, la presencia de otras fuentes sonoras y el nivel sonoro dentro del propio local.

Generalmente, la reproducción musical de la música actual suele enfatizar el contenido de las bajas frecuencias, a veces hasta límites exagerados de compresión que no pueden ser absorbidas por las estructuras de la actividad. Por otro lado, es bien conocido que el aislamiento acústico de los elementos constructivos en las bandas de baja frecuencia no suele ser elevado. Un mayor nivel sonoro en emisión y un menor aislamiento en las bandas de interés, redundan en niveles de inmisión con energía en las bandas de baja frecuencia, superiores a las deseables. Las mediciones de nivel sonoro realizadas con

ponderación A no reflejan en estos casos el grado de contaminación acústica y de molestia reales a que se ven sometidos los residentes. De aquí la necesidad de «corregir» estos valores con los llamados factores K.

### 9.1.3.2.1. Efectos de la baja frecuencia

El efecto principal del sonido de baja frecuencia, y el que se manifiesta con mayor frecuencia, es la molestia (Broner, 1978). A frecuencias muy bajas, incluidas las del intervalo infrasonoro, la molestia tiende a surgir justo por encima del umbral de audición y aumenta más rápidamente que con el ruido de frecuencia media a alta (Andersen & Moller, 1984). A medida que se disminuye la frecuencia del sonido, entrando en el margen subsónico, se pueden tolerar mayores aumentos en el nivel sonoro sin que el grado de molestia aumente significativamente. El sentido auditivo adquiere una respuesta altamente no lineal, como se muestra en la figura 9.16. Esto significa que, una vez se produce la molestia, un aumento del nivel sonoro subsónico no se traduce en un incremento proporcional de la molestia. Si bien esto se puede considerar positivo, el proceso inverso donde se desea reducir el grado de molestia exigirá reducciones importantes del nivel sonoro subsónico para obtener resultados positivos.



**Figura 9.16.** Curvas de molestia equivalente para niveles de referencia de 20, 40, 60 y 80 dB (Broner, 1978).

Los efectos directos del sonido de baja frecuencia en otras partes del cuerpo humano se producen a un nivel muy por encima del nivel en el que el sonido de baja frecuencia se escucha por primera vez a través de los oídos. Los experimentos realizados con sujetos con audición normal y sordos profundos encontraron que el umbral de sensación de

los sujetos sordos estaba aproximadamente entre 40 y 50 dB por encima del umbral de audición de los sujetos con audición normal a una frecuencia de 63 Hz, y el margen era aún mayor a frecuencias más altas (Yamada, Ikuji, Fujikata, Watanabe, & Kosaka, 1983).

Otro efecto bien conocido que produce la baja frecuencia es su elevada capacidad enmascarante sobre otros sonidos. En los entornos urbanos, la energía de baja frecuencia destaca claramente, lo que en ocasiones dificulta o llega a impedir la comunicación verbal entre personas en la calle. También en ocasiones podemos escuchar el ritmo musical procedente del interior de un vehículo. Las personas en el interior de un vehículo deben subir exageradamente el volumen para superar los niveles de ruido generados por el propio motor y, en especial, el escape, para escuchar el ritmo musical. En espacios interiores, los sistemas de climatización centralizados suelen ser los causantes de estas componentes. Tras varias horas, se aprecia una cierta fatiga acústica, aunque en la mayoría de casos los afectados no son conscientes de la presencia de las bajas frecuencias.

Los procedimientos legislativos para valorar la presencia de componentes de baja frecuencia se basan en su mayoría en calcular la diferencia entre el nivel sonoro medido en dBC y el nivel medido en dBA. Esta técnica ha sido usada durante muchas décadas para valorar la presencia de baja frecuencia en un sonido. Aunque es un método muy simple y fácil de usar, no es un método infalible. Funciona correctamente para niveles sonoros moderados superiores a los 30 dBA, pero es especialmente nefasto para niveles por debajo de los 30 dBA. Existen diferentes versiones de esta técnica, donde se intenta complementar este método con otras técnicas en un afán de mejorar sus prestaciones.

Es el caso del Decreto 176/2009, que modifica el método del Real Decreto 1367/2007. La modificación tiene dos partes. En primer lugar, se utiliza la diferencia entre dBC y dBA, pero se restringe el margen de frecuencias entre 20 Hz y 160 Hz, en lugar de hacerlo de 20 Hz a 20 kHz, como propone el Real Decreto 1367. Este procedimiento parece más razonable, dado que, para niveles bajos de señal, el ruido generado por el conjunto micrófono-preamplificador incrementa la energía a las medias y altas frecuencias posibilitando de esta manera que el nivel medido de baja frecuencia se vea influido por la energía a medias y altas frecuencias, lo cual introduce un error. En segundo lugar, se aplica el llamado *criterio de audibilidad*, basado en la ISO 226. Esta norma evalúa la sensibilidad auditiva del oído humano para diferentes niveles de sonoridad. Para medir este umbral auditivo, las pruebas se realizan en un entorno muy silencioso y acondicionado acústicamente, y consisten en escuchar señales tonales de corta duración dióticamente.

Sin embargo, el oído humano no se encuentra en las mismas condiciones en la vida cotidiana. Por un lado, los sonidos que recibimos habitualmente no son componentes tonales puras de corta duración, sino señales complejas con multitud de frecuencias y niveles sonoros. Por otro lado, la propagación sonora no es siempre en campo libre. Y,

por último, no solemos estar en entornos muy silenciosos y con un acondicionamiento acústico notable. Por todo ello, el uso de la ISO 226 para establecer unos límites de audibilidad en una situación real (no de laboratorio) puede producir resultados erróneos, dado que tanto la exposición al sonido, el entorno, como el tipo de sonidos son completamente distintos a los usados por la ISO 226.

Finalmente, el nivel de ruido de fondo en las mediciones *in situ* en el interior de un dormitorio, por ejemplo, suele ser bastante superior al de una cámara anecoica o similar, donde se mide el umbral auditivo. Esto hace que la curva de sensibilidad auditiva no sea la más baja (umbral auditivo). Por tanto, es incorrecto usar el umbral audible para determinar si un sonido puede ser escuchado o no, independientemente del nivel de sonoridad de la señal. En todo caso, se debería utilizar la curva de sensibilidad auditiva correspondiente a la sonoridad producida por el ruido evaluado, lo que no está exento de dificultades y no está contemplado en los procedimientos legislativos.

#### 9.1.3.2.2. Métodos para la medición de la baja frecuencia

No existe ningún método aceptado como modelo o estándar para la detección de componentes de baja frecuencia. Sin embargo, existen distintos métodos que tratan de dar respuesta a esta necesidad. La tabla 9.7 resume los métodos usados por algunos países.

**Tabla 9.7.** Métodos usados por varios países para medir las componentes de baja frecuencia

| PAIS      | PUNTOS MEDIDA | UBICACIÓN PUNTOS    | PUNTO EN ESQUINA | RANGO FRECUENCIAS | DIST. MIN. PAREDES | ALTURA      |
|-----------|---------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------|
| Alemania  | 1             | 1 técnico           |                  | 10 - 80           |                    |             |
| Austria   | 1             | 1 técnico           |                  | 10 - 80           |                    |             |
| Dinamarca | 3             | 2 usuario           | 1                | 5 - 160           | 0,5                |             |
| España    | 3 +           | 3 técnico           |                  | 20 - 20.000       | 1                  | 1,2 - 1,5   |
| Finlandia | múltiples     | usuario             |                  | 20 - 200          | 1                  |             |
| Holanda   | 1             | 1 técnico / usuario | 1 opcional       | 20 - 100          | 0,2 a 0,5          |             |
| ISO 16032 | 3             | 2 usuario           | 1                | 20 - 200          | 0,1                | 0,1         |
| Japón     | 1             | 1 usuario           |                  | 10 - 80           |                    |             |
| Suecia    | 3             | 2 usuario           | 1                | 31,5 - 200        | 0,5                | 0,6-1,2-1,6 |

La tabla 9.7 muestra comparativamente como la mayoría de métodos se centran en la baja frecuencia, sobre todo entre 20 Hz y 200 Hz. Solo el Real Decreto 1367/2007 usa toda la banda de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. Por otro lado, los puntos de medida son múltiples y las distancias a los elementos constructivos suelen ser inferiores a 1 m.

Resulta destacable que, en algunos de estos métodos, los puntos de medida los determina el afectado, sin ninguna restricción.

Las mediciones en las esquinas siempre presentan niveles de baja frecuencia superiores a otros puntos dentro del recinto. En este aspecto no hay unanimidad, quizá porque en general los puntos donde se encuentran mayoritariamente las personas no suelen ser las esquinas de los recintos, por lo que hacer una medición en la esquina no nos indica el grado de afectación real al que se ve sometida la persona afectada.

Respecto a los niveles máximos permitidos para las distintas bandas de frecuencia, no todos los métodos establecen un límite máximo. La tabla 9.8 resume los niveles máximos permitidos para distintas legislaciones y muestra como la mayoría de países optan por extender el margen de frecuencias notablemente por debajo de los 20 Hz.

**Tabla. 9.8.** Niveles sonoros máximos permitidos, para cada banda de frecuencia, para los distintos procedimientos legislativos

| Hz   | ISO 226 | Nº9 1997<br>Dinamarca | SP INFO<br>1996:17<br>Suecia | Defra 2005<br>Reino<br>Unido | DIN45680<br>Alemania<br>1997 | DIN<br>45680*<br>Alemania<br>2013 | DNAF<br>2002<br>Holanda | Finlandia |
|------|---------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------|
| 8    |         |                       |                              |                              | 103                          | 100                               |                         |           |
| 10   |         | 90,4                  |                              | 92                           | 95                           | 92                                | 92                      |           |
| 12,5 |         | 83,4                  |                              | 87                           | 87                           | 84                                | 88                      |           |
| 16   |         | 76,7                  |                              | 83                           | 79                           | 76                                | 84                      |           |
| 20   | 78,5    | 70,5                  |                              | 74                           | 71                           | 68,5                              | 74                      | 74        |
| 25   | 68,7    | 64,7                  |                              | 64                           | 63                           | 58,7                              | 64                      | 64        |
| 31,5 | 59,5    | 59,4                  | 56                           | 56                           | 55,5                         | 49,5                              | 55                      | 56        |
| 40   | 51,1    | 54,6                  | 49                           | 49                           | 48                           | 41,1                              | 46                      | 49        |
| 50   | 44      | 50,2                  | 43                           | 43                           | 40,5                         | 34                                | 39                      | 44        |
| 63   | 37,5    | 46,2                  | 41,5                         | 42                           | 33,5                         | 27,5                              | 33                      | 42        |
| 80   | 31,5    | 42,5                  | 40                           | 40                           | 33                           | 21,5                              | 27                      | 40        |
| 100  | 26,5    | 39,1                  | 38                           | 38                           | 33,5                         | 16,5                              | 22                      | 38        |
| 125  | 22,1    | 36,1                  | 36                           | 36                           |                              | 12,1                              | 18                      | 36        |
| 160  | 17,9    | 33,4                  | 34                           | 34                           |                              |                                   | 14                      | 34        |
| 200  | 14,4    |                       | 32                           |                              |                              |                                   | 10                      | 32        |
| 250  | 11,4    |                       |                              |                              |                              |                                   |                         |           |

Resulta bastante obvio que los niveles de baja frecuencia medidos dependen en gran medida de la posición elegida. Para valorar la molestia generada por la baja frecuencia,

los promedios entre distintas mediciones no son adecuados, ya que las personas presentes en los puntos de mayor nivel sonoro no se benefician de que en otros puntos de la sala el nivel sonoro sea inferior. Por esto, parece que lo más aconsejable es escoger los puntos de medida allí donde el usuario manifiesta que oye el ruido con más intensidad (Simmons C. , 1997).

Algunos métodos proponen medir únicamente en las cuatro esquinas del recinto, hacer un promedio energético buscando el máximo valor y restarle 4 dB (Pedersen S. , 2007). Las incertidumbres asociadas a este método son muy bajas y hay una buena correlación con la molestia. Sin embargo, la distribución de energía de baja frecuencia no siempre es simétrica y, por otro lado, los resultados prácticos muestran que con este método, en general, se sobrevaloran los niveles percibidos por los afectados.

#### 9.1.3.2.3. *Percepción de componentes de baja frecuencia*

El oído interno dispone de dos tipos de células ciliadas: las células ciliadas interiores (CCI) y las células ciliadas exteriores (CCE). Las CCI no están acopladas mecánicamente a la membrana tectónica y son sensibles a la velocidad de las vibraciones, haciéndolas insensibles a bajas frecuencias. Las CCE son mucho más numerosas, están acopladas mecánicamente a la membrana tectónica y son sensibles al desplazamiento, haciéndolas sensibles a las bajas y muy bajas frecuencias. La percepción de las frecuencias muy bajas o subsónicas se produce gracias a las CCE, que tienen además la función básica de «amplificar» las vibraciones que reciben de bajo nivel y que permiten al ser humano escuchar sonidos por debajo de los 60 dB. Las CCE están conectadas al cerebro mediante la vía aferente de tipo II que puede introducir cierta atenuación en las bajas frecuencias. Esta misma vía aferente es la utilizada para las señales de alarma y los *tinnitus*. Algunos trabajos muestran que el contenido de las medias y altas frecuencias puede enmascarar la percepción de las bajas frecuencias (Krahé, 2010), aunque, en mediciones de inmisión en ambiente interior, esto no suele suceder.

Las quejas por percepción de baja frecuencia han aumentado notablemente en los últimos años en la mayoría de los países de la Unión Europea. ¿Este fenómeno se debe quizá a que la población se ha vuelto más sensible? ¿Hay realmente un incremento de los niveles de baja frecuencia? Es probable que el uso indiscriminado de la ponderación A, que atenúa fuertemente el nivel de baja frecuencia, rebaje en exceso los niveles sonoros medidos, por lo que los resultados no se ajustan a la realidad (Pedersen S. , 2007) (Persson, Björkman, & Rylander, 1990) (Berlung & Lindvall, 1995) (Barti R. , 1995) (Krahé, 2008). Por otro lado, el aislamiento de la construcción en la Unión Europea ha mejorado en las últimas décadas. Valorando con detalle las mejoras de las soluciones constructivas y de los nuevos materiales, vemos que estas se han traducido en un incremento del aislamiento al ruido aéreo de las bandas de medias y altas frecuencias. Esto ha hecho

disminuir el ruido en ambiente interior en estas bandas de frecuencias, pero se ha mantenido el de baja frecuencia, lo cual empeora la sensación de molestia por baja frecuencia percibida por las personas (Krahé, 2008).

Diversos estudios evidencian que la población joven presenta un notable grado de deterioro auditivo, disminuyendo la sensibilidad auditiva a medias y altas frecuencias (Barti R. , 1999) (Rodríguez, 2015) (Wasano, Kaga, & Ogawa, 2021). Curiosamente, la mayoría de quejas por percepción de baja frecuencia proviene de personas de entre 50 y 70 años. Nótese que las personas de avanzada edad no tienen la misma agudeza auditiva que en su adolescencia y, por este motivo, sufren más ante las señales de baja frecuencia.

La principal característica de la baja frecuencia es su carácter de intrusividad. Los trabajos de Lindberg y Backteman (Lindberg & Backteman, 1988) muestran que la baja frecuencia contribuye a:

- Sensación de presión en el oído externo. Efecto similar a conducir un vehículo con la ventana abierta.
- Efectos de enmascaramiento temporal sobre las medias y altas frecuencias que dificulta la conversación. La conversación es una señal fuertemente modulada en amplitud y puede verse afectada por los llamados *patrones de enmascaramiento temporal*.
- Sensación de percepción de vibraciones en algunos enseres de la casa, especialmente en el dormitorio (mesita de noche, lámpara, etc.).

Berglund y Lindvall (Berlung & Lindvall, 1995) añaden otros efectos:

- Deterioro de la calidad de las tareas realizadas.
- Reducción del descanso reparador.
- Interferencia con el sueño, dolor de cabeza, irritabilidad.

La experiencia muestra que el nivel sonoro de un ruido de baja frecuencia no tiene por qué ser elevado para generar molestia. Cuando la fuente de ruido es externa, cerrar las puertas o las ventanas de la sala no mejora la situación, más bien la empeora, enfatizándose más aún la sensación de baja frecuencia en la sala. Algunos trabajos muestran que la molestia del ruido de baja frecuencia disminuye cuando hay energía a frecuencias altas (Krahé, 2010). Con las ventanas abiertas, el ruido exterior de frecuencias altas puede entrar libremente haciendo que la percepción de las bajas frecuencias disminuya.

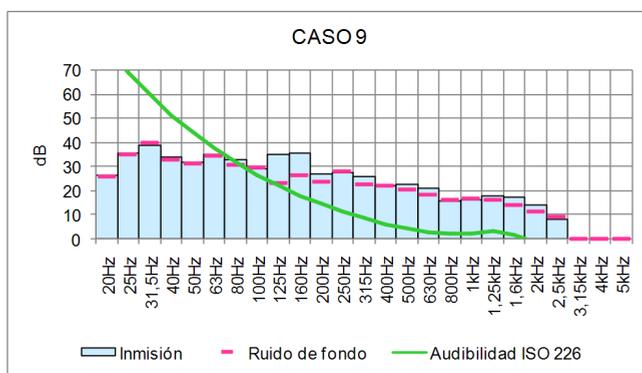
El umbral auditivo empieza estadísticamente a los 20 Hz, aunque pueden darse casos de sensibilidad auditiva por debajo de los 20 Hz. A pesar de que esto se podría considerar en principio como un caso atípico, lo cierto es que es más habitual de lo que parece. La percepción táctil del sonido se encuentra solo a unos 20-25 dB por debajo del umbral

auditivo (Landstrom, Lundstrom, & Bystrom, 1983). La característica del sonido cambia a medida que nos acercamos a los 20 Hz. El sonido pasa de tener tonalidad a ser cada vez más pulsado, es decir, al disminuir la frecuencia va desapareciendo la sensación de tonalidad del sonido. Esta percepción de las pulsaciones es lo que los afectados manifiestan como que «se percibe como una presión en el interior del oído» (Moller & Pedersen, 2004). Este fenómeno se manifiesta con mayor o menor intensidad de una persona a otra.

#### 9.1.3.2.4. Detección de baja frecuencia en casos reales

Se analizan un total de 78 casos. De todos ellos se obtienen el nivel de inmisión y el nivel de ruido de fondo. Se muestran seguidamente algunos de los casos más representativos que evidencian algunas diferencias notables entre los métodos del Real Decreto 1367/2007 y del Decreto 176/2009. Las figuras siguientes muestran, con sombreado azul, el nivel de inmisión por bandas de tercio de octava entre 20 Hz y 20 kHz; con línea escalonada roja, se muestra el nivel de ruido de fondo, y en trazo verde, el criterio de audibilidad de la ISO 226.

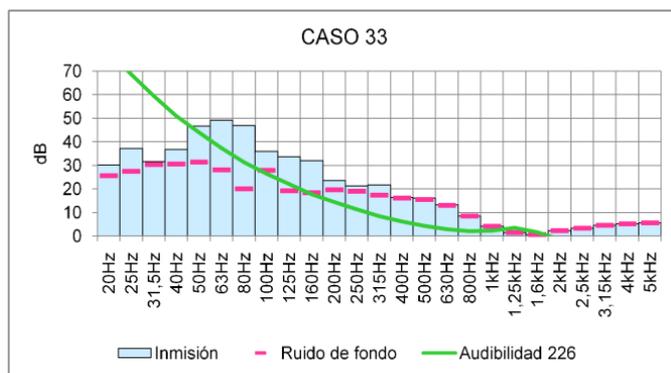
El primer caso que exponemos se muestra en la figura 9.17, donde podemos observar que los niveles de inmisión sonora son iguales al nivel de ruido de fondo para las bandas de 20 Hz a 200 Hz, excepto para las bandas de 125 Hz y 160 Hz. Aplicando los métodos de cálculo, se obtiene que, tanto para el Real Decreto 1367/2007 como para el Decreto 176/2009, no hay componentes de baja frecuencia. Sin embargo, la percepción *in situ* revela una percepción neta del ritmo musical.



**Figura 9.17.** Caso 9, donde los niveles de inmisión y ruido de fondo son muy coincidentes en las bandas de baja frecuencia (de 20 Hz a 200 Hz).

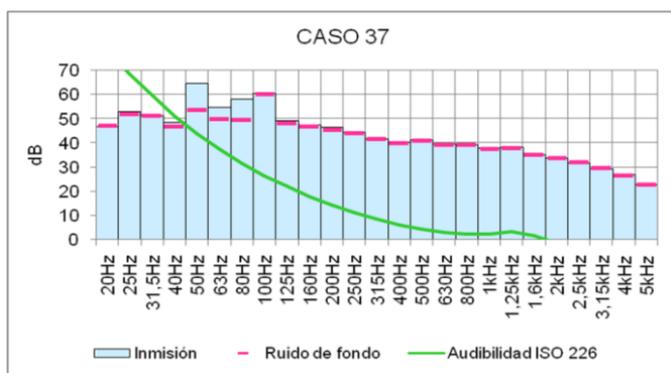
El segundo caso expone una situación opuesta a la anterior y se muestra en la figura 9.18. En esta ocasión, los niveles de inmisión sonora entre los 40 Hz y los 160 Hz son

muy evidentes y destacables. El resto de superaciones en las bandas de 20 Hz, 25 Hz, 200 Hz y 315 Hz se pueden considerar poco significativas. En este caso, la percepción *in situ* de baja frecuencia es fuerte, que coincide con lo calculado por el Real Decreto 1367/2007. Sin embargo el Decreto 176/2009 da un resultado sorprendente: no hay componentes de baja frecuencia. Nótese como, según el criterio de audibilidad, los niveles sonoros en las bandas de 63 Hz a 160 Hz, visibles en la figura 9.18, superan claramente el umbral establecido por la ISO 226.



**Figura 9.18.** Caso 33, donde se destacan claramente componentes de baja frecuencia entre las bandas de 40 Hz y 160 Hz, que son claramente perceptibles.

El tercer ejemplo que se expone corresponde al caso 37. Como se muestra en la figura 9.19, los niveles de inmisión y de ruido de fondo son idénticos en todas las bandas, salvo las bandas de 50 Hz a 80 Hz.

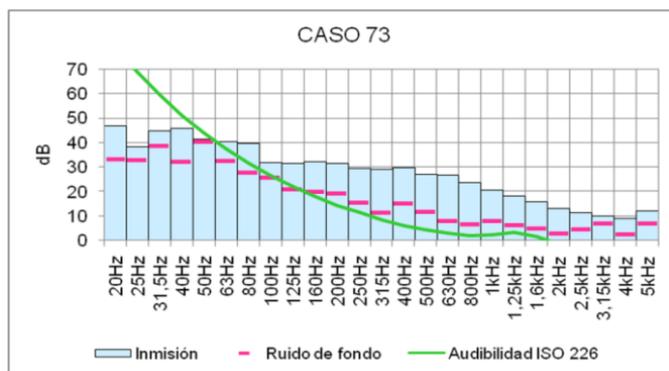


**Figura 9.19.** Caso 37, donde los niveles de inmisión coinciden con los del ruido de fondo salvo en tres bandas (50 Hz a 80 Hz).

La percepción *in situ* en este caso era dudosa, variando entre «sin componentes» o «percepción neta». El cálculo según el Real Decreto 1367/2007 indica que no hay componentes de baja frecuencia. Sin embargo, según el método del Decreto 176/2009, hay componentes de baja frecuencia fuertes. Este caso es especialmente preocupante, puesto que dos métodos que se suponen que son equivalentes presentan resultados contradictorios.

Por último, el cuarto ejemplo corresponde al caso 73. La figura 9.20 muestra que, en las bandas superiores a los 63 Hz, el nivel de inmisión supera al nivel de ruido de fondo. En este caso, la percepción *in situ* de componentes de baja frecuencia era neta. Los cálculos según el Real Decreto 1367/2007 indican que hay presencia fuerte de componentes de baja frecuencia. Los cálculos según el Decreto 176/2009 indican que no hay componentes de baja frecuencia. Estamos, pues, ante un caso similar al anterior, con respuestas antagónicas de los métodos de evaluación.

Los casos expuestos son algunos ejemplos que evidencian que los métodos utilizados en el Real Decreto 1367/2007 y en el Decreto 176/2009 no ofrecen unos resultados acordes con las sensaciones percibidas y, además, dan valoraciones contradictorias.



**Figura 9.20.** Caso 73, donde los niveles de inmisión superan al nivel de ruido de fondo a partir de la banda de 63 Hz.

La tabla 9.9 resume los resultados obtenidos en los 78 casos. Se muestran los resultados de la evaluación según el Real Decreto 1367/2007 comparados con los del Decreto 176/2009. Nótese que los datos utilizados por ambos métodos son exactamente los mismos. La columna «percepción» corresponde a la valoración *in situ* realizada durante las mediciones. Se trata, obviamente, de una valoración subjetiva. Las valoraciones subjetivas más fáciles se corresponden con la ausencia o la percepción fuerte de componentes de baja frecuencia. Sin embargo, la percepción neta no está exenta de dificultad, espe-

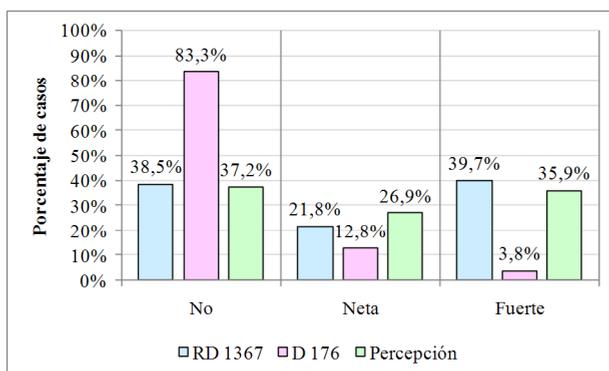
cialmente cuando la sensación está en la frontera de considerar percepción neta o nula, por lo que los resultados podrían variar ligeramente.

Los resultados dejan en evidencia que ambos métodos no son equivalentes. Los resultados obtenidos por ambos métodos son coincidentes en el 42,3% de los casos, pero son distintos en el 28,2% de las muestras analizadas. La parte más negativa quizá sea que la valoración que hacen de la presencia de componentes de baja frecuencia es opuesta y contradictoria en un 29,5% de los casos analizados, lo que puede crear desconcierto y confusión. En la práctica, el resultado opuesto significa que, para los mismos datos y, por tanto, la misma situación acústica, en función de la localización geográfica, se puede penalizar con 6 dB o con 0 dB al nivel de inmisión, lo que puede significar que se supere o no la inspección acústica de una actividad, por ejemplo, situación totalmente injusta.

En cuanto a las valoraciones efectuadas por ambos métodos, se observa como el Real Decreto 1367/2007 presenta un perfil parecido al de la percepción subjetiva *in situ*, mientras que el Decreto 176/1009 presenta un perfil muy distinto, con una desproporción bastante acusada hacia el dictamen negativo. Los resultados mostrados en la figura 9.21 parecen indicar que el Decreto 176/2009 «favorece» aparentemente las valoraciones negativas respecto a la presencia de componentes de baja frecuencia en más del 83% de los casos analizados, mientras que encuentra componentes de baja frecuencia fuertes por debajo del 4% de los casos analizados. Este error está ligado al uso inadecuado de la ISO 226.

**Tabla 9.9.** Resultados de la evaluación de componentes de baja frecuencia según el Real Decreto 1367/2007 y el Decreto 176/2009 para los 78 casos analizados. Se destaca en color rojo las valoraciones opuestas entre el Real Decreto 1367/2007 y el Decreto 176/2009

| Caso | RD1367 | D176  | CBF    | Percepción | Caso | RD1367 | D176  | CBF    | Percepción | Caso | RD1367 | D176   | CBF    | Percepción |
|------|--------|-------|--------|------------|------|--------|-------|--------|------------|------|--------|--------|--------|------------|
| 1    | No     | No    | Fuerte | Fuerte     | 27   | Neta   | No    | Fuerte | Fuerte     | 53   | Neta   | Neta   | No     | No         |
| 2    | No     | No    | No     | No         | 28   | No     | No    | No     | Neta       | 54   | No     | No     | No     | No         |
| 3    | No     | No    | No     | No         | 29   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 55   | Fuerte | No     | Neta   | Neta       |
| 4    | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 30   | No     | No    | No     | No         | 56   | Fuerte | Neta   | Fuerte | Fuerte     |
| 5    | No     | No    | No     | No         | 31   | No     | No    | No     | No         | 57   | No     | No     | No     | No         |
| 6    | Fuerte | No    | Neta   | No         | 32   | Fuerte | No    | Neta   | Neta       | 58   | Neta   | Neta   | Fuerte | Fuerte     |
| 7    | Neta   | No    | No     | No         | 33   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 59   | Neta   | No     | Neta   | Neta       |
| 8    | No     | Neta  | Neta   | No         | 34   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 60   | Neta   | No     | Neta   | Neta       |
| 9    | No     | No    | Neta   | Neta       | 35   | No     | No    | No     | No         | 61   | Fuerte | No     | No     | No         |
| 10   | No     | Neta  | Neta   | Neta       | 36   | No     | No    | No     | No         | 62   | Fuerte | No     | Fuerte | Fuerte     |
| 11   | Fuerte | No    | Neta   | Neta       | 37   | No     | Forta | No     | Neta       | 63   | Fuerte | No     | Neta   | Neta       |
| 12   | Neta   | Neta  | Neta   | Neta       | 38   | No     | No    | Fuerte | No         | 64   | Neta   | No     | Fuerte | Fuerte     |
| 13   | Neta   | No    | Neta   | Neta       | 39   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 65   | No     | Fuerte | Fuerte | Fuerte     |
| 14   | No     | No    | No     | No         | 40   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 66   | No     | No     | No     | No         |
| 15   | Fuerte | Forta | Neta   | Neta       | 41   | No     | No    | Neta   | Neta       | 67   | No     | Neta   | Fuerte | Fuerte     |
| 16   | Fuerte | No    | Neta   | No         | 42   | Neta   | No    | Fuerte | Fuerte     | 68   | Neta   | No     | Neta   | Neta       |
| 17   | No     | Neta  | No     | No         | 43   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 69   | No     | No     | Fuerte | Fuerte     |
| 18   | No     | No    | No     | No         | 44   | No     | No    | Neta   | No         | 70   | Fuerte | No     | Fuerte | Fuerte     |
| 19   | No     | Neta  | No     | No         | 45   | No     | Neta  | No     | No         | 71   | Neta   | No     | Fuerte | Fuerte     |
| 20   | Fuerte | No    | Neta   | Neta       | 46   | Neta   | No    | Fuerte | Fuerte     | 72   | No     | No     | Neta   | Fuerte     |
| 21   | No     | No    | Fuerte | Fuerte     | 47   | No     | No    | No     | No         | 73   | Fuerte | No     | Fuerte | Neta       |
| 22   | No     | No    | No     | No         | 48   | Fuerte | Neta  | Fuerte | Fuerte     | 74   | No     | No     | No     | No         |
| 23   | Neta   | No    | Fuerte | Fuerte     | 49   | Fuerte | Neta  | Fuerte | Fuerte     | 75   | No     | No     | No     | No         |
| 24   | No     | No    | No     | No         | 50   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 76   | Fuerte | No     | Fuerte | Fuerte     |
| 25   | No     | No    | Neta   | Neta       | 51   | Fuerte | Neta  | Fuerte | Fuerte     | 77   | No     | No     | Neta   | Neta       |
| 26   | No     | No    | No     | No         | 52   | Fuerte | No    | Fuerte | Fuerte     | 78   | No     | Neta   | No     | No         |



**Figura 9.21.** Porcentaje comparativo de acierto en las evaluaciones de la presencia de componentes de baja frecuencia, para los métodos del Real Decreto 1367/2007 y del Decreto 176/2009, comparadas con la percepción subjetiva in situ.

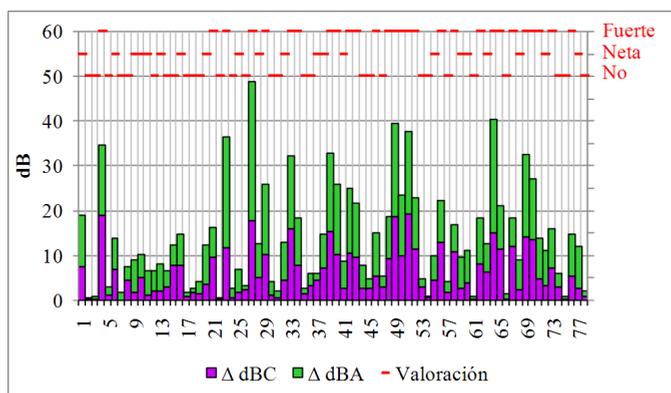
#### 9.1.3.2.5. Método CBF

La resolución del problema en la búsqueda de un indicador más preciso y cercano a las valoraciones subjetivas debe basarse en una visión holística de la situación. En general, se puede afirmar que, cuando se trata de abordar un amplio abanico de casos y situaciones distintas en acústica, las soluciones simples funcionan mucho mejor que las más complejas, siendo estas habitualmente más específicas para resolver un problema muy concreto. En la percepción sonora, desempeñan un papel importante los desniveles sonoros que son fácilmente detectables en determinadas circunstancias.

Por otro lado, la diferencia  $L_{eqC} - L_{eqA}$  se ha experimentado favorablemente durante décadas y, además, resulta fácil de implantar en dispositivos de medida en «tiempo real». Se observa que los incrementos tanto en dBC como en dBA producidos por la inmisión sonora sobre el ruido de fondo o residual pueden ser una estrategia adecuada para valorar el contenido de baja frecuencia.

La figura 9.22 muestra, en la parte superior, los tres niveles de evaluación subjetiva (nula, neta y fuerte) de la baja frecuencia para los 78 casos analizados. Se puede observar como las diferencias entre los incrementos  $\Delta dBC$  y  $\Delta dBA$  están directamente relacionadas con el nivel de componentes de baja frecuencia. Una función entre ambos parámetros podría ser una solución.

Mediante un análisis de regresión lineal, se obtiene un indicador llamado CBF (cálculo de baja frecuencia) basado en los parámetros anteriores,  $\Delta dBC$  y  $\Delta dBA$ , y que minimiza el error en la predicción de la presencia de componentes de baja frecuencia, mediante la expresión 9.1:



**Figura 9.22.** Relación entre los incrementos ΔdBC y ΔdBA de la inmisión sonora y el ruido de fondo o residual respecto a la valoración subjetiva de la presencia de baja frecuencia.

$$CBF = \Delta dBA + \left[ \frac{\Delta dBC}{2,1} \right] \tag{9.1}$$

El escalado se resume en la tabla 9.10.

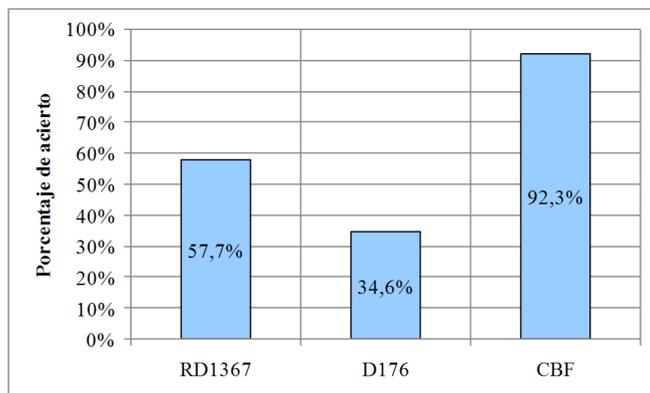
**Tabla 9.10.** Escalado propuesto para la función CBF

| Escala CBF | Puntuación |
|------------|------------|
| <5,5       | No         |
| 5,6 a 11   | Neta       |
| >11        | Fuerte     |

Aplicando el CBF a los 78 casos analizados, se obtienen los resultados que se resumen gráficamente en la figura 9.23, donde se observa que la predicción del CBF supera el 92% de acierto respecto de la percepción *in situ*. El porcentaje se reduce al 57% para el Real Decreto 1367/2007 y al 34% para el Decreto 176/2009.

Nótese que los espectros no desvelan la evolución temporal de la señal sonora. Es bien conocido que el sentido auditivo tiene una facilidad innata para detectar señales con una cadencia rítmica. Esto se debe a que la presencia de esta cadencia muestra un origen «inteligente» de la señal sonora, que, junto con alertar de los peligros, es una de las funciones básicas del sentido auditivo. Su utilidad se remonta a los tiempos de la prehistoria en los que los primeros seres humanos se comunicaban a distancia con señales rítmicas. En la naturaleza no hay señales rítmicas, salvo algún caso muy puntual, como el goteo de la lluvia sobre un objeto. Sin embargo, algunos animales envían señales sonoras rítmicas

para alertar a otros semejantes en la zona de la presencia de depredadores, lo que denota una inteligencia.



**Figura 9.23.** Comparación de los resultados de la valoración de la presencia de componentes de baja frecuencia por el Real Decreto 1367/2007, el Decreto 176/2009 y el método CBF.

#### 9.1.4. Calidad del sonido

Nuestra experiencia de la vida diaria puede sugerir que la percepción auditiva es simple y automática, aunque realmente no lo es. Estamos tan familiarizados con el acto de percibir el sonido de forma natural que lo consideramos como un fenómeno carente de complejidad, dado que no tenemos que hacer nada en particular para escuchar un sonido. Pero la complejidad del proceso surge solo cuando volteamos nuestros talentos perceptivos y tratamos de «explicar» cómo es un sonido.

La percepción del mundo cotidiano es un fenómeno sumamente complejo. Particularmente, el sonido es omnipresente en el mundo perceptivo. Así, esta dimensión sensorial influye en gran medida en la calidad de vida, ya que, aparte de la omnipresencia del sonido, el oído humano no se puede desconectar para evitar la entrada acústica. El oído funciona permanentemente desde antes de nacer.

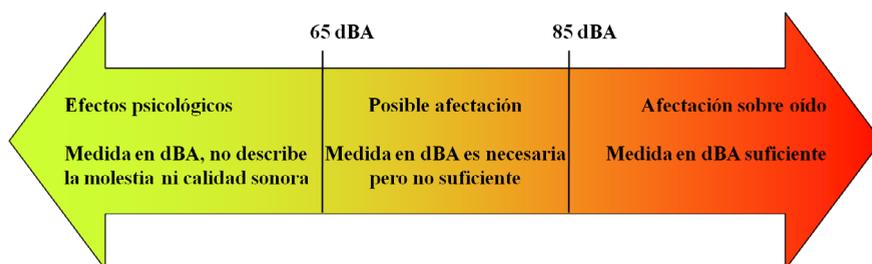
Aunque el sonido puede analizarse y medirse en términos físicos, el análisis completo del sonido depende de los atributos psicoacústicos de la audición humana. Por ejemplo, la valoración de un sonido solo se puede hacer con la ayuda de un enfoque multidimensional, que toma en consideración los aspectos físicos del sonido, su distribución espectral, los parámetros psicoacústicos (sonoridad, contraste, rugosidad, fuerza de fluctuación, etc.), así como la actitud del oyente, el carácter informativo del sonido y los aspectos culturales de la persona. El ruido y la molestia son más sensibles a la subje-

tividad, por lo que los antecedentes sociales y culturales tienen una influencia importante en las actitudes subjetivas de las personas hacia el ruido.

La subjetividad del sonido llega a ser más importante que la energía misma del sonido, porque la molestia no significa elevados niveles de presión que puedan ser peligrosos para la salud auditiva. La evaluación del ruido depende de las características físicas del evento sonoro, de las características psicoacústicas del oído humano, así como de los aspectos psicológicos y sociales del ser humano.

### 9.1.5. Criterios psicoacústicos

La figura 9.24 muestra esquemáticamente que los niveles superiores a 85 dBA tienen suficiente presión para producir efectos fisiológicos sobre el oído y no precisan ni de tecnología binaural ni del uso de los criterios psicoacústicos para valorar su nocividad. Para niveles notablemente inferiores a los 65 dBA, la tecnología binaural y los criterios psicoacústicos constituyen una potente herramienta para obtener resultados claros y precisos que permiten clasificar los sonidos y describir los efectos psicológicos producidos.



**Figura 9.24.** Idoneidad del uso de la ponderación A en función del nivel sonoro.

Entre los 85 dBA y los 65 dBA, puede haber una afectación fisiológica. Para estos niveles sonoros, la ponderación A puede ser adecuada, pero no es suficiente. Los criterios psicoacústicos permiten obtener una valoración más precisa y cercana a las sensaciones sonoras percibidas por las personas. Con estos indicadores, se pueden visualizar ciertos aspectos del sonido que no aparecen con un análisis de la presión sonora. Los criterios psicoacústicos más habituales se describen seguidamente.

#### 9.1.5.1. Sonoridad

*Sonoridad*, en acústica, es el atributo del sonido que determina la intensidad de la sensación auditiva producida. El volumen del sonido como lo perciben los oídos huma-

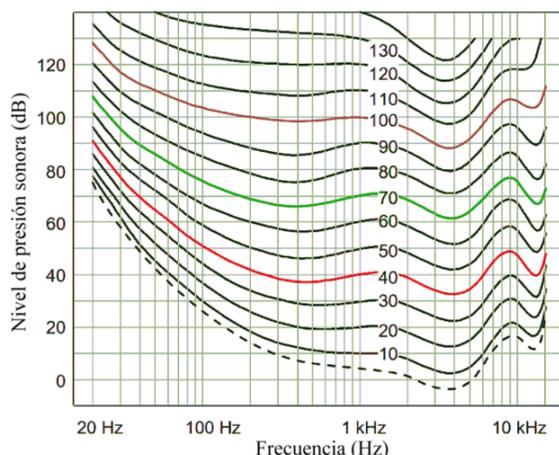
nos es aproximadamente proporcional al logaritmo de la intensidad del sonido. La sonoridad está ligada a la frecuencia del sonido. Como la respuesta en frecuencia del oído no es plana, sucede que hay sonidos con menor nivel que «suenan» más fuerte porque tienen frecuencias más audibles por el oído humano. La sensación auditiva varía con la frecuencia del sonido.

Se ha establecido una unidad de sonoridad llamada *fonio*. El número de fonios de cualquier sonido (su sonoridad) es igual al número de decibelios de un tono puro de 1.000 Hz que el oyente considera de la misma amplitud. La escala de fonios es parcialmente subjetiva en el sentido de que el juicio de un oyente está involucrado en la comparación de cualquier sonido arbitrario con la referencia definida físicamente para establecer su sonoridad en fonios. El resultado promedio de un gran número de personas establece la definición de curvas de igual volumen sonoro (es decir, curvas que muestran las intensidades absolutas variables de un tono puro que tiene el mismo volumen sonoro para el oído en varias frecuencias).

Una tercera escala de sonoridad, más subjetiva, implica el juicio del oyente en cuanto a lo que constituye «duplicar» la sonoridad de un sonido. Se define el sonio como un tono que tiene un volumen de 40 fonios; un tono que el oyente considere «dos veces más fuerte» tendría un volumen de dos sonios, tres veces más fuerte sería tres sonios, y así sucesivamente. Como en el caso de la definición de fonio, los valores medios de las observaciones de un gran número de personas definirían los detalles de la escala para clasificar y medir los niveles de sonido. La figura 9.25 muestra las curvas de igual sonoridad, desde el umbral auditivo hasta el máximo nivel admisible por el oído.

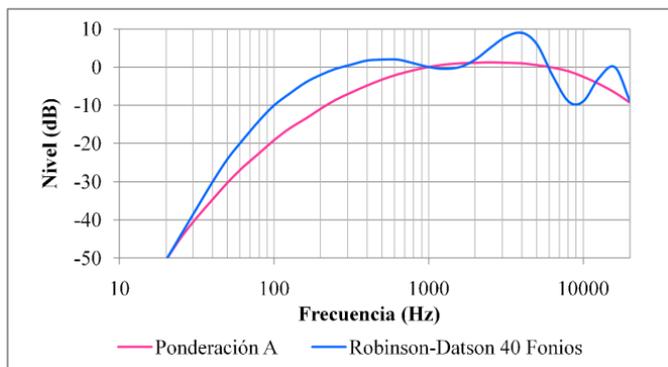
La línea de trazos discontinuos representa el umbral auditivo. Cada curva lleva una etiqueta indicando su nivel de sonoridad y que, a la frecuencia de 1 kHz, coincide con el nivel de presión acústica. Si nos situamos sobre una curva cualquiera, por ejemplo la de 60 fonios, y nos desplazamos sobre ella, iremos viendo el nivel sonoro que tenemos que recibir a distintas frecuencias para obtener la misma sensación de sonoridad. Así pues, a 100 Hz tenemos que recibir un nivel de 67 dB, y a 4 kHz tenemos que recibir un nivel de 52 dB, para que tengan la misma sonoridad que los 60 dB a 1 kHz. Con colores rojo, verde y marrón se marcan las curvas de igual sonoridad que se corresponden con las ponderaciones A, B y C, respectivamente.

La curva correspondiente a 40 fonios debería coincidir con la curva de ponderación A; la curva de 70 fonios, con la ponderación B, y la de 100 fonios, con la ponderación C, según normativas IEC 60651. La primera curva de ponderación A fue diseñada por Leo Beranek con un filtro electrónico basado en una red de componentes pasivos en la década de los años cuarenta, y es sorprendente que hoy en día se siga utilizando esta aproximación.



**Figura 9.25.** Curvas de igual sonoridad obtenidas con tonos puros por Robinson-Datson, en 1956, con audición diótica.

Su forma no se ajustaba a las curvas de igual sonoridad de Fletcher-Munson (1933), pero, con la tecnología disponible en ese momento, era la mejor solución. La ponderación B desapareció en la reciente IEC 61672, probablemente por su bajo uso. La figura 9.26 muestra la comparación entre la curva de ponderación A y la curva de igual sonoridad de 40 fonios según Robinson-Datson (1956).

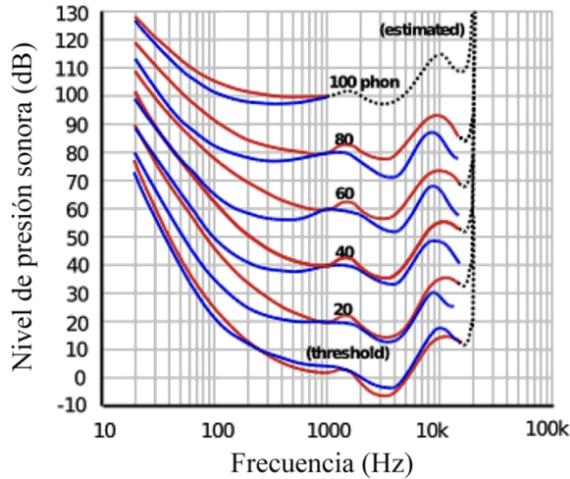


**Figura 9.26.** Semejanza entre la curva de sonoridad de 40 fonios y la curva de ponderación A.

Los trabajos de Robinson-Dadson generaron división de opiniones en su momento, ya que se apreciaban diferencias notables con las de Flecher-Munson (1933). Las diferencias entre ambos trabajos se atribuyeron durante décadas a la diferencia en la presen-

tación de los tonos. Mientras que Robinson-Datson utilizó altavoces, Flecher-Munson utilizó auriculares.

En 2003 se revisaron las curvas de igual sonoridad con nuevos datos más actuales, en los que contribuyeron diversos investigadores de Japón, Alemania, Reino Unido, Dinamarca y Estados Unidos. Por último, se publicó la ISO 226, referente a las curvas de igual sonoridad, que se muestran en la figura 9.27. Para calcular la sonoridad, se pueden aplicar los métodos normalizados con los estándares ISO 532A e ISO 532B.



**Figura 9.27.** Semejanza entre las curvas de igual sonoridad propuestas por Robinson-Datson (azul) y la ISO 226:2003 (rojo).

El método A, o método de Stevens, parte del espectro de la señal ya sea en octavas, media octava o en tercios de octava. Para cada banda  $N$ , se determina un índice de sonoridad tomando el máximo nivel  $N_{\text{máx}}$  en esa banda. La sonoridad total se expresa con la ecuación 9.2.

$$N_T = (1 - F)N_{\text{máx}} + F \Sigma N \quad (9.2)$$

Donde  $F$  es un coeficiente que depende de la resolución espectral: 0,3 para octava, 0,2 para media octava y 0,15 para tercio de octava. Este método solo es aplicable en campo difuso.

El método B, o método de Zwicker, utiliza la división de frecuencias en bandas críticas Bark, que no son de tercio de octava. En total, hay 24 bandas y se hace un proceso de conversión de tercio de octava a Bark, tal como se define en la ISO 532 B, con la ecuación 9.3.

$$N = \int_0^{24} N(z) dz \tag{9.3}$$

$N(z)$  son los elementos sonoros de la banda  $z$ . Para cada banda, se tiene en cuenta el efecto enmascarador de las bandas inferiores sobre las bandas superiores. Mediante una plantilla como la mostrada en la figura 9.28, se dibuja el perfil del nivel de la señal en función de las bandas Bark.

Posteriormente, se calcula el área bajo esta curva para determinar su sonoridad. Cuando hay un desnivel entre la banda inferior con la superior, se produce el efecto de enmascaramiento en forma de pendiente, siguiendo las líneas de trazo discontinuo.

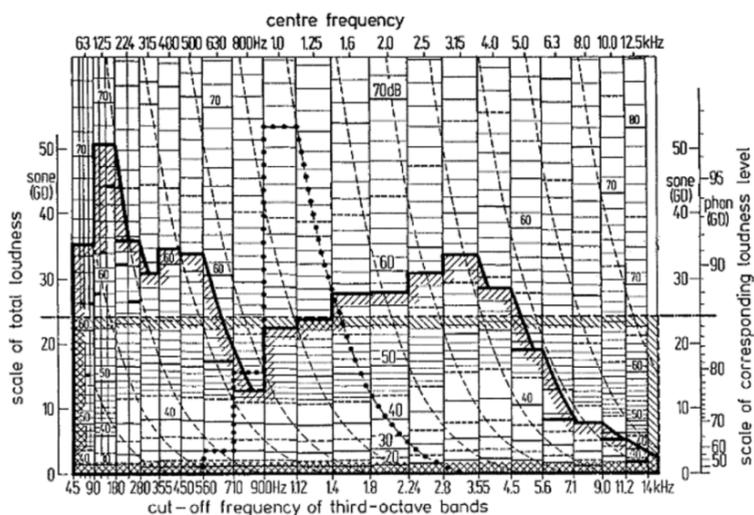


Figura 9.28. Cálculo de sonoridad con el método de Zwicker. ISO 532B.

La conversión de fonios a sonios se puede hacer fácilmente mediante la gráfica de la figura 9.29. El punto rojo indica la referencia 40 fonios = 1 sonio. A partir de este punto, un incremento de 10 fonios supone duplicar el número de sonios. Por debajo del punto rojo, no se cumple esta ley y la relación no se mantiene.

### 9.1.5.2. Altura tonal

La altura tonal, o *pitch*, es el atributo de la sensación auditiva, en términos en que los sonidos pueden ser ordenados en una escala que se extiende de bajo a alto. El intervalo de frecuencias audible va de 20 Hz a 20 kHz para un oído sano. Las frecuencias inferiores a los 20 Hz pueden ser percibidas como pulsaciones que por vía corporal llegan al oído medio, haciendo que los registros musicales más bajos se puedan «percibir». Las

frecuencias más altas de 20 kHz no son perceptibles por el oído humano. La altura tonal asociada con un sonido abarca frecuencias de 30 Hz a 5 kHz aproximadamente.

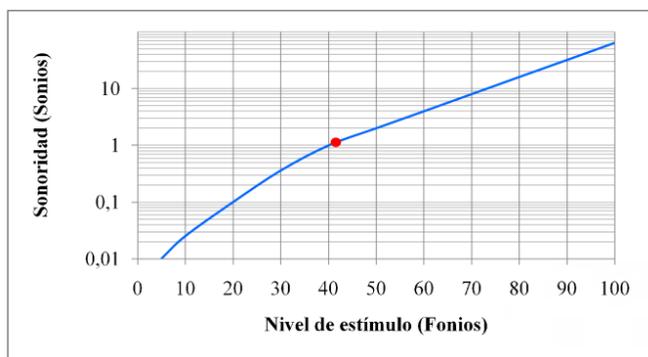


Figura 9.29. Conversión de fonios a sonios.

La mayoría de instrumentos musicales naturales coincide con este margen de frecuencia. La sensación de la altura tonal está directamente relacionada con el punto de excitación en la membrana basilar. Esta teoría fue propuesta por Ohm (1843), después fue desarrollada por Helmholtz (1862) y, por último, demostrada experimentalmente por Békésy (1950). La tonalidad de un sonido se extiende en 6 octavas y abarca desde los 60 Hz hasta los 3.800 Hz, aproximadamente. Dentro de este margen se encuentra la fundamental de los instrumentos naturales, como se muestra con trazo negro en la figura 9.30.

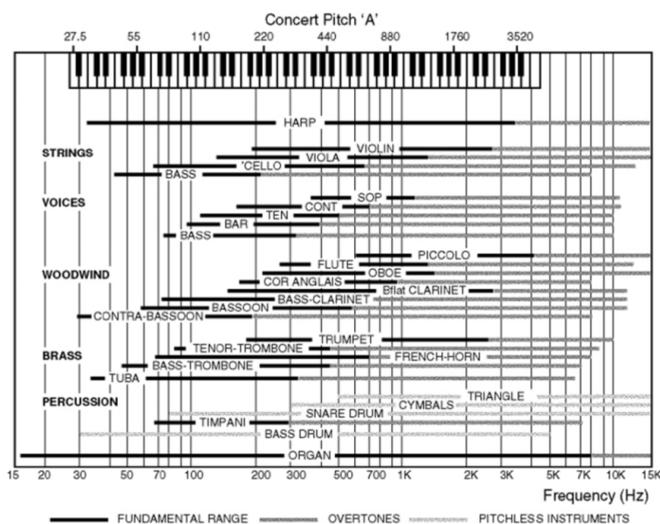
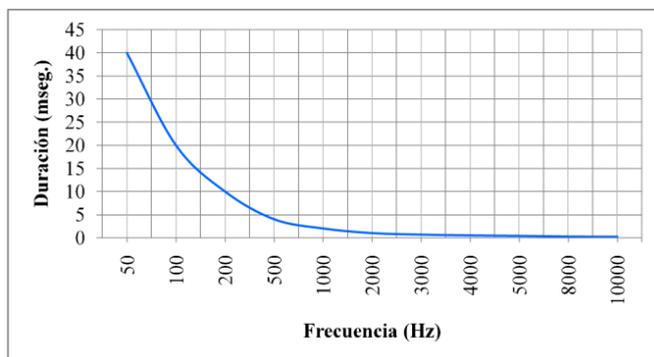


Figura 9.30. Margen de tonalidad de distintos instrumentos naturales.

Las componentes espectrales de tonos complejos con frecuencias superiores a 11.000 Hz suelen representar las porciones «ruidosas» de los sonidos musicales (raspaduras de arco, ataques de lengüeta, golpes de martillo, etc.) y tienen un significado tímbrico que afecta al espectro radiado (color de tono). Los instrumentos naturales radian poca energía más allá de los 10 kHz, mientras que los electrónicos pueden superar sin problema estas frecuencias.

Las señales muy breves en tiempo, entre 10 y 60 ms (dependiendo de la intensidad y la frecuencia o cadencia de repetición), no producen sensación de altura tonal. Digamos que el sentido auditivo no tiene suficiente información para agrupar las células ciliadas e identificar la frecuencia del sonido. Hay una duración mínima en función de la frecuencia que se muestra en la figura 9.31. En ella, se puede comprobar que las bajas frecuencias necesitan más tiempo debido a que los períodos de la señal son más largos.



**Figura 9.31.** Duración mínima de un evento sonoro, para que tenga tonalidad, en función de la frecuencia.

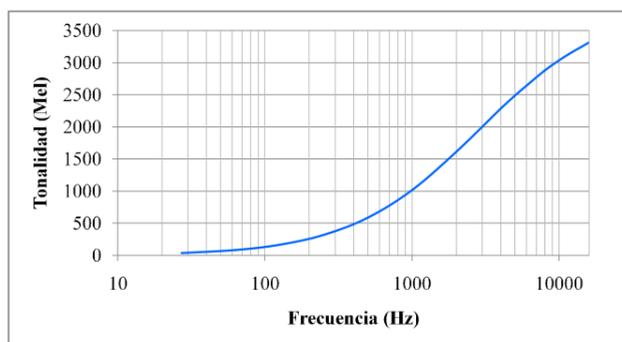
Para señales tonales complejas, la detección de la altura tonal depende del contenido espectral. Para tonos complejos periódicos con espectros armónicos (es decir, componentes espectrales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia del componente más bajo, llamado «fundamental»), el tono coincide, en general, con la frecuencia de la componente fundamental, independientemente de si esta componente es perceptible (es decir, incluso cuando tiene un nivel demasiado bajo o está enmascarado o si no está físicamente presente en el espectro de tonos).

En general, el fenómeno del tono virtual (no hay fundamental) no puede explicarse por las teorías de lugar (tonotópicas, Békésy) de la percepción del tono. Esto conduce a que el tono no solo depende de la frecuencia, intensidad y duración, sino también en la distribución espectral.

Nótese que varias desviaciones menores de los espectros armónicos (hasta ~1-2<sup>o</sup> de la frecuencia) y la forma en que interactúan cuando varios instrumentos se ejecutan juntos al unísono cambian el timbre del sonido, lo que da como resultado lo que se conoce como el «efecto chorus», que es la riqueza del sonido de conjunto, debido a ritmos de batidos lentos y variables entre los componentes ligeramente desafinados de los tonos complejos involucrados.

La percepción de la altura tonal en los sonidos de los instrumentos musicales es deseable, puesto que estos emiten tonos. Sin embargo, en otros sonidos de origen no musical la presencia de estas componentes se considera molesta o negativa. Por ejemplo, un sistema de climatización genera estas componentes tonales a través del ventilador, que deben ser convenientemente eliminadas para evitar molestias innecesarias.

Para tonos puros, la relación entre *tonalidad* y frecuencia se muestra en la figura 9.32. Esta gráfica muestra la finura en la detección de cambios de frecuencia del sentido auditivo y tiene dos partes.



**Figura 9.32.** Relación entre frecuencia y tonalidad (Stevens-Volkmann, 1940).

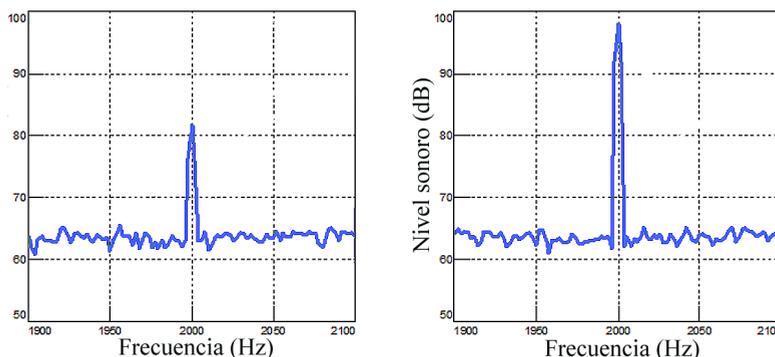
Para frecuencias inferiores a 1.000 Hz, se pueden distinguir cambios de 2 a 4 Hz en la tonalidad. Sin embargo, a partir de 1 kHz el sentido auditivo pierde esta selectividad. Por ejemplo, a 3 kHz se necesita un cambio de 18 Hz para distinguir cambio tonal, y a 10 kHz se distinguen cambios de tonalidad con incrementos de 90 Hz. Este comportamiento encaja bien con el filtrado de tercio de octava, que es el filtro más utilizado en análisis espectral del sonido.

### 9.1.5.3. Tonalidad

La tonalidad de un sonido permite describir si este presenta un contenido de componentes tonales que pueden resultar molestas para la percepción humana. En el cálculo de la tonalidad de un sonido, generalmente se compara la presencia de componentes tonales respecto del ruido de fondo, que se supone que no tiene dichas componentes. Las métricas más usadas actualmente son:

- Método Terhardt. El método «clásico» para valorar la tonalidad es el método basado en un trabajo publicado en 1982 por Terhardt. El método describe un procedimiento para la extracción automática de las diversas componentes tonales que pueden ser producidas simultáneamente por estímulos tonales complejos.
- Método DIN 45681. Este método requiere de una gran resolución en frecuencia, lo que produce una baja resolución temporal. Señales de corta duración o con cambios en la frecuencia radiada pueden no ser evaluados correctamente. Algunos estudios demostraron que el método utilizado en la DIN 45681 no solo detecta componentes tonales que pueden percibirse subjetivamente, sino también componentes tonales que no se destacan claramente del espectro de ruido ni pueden percibirse subjetivamente. Los estudios confirman que la determinación del ajuste de tono basado en datos de medición objetiva según DIN 45681 no puede reemplazar la impresión auditiva subjetiva. Establecer un ajuste de tono según DIN 45681 solo se justifica cuando el componente tonal o los componentes tonales se pueden percibir subjetivamente de manera inequívoca.
- La relación tono-ruido (TNR) y la relación de prominencia (PR). Ofrecen unas posibilidades mejoradas para la detección de componentes tonales en un sonido.

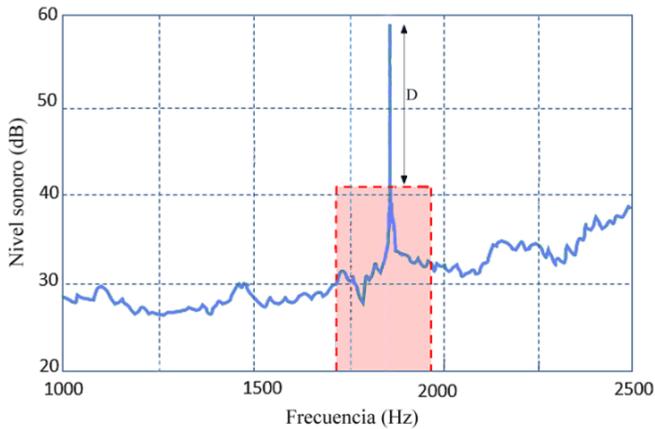
La detección de una componente tonal no es una tarea sencilla y requiere de un escalado, puesto que hay señales con presencia de componentes tonales y, sin embargo, no son perceptibles. La percepción de estas componentes depende en gran medida del espectro sonoro que se está percibiendo. Los fenómenos de enmascaramiento tienen una relevancia notable en estos fenómenos, por lo que hay que tenerlos muy en cuenta. La figura 9.33 muestra una señal de banda ancha, con una componente tonal, con *zoom* entre 1900 Hz y 2100 Hz. Visualmente, la componente se aprecia perfectamente en ambos casos. Sin embargo, en el caso de la izquierda, el tono no es perceptible. La detección de componentes tonales debe valorar las componentes que son prominentes o que destacan suficientemente.



**Figura 9.33.** Izquierda: componente tonal visible, pero no audible.  
Derecha: componente tonal visible y audible.

9.1.5.3.1. Relación tono-ruido

La relación tono-ruido (TNR) se establece entre la componente tonal y la señal presente en la banda crítica donde se encuentra el tono. La figura 9.34 muestra gráficamente el concepto. En color azul, se muestra el espectro en banda fina entre 1 kHz y 2,5 kHz, donde se encuentra un tono de frecuencia 1,85 kHz. La banda crítica donde se encuentra el tono está representada con sombreado de color rosa. El área del rectángulo discontinuo en rojo muestra la energía en esta banda incluido el tono. La distancia entre el pico del tono y la altura de la banda crítica es el TNR.



**Figura 9.34.** Concepto relación tono-ruido. El tono es claramente audible si tiene una amplitud que supera al de la banda crítica en más 8 dB.

En función de la naturaleza enmascarante de la señal que rodea al tono, es posible que el tono se pueda percibir con niveles ligeramente inferiores. Con señales de ruido rosa, como en el ejemplo, es posible distinguir ligeramente el tono a partir de los 7 dB aproximadamente. El cálculo numérico se hace mediante la ecuación 9.4.

$$TNR = 10 \cdot \log\left(\frac{W_t}{W_n}\right) \quad (9.4)$$

Donde:

$W_t$  es la potencia del tono analizado.

$W_n$  es la potencia del resto de componentes de la banca crítica seleccionada.

Para que el tono sea audible, el TNR debe ser mayor de 8 dB para frecuencias superiores a 1 kHz. Para frecuencias inferiores, la diferencia debe ser mayor.

### 9.1.5.3.2. Tono emergente

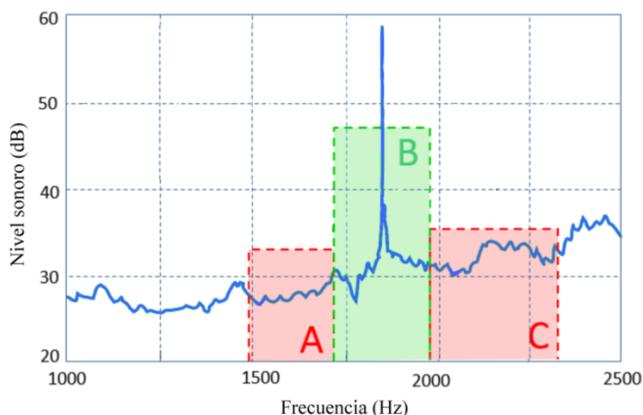
El método del tono emergente (PR) es muy parecido al anterior, pero, en lugar de utilizar únicamente la banda crítica donde se encuentra el tono, se consideran también las dos bandas adyacentes a este, como muestra la figura 9.35. El rectángulo verde B contiene a la componente tonal, mientras que los rectángulos A y C son las dos bandas críticas adyacentes. El cálculo numérico se hace mediante la ecuación 9.5.

$$PR = 10 \cdot \log \left[ \frac{W_M}{(W_L + W_U) \cdot 0,5} \right] \quad (9.5)$$

Donde:

$W_M$  es la potencia de la banda crítica que contiene al tono.

$W_L$  y  $W_U$  son las potencias de las bandas críticas adyacentes.



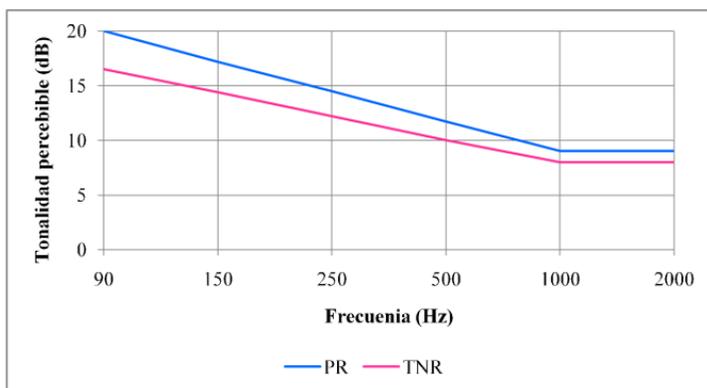
**Figura 9.35.** Cálculo del tono emergente.

Para tonos superiores a 1 kHz, el PR debe superar los 9 dB para considerarse audible. La figura 9.36 muestra el incremento en el umbral de detección de la tonalidad para frecuencias inferiores a 1 kHz. Los métodos mostrados TNR y PR están estandarizados en la norma ISO 7779.

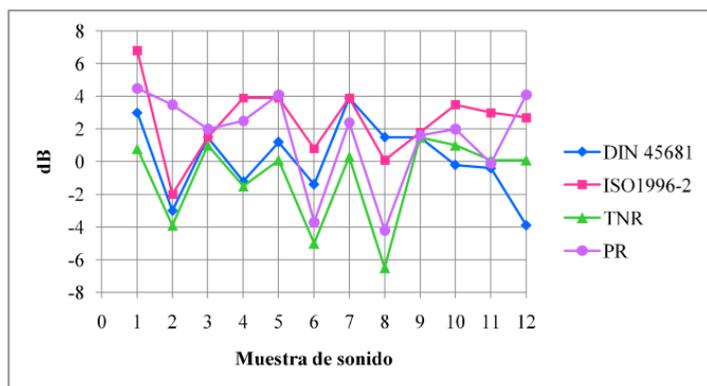
### 9.1.5.3.3. Comparación en la detección de componentes tonales

Este estudio, que analiza 70 sonidos distintos y aplica los procedimientos de cálculo según las normas ISO 1996-2, DIN 45681 y la ISO 7779 (TNR y PR), evalúa la bondad en la detección de componentes tonales de los distintos métodos mostrados. Se usaron muestras de sonidos naturales y de maquinaria. Se hicieron diferentes series de test con

las muestras de sonido, pero solo una tuvo una notable participación con 12 muestras de sonido analizadas. Los resultados, que indican la diferencia entre el cálculo y la valoración subjetiva del desnivel entre la componente tonal y la banda crítica para las 12 muestras de sonido, se resumen gráficamente en la figura 9.37.



**Figura 9.36.** Incremento del umbral de detección tonal para las bajas frecuencias.



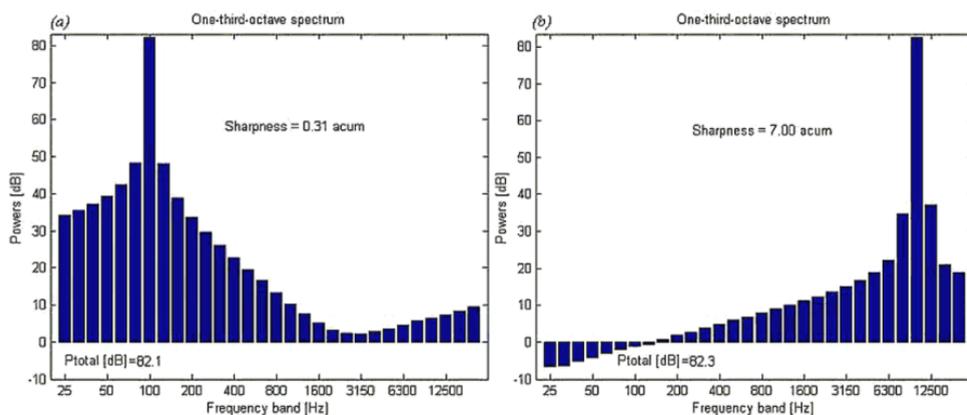
**Figura 9.37.** Resultados en la desviación de distintos métodos para valorar la tonalidad de un sonido respecto a la valoración subjetiva.

Los resultados indican que la ISO 1996-2 y la DIN 45681 presentan unos resultados muy similares. Cabe destacar que el método TNR no consigue detectar componentes tonales en el 40% de los casos analizados, mientras que el resto sí (Schmidt & Sagemuehl, 2008).

#### 9.1.5.4. Agudeza

La agudeza (*sharpness*), o nitidez del sonido, está relacionada con la cantidad de espectro de la señal en el extremo superior (alta frecuencia). A mayor contenido de alta frecuencia, mayor agudeza sonora. Se calcula como una suma ponderada particular de los niveles de sonoridad específicos en varias bandas, generalmente bandas de 1/3 de octava. Esta función de ponderación aumenta rápidamente hacia las bandas de frecuencia más elevadas. Se expresa en acum.

La figura 9.38 muestra un ejemplo para un tono de 100 Hz y otro de 10 kHz de la misma amplitud. El primero tiene una agudeza de 0,321 acums y el segundo de 7,0 acums. El segundo sonido tiene mayor agudeza y, por tanto, se considera más molesto.



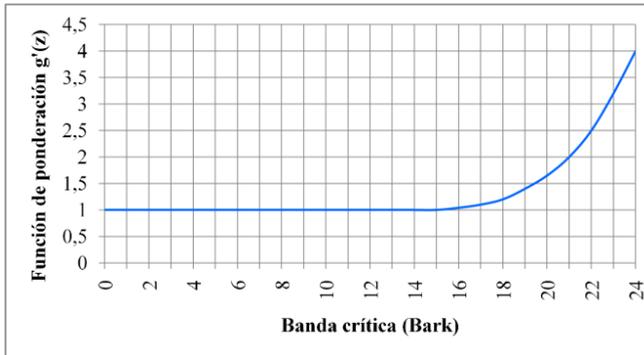
**Figura 9.38.** Ejemplo de agudeza de un tono de 100 Hz y otro de 10 kHz.

Zwicker y Fastl definieron un sonido de nitidez 1 acum como un ruido de banda estrecha con un ancho igual a una banda crítica, a una frecuencia central de 1 kHz con un nivel de 60 dB. Sin embargo, la nitidez es una métrica que aún no se ha estandarizado.

En consecuencia, existen varios métodos para calcular este indicador, entre ellos: el método de Von Bismarck (1974), que introduce la idea de un cálculo ponderado del primer momento; el método de Aures (1985), que es una versión modificada de la ecuación de Von Bismarck, y el método de Zwicker-Fastl (1990), que es una versión de la ecuación de Von Bismarck con una curva de ponderación modificada. Los métodos dan resultados muy distintos. La figura 9.39 muestra la curva de ponderación que realza las bandas críticas altas para el método de Zwicker.

La ponderación  $g(z)$  actúa para las bandas críticas 15 hasta 24, es decir, de 2.500 Hz a 13.500 Hz aproximadamente. La agudeza sonora es la energía evaluada a partir de la

sonoridad en las 24 bandas críticas ponderadas por la función  $g(z)$  de la figura 9.39. La ecuación 9.6 expresa esta función, calculada por el método de Zwicker, que, al ser el más reciente, goza de mayor predilección en los métodos de cálculo.



**Figura 9.39.** Ponderación  $g(z)$  para el cálculo de la agudeza (Zwicker, 1990).

$$S = 0,11 \frac{\int_0^{24} N'(z) \cdot g(z) \cdot dz}{N} \quad (9.6)$$

Donde:

$N$  es la sonoridad total.

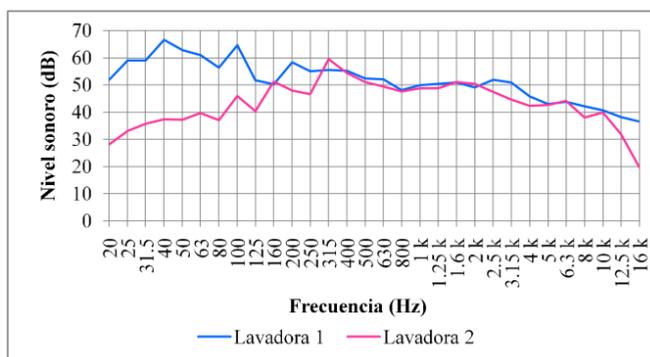
$N'(z)$  es la sonoridad de banda crítica  $z$ .

$g(z)$  es la ponderación de Zwicker (v. figura 9.39).

#### 9.1.5.4.1. Aplicación de la agudeza a la calidad sonora de lavadoras

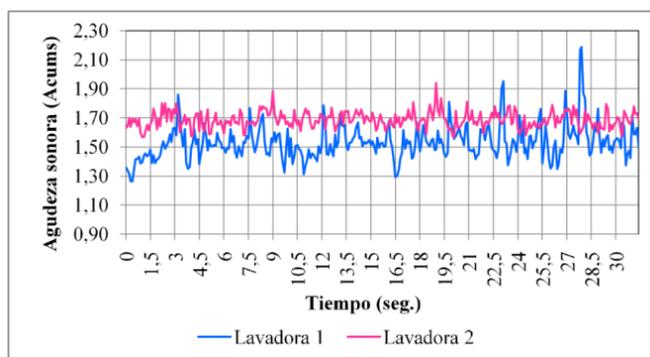
Ilustramos el concepto de agudeza sonora con el sonido procedente de dos lavadoras en perfecto estado de funcionamiento. Ambas tienen más de 4 años de antigüedad y son de dos marcas distintas, con diferentes calidades y prestaciones. La lavadora 1 es una máquina de calidad media-alta. La lavadora 2 es una máquina de calidad media-baja. La medición del nivel sonoro se hace a 1 m de distancia frente a la lavadora en el ciclo de lavado. La cantidad de ropa fue la misma en ambos casos y el programa seleccionado era equivalente.

Aunque el entorno no era exactamente el mismo, se considera similar. En ambos casos, las lavadoras estaban en la cocina. Los resultados se resumen seguidamente. En la figura 9.40 se muestra el espectro sonoro del ciclo de lavado para cada lavadora.



**Figura 9.40.** Espectro en tercio de octava del ciclo de lavado de dos lavadoras de distinta calidad.

Se puede observar que el nivel global es muy similar para ambas lavadoras. Concretamente, la lavadora 1 genera un nivel de 61,8 dBA, mientras que la lavadora 2 es de 60,5 dBA. La agudeza global del ciclo de lavado para la lavadora 1 fue de 1,53 acums, mientras que para la lavadora 2 fue de 1,69 acums. La evolución temporal de la agudeza se muestra en la figura 9.41, donde se observa que se mantiene estable salvo las fluctuaciones aleatorias que produce la ropa durante el ciclo de lavado.



**Figura 9.41.** Evolución temporal de la agudeza sonora para dos lavadoras durante el ciclo de lavado.

El ejemplo anterior muestra que la lavadora 2, a pesar de tener menos nivel sonoro, presenta una agudeza superior, que implica un sonido más estridente y, por tanto, resulta más molesto en comparación con la lavadora 1, que ofrece un sonido con un contenido de baja frecuencia superior, que «ayuda» a que el sentido se interprete como más suave y, por tanto, más aceptable.

#### 9.1.5.5. Rugosidad

La rugosidad (*roughness*) es un efecto complejo que cuantifica la percepción subjetiva de la modulación en amplitud entre 20 y 300 Hz de un sonido. La unidad de medida es el asper. Un asper se define como la rugosidad producida por un tono de 1.000 Hz de 60 dB que es 100% modulado en amplitud a 70 Hz. Para un tono con una frecuencia de 1.000 Hz o superior, la rugosidad máxima de un tono se produce para una frecuencia de modulación de 70 Hz. Se comprueba que la rugosidad máxima se encuentra en frecuencias de modulación cada vez más bajas cuando la frecuencia de la portadora está por debajo de 1.000 Hz. Se estima que el nivel de diferencia apenas perceptible en la rugosidad es del 17%. La rugosidad se utiliza para cuantificar parcialmente la calidad del sonido en una serie de aplicaciones, incluido el ruido del motor de un automóvil y en algunos electrodomésticos de línea blanca y marrón.

La impresión de rugosidad ocurre siempre que existe una envolvente variable en el tiempo dentro de una banda crítica; por ejemplo, cuando los tonos exhiben una estructura temporal debido a una variación de su amplitud o frecuencia. Si estas variaciones ocurren muy lentamente (por debajo de 10 Hz), el oído humano es capaz de detectar los cambios, lo que da como resultado la impresión de una pulsación o latido. A medida que aumenta la frecuencia de la variación, se perciben otras sensaciones sonoras, como la «rugosidad» (alrededor de 20 Hz), que luego se transforma en la impresión de rugosidad real, donde el oído ya no es capaz de seguir los cambios temporales individuales. Los sonidos con variaciones de envolvente entre 20 y 300 Hz se perciben como toscos. Por encima de estas frecuencias, la línea espectral principal y las bandas laterales de los tonos modulados en amplitud pura se vuelven audibles como tonos individuales. La rugosidad depende de la frecuencia central, la frecuencia de modulación y la profundidad de modulación. El nivel de la señal solo tiene una pequeña influencia en la impresión de rugosidad.

Al aumentar la profundidad de modulación, la sensación de rugosidad se vuelve más fuerte. La dependencia de la frecuencia de modulación tiene una característica de pasa banda, es decir, la impresión de rugosidad disminuye fuertemente hacia frecuencias de modulación muy bajas o altas. Para frecuencias portadoras más bajas, el máximo se desplaza hacia frecuencias de modulación más bajas. La aspereza no solo se debe a los tonos modulados en amplitud, sino también a la modulación de frecuencia y al ruido modulado en amplitud. Básicamente, una impresión de rugosidad también puede ser causada por dos componentes tonales que ocurren dentro de un ancho de banda crítico de la audición humana. En ingeniería de telecomunicaciones, esto se conoce como «modulación de amplitud sin portadora».

##### 9.1.5.5.1. Aplicación al vuelo de drones

La proliferación de drones con fines comerciales va en aumento en nuestra sociedad. Estas máquinas ofrecen una estabilidad de vuelo que los hace especialmente atrac-

tivos para realizar vuelos de seguimiento y supervisión aérea. Se comenta que su uso para el reparto de mercancías puerta a puerta se podría generalizar en un futuro próximo. Aunque inicialmente su origen fue militar, la evolución de la tecnología, especialmente en las prestaciones de los giróscopos electrónicos, permiten diseñar máquinas de formato micro y mini, de uso civil. Sin embargo, hay diversos aspectos que se deben tener en cuenta. El primero es la seguridad que ofrece un dispositivo volando a escasos metros de zonas habitadas y el segundo es el ruido que generan estos dispositivos, que han puesto en alerta a las asociaciones en la lucha contra el ruido en todo el mundo.

El reglamento 2019/945 de la Unión Europea establece los requerimientos de los sistemas de aeronaves no tripuladas (SANT). El punto 13 del reglamento establece los métodos de medición del ruido aéreo que se utilizarán para la determinación de los niveles de potencia sonora ponderados A de las clases 1, 2 y 3. La clase 0 es para una masa máxima en despegue (MMD) inferior a los 250 g, con una velocidad máxima en vuelo horizontal de 19 m/s y una altura máxima limitada a los 120 m. La clase 1 es igual que la clase 0, pero con una MMD inferior a los 900 g. La clase 2 es igual a las anteriores, pero con una MMD inferior a 4 kg y sin límite de velocidad. La clase 3 es igual a clase 2, pero con una MMD inferior a 25 kg.

Para determinar la potencia acústica se aplica la norma EN ISO 3744:2011. En ella se establecen las normas básicas de emisión sonora y el código de ensayo detallado para la medición de los niveles de presión acústica sobre una superficie de medición que envuelve a la fuente y para el cálculo del nivel de potencia sonora emitido por esa fuente. El dron debe operar en vuelo estacionario, a 0,5 m sobre un plano reflectante. Los niveles de potencia máxima permitidos (dBA) se muestran en la tabla 9.11.

**Tabla 9.11.** Niveles máximos de potencia radiados por un dron, según el reglamento 2019/945 de la Unión Europea

| Clase de Dron | MMD (gramos)            | Entrada en vigor          | A los 2 años entrada en vigor | A los 4 años entrada en vigor |
|---------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| C1            | $250 \leq m \leq 900$   | 85                        | 83                            | 81                            |
| C2            | $900 \leq m \leq 4.000$ | $85 + 18,5 * \log(m/900)$ | $83 + 18,5 * \log(m/900)$     | $81 + 18,5 * \log(m/900)$     |

#### 9.1.5.5.2. Ejemplo: valoración del grado de molestia de drones comerciales

Como se ha mostrado en el apartado anterior, solo los modelos con una MMD superior a 250 g tienen limitada su potencia acústica. Esto cubre a los drones de tipo comercial y uso profesional, que en principio pueden ser los que en un futuro aparezcan en nuestras ciudades. No obstante, la potencia acústica no dice nada sobre la sensación sonora que estos sonidos producen sobre las personas. El origen del ruido de los drones se encuentra en la interacción entre las palas y el aire. Los drones llevan motores eléctricos

que son muy silenciosos, por lo que el ruido del motor es despreciable respecto al emitido por las palas. Los criterios psicoacústicos pueden ayudar a valorar mejor la sensación que produce el sonido de un dron. Ponemos un ejemplo de aplicación del concepto de rugosidad, con el ruido producido por tres drones de clase 0 en vuelo estacionario (*hover*).

Los equipos son similares, todos tienen cuatro hélices, dos de ellos bipala y el tercero tripala, con distinto diseño de perfil de palas, soportes, etc. Destacamos que el DR1 es de altas prestaciones. La figura 9.42 muestra los tres modelos analizados.



Figura 9.42. De izquierda a derecha: Air Hogs DR1, Syma X5SW y Falcon.

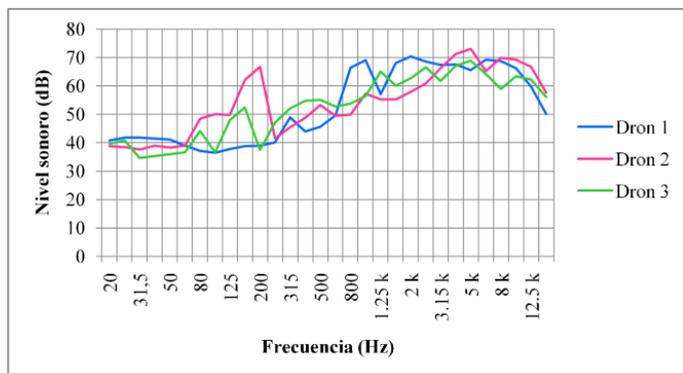
Se muestran los espectros de señal de cada dron analizado en la figura 9.43. Como se puede apreciar, la energía radiada se centra entre 630 Hz y 12,5 kHz, aproximadamente. El dron 2 destaca por su ruido de pala en la banda de 200 Hz debido a un diseño aerodinámico poco optimizado. De los tres drones, el dron 1, usado en competición, presenta un pico a mayor frecuencia, sobre los 800 Hz, debido a que este modelo tiene tres palas en cada hélice. Los cuatro drones tienen cada uno cuatro motores con palas de perfil simétrico y agrupadas de dos en dos (*dextrógiro* y *levógiro*) para compensar la rotación sobre su eje.

Nótese que el nivel  $L_{eq}$  en dBA es prácticamente el mismo: para el dron 1 es de 78,9 dBA, para el dron 2 es de 78,3 dBA y para el dron 3 es de 75,5 dBA. La distribución energética es bastante similar. El cálculo de la rugosidad da como resultado 6,81 asper para el dron 1, mientras que para el dron 2 son 8,12 asper y para el dron 3 son 7,17 asper. El sonido del dron 2 es más rugoso, el sonido suena más «desgarrado». El menos molesto es el dron1. Sin embargo, estos atributos del sonido no se reflejan con el  $L_{eq}$  en dBA y tampoco en los espectros de la señal mostrados en la figura 9.43.

El sonido del dron que se considera menos molesto es el dron 1, que presenta menos rugosidad gracias a un mejor diseño del perfil de las palas. Nótese que el dron con mayor nivel en dBA resulta ser el menos molesto.

La tabla 9.12 resume los resultados anteriores comparados con otros indicadores psicoacústicos. Se constata que la aspereza también indica el sonido que puede ser considerado más molesto, aunque en este caso no nos indica qué sonido es menos molesto.

La rugosidad, en cambio, ayuda en este caso a tomar una decisión correcta. Por último, destaca que la sonoridad, en este caso, también ofrece un comportamiento antagónico al percibido por las personas.



**Figura 9.43.** Espectros de nivel sonoro correspondiente a tres drones en vuelo estacionario.

**Tabla 9.12.** Criterios psicoacústicos y niveles de presión globales para el sonido procedente de tres drones distintos en vuelo estacionario

| DRONES             | Dron 1 | Dron 2 | Dron 3 |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Nivel sonoro (dBA) | 78,9   | 78,3   | 75,5   |
| Rugosidad (Asper)  | 6,81   | 7,27   | 8,12   |
| Sharpness (Acum)   | 2,77   | 2,69   | 3,02   |
| Sonoridad (Sonio)  | 45,8   | 39     | 43     |

### 9.1.5.6. Fluctuación

La impresión denominada fluctuación (*fluctuation strength*) es causada por variaciones de señal con frecuencias de modulación muy bajas. El máximo de este indicador psicoacústico se produce para frecuencias de modulación alrededor de 4 Hz. Esto es debido a que una locución normal contiene cuatro sílabas en un segundo.

Al igual que la rugosidad, la fluctuación muestra poca dependencia con el nivel de la señal. La unidad de la fluctuación es el vacil, que se define por el mismo tono sinusoidal que en el caso de la rugosidad, excepto que la frecuencia de modulación es de 4 Hz en lugar de 70 Hz. El algoritmo para el cálculo de la fluctuación se modifica de manera que el máximo de fluctuación se obtenga a 4 Hz en lugar de 70 Hz como para la rugosidad. Este indicador es especialmente útil ante señales con modulaciones de muy baja frecuencia,

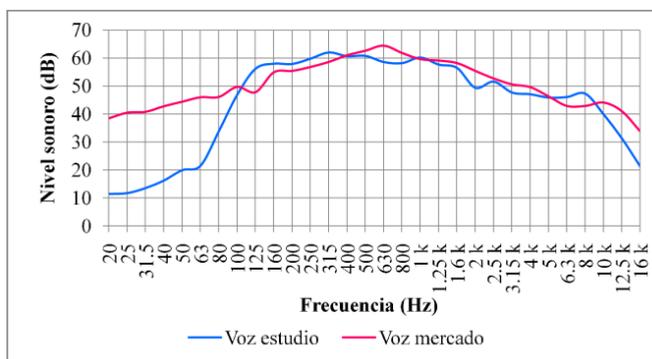
como por ejemplo la voz humana, o ante tonos muy cercanos que se suelen producir con máquinas rotativas que se encuentran muy juntas, por ejemplo el sistema de ventilación que dispone de diversos ventiladores funcionando simultáneamente.

La modulación verbal forma parte del proceso de fonación y es importante para la inteligibilidad. La voz humana es un tipo de señal sonora que, por su naturaleza, y sobre todo por el mensaje que lleva siempre asociado, despierta la «curiosidad acústica» del sentido auditivo, lo cual redundará en alertar a la persona de la presencia de esos sonidos. Si se desea valorar el sonido de la voz en su aspecto de molestia, debemos reflejar esta capacidad de captar la atención del sentido auditivo. El poder de fluctuación permite hacer esta función de una manera elegante.

Ponemos un ejemplo con dos locuciones. La primera es un registro efectuado en un estudio de grabación profesional con un nivel de ruido de fondo extremadamente bajo y unas condiciones acústicas óptimas en cuanto a tiempo de reverberación. El segundo registro está hecho con la misma voz que en el primer caso, pero inmersa con otras voces en el interior de un mercado con una reverberación apreciable.

El efecto de la reverberación, y, sobre todo, el resto de voces que se podrían considerar como un ruido de fondo, disminuye notablemente la profundidad de la modulación del habla. La figura 9.44 muestra el espectro en tercio de octava correspondiente a los dos casos expuestos.

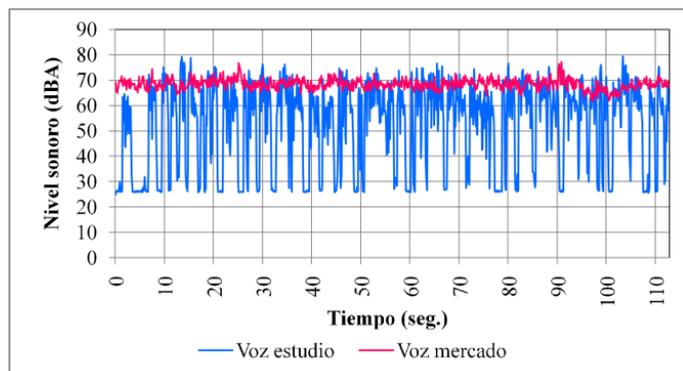
Podemos ver como la grabación en el mercado presenta un contenido mayor de baja frecuencia, cuyo origen, evidentemente, no es la voz humana.



**Figura 9.44.** Espectros de nivel sonoro correspondiente a las señales de voz grabadas en un estudio de grabación y en el interior de un mercado.

Los niveles sonoros  $L_{eq}$  son de 67,3 dBA para la voz en estudio y de 69,2 para la voz en el interior del mercado. La locución se graba en el estudio a una distancia de 0,5

m, mientras que en el mercado la distancia fue de 1 m, aproximadamente. La figura 9.45 muestra la evolución de la señal sonora durante la grabación.



**Figura 9.45.** Evolución temporal del nivel sonoro correspondiente a las señales de voz grabadas en un estudio de grabación y en el interior de un mercado.

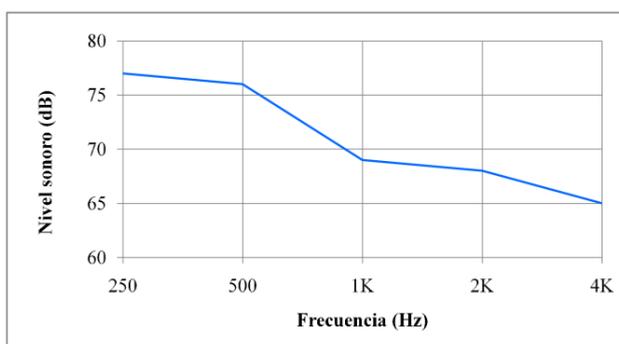
En la gráfica 9.45 se aprecia bien la diferencia de margen dinámico entre ambas señales sonoras. La modulación de la voz es mayor en la locución en estudio, mientras que esta modulación es mucho menor en el interior del mercado. La presencia de otras voces y una reverberación propician estos resultados.

El poder de fluctuación para la grabación en estudio es de 2,35 vacil, mientras que para el sonido grabado en el interior del mercado es de 1,54 vacil. Estos resultados corroboran que el sonido grabado en el interior del mercado, salvando el nivel sonoro, presenta una señal de modulación inferior a la señal grabada en un estudio y menos variaciones de nivel sonoro. Recordemos que los sonidos con pocas fluctuaciones de nivel son más monótonos y, por tanto, más «aburridos» para el sentido auditivo, que fácilmente «desconecta» pasado un tiempo.

Este ejemplo muestra que la interpretación de los resultados del análisis psicoacústico depende en gran medida del tipo de sonido que se va a juzgar. Los sonidos modulados (es decir, variables en amplitud) exigen mayor atención del cerebro que los sonidos no modulados. Si el oyente está interesado en la información que transmite el sonido, los sonidos modulados no se perciben como molestos. Sin embargo, si el sonido no es deseable, las señales moduladas se perciben como más molestas que las señales no moduladas con el mismo volumen o sonoridad. Para la inteligibilidad del habla, la potencia de fluctuación elevada supone una ventaja, mientras que una modulación lenta del sonido producido por una planta de energía eólica a menudo se considera molesto.

### 9.1.6. Concepto de silencio efectivo

El concepto de silencio efectivo se define como el nivel sonoro que no produce cambios significativos en el umbral temporal (TTS), que aumentan con el tiempo o retardan su recuperación (Ward, Cushing, & Burns, 1976). Los experimentos de Ward llegaron a la conclusión de que los niveles máximos por banda de frecuencia para no producir cambios en la sensibilidad y no producir TTS, deben ser inferiores a los niveles que se muestran en la figura 9.46. Para un ruido de banda ancha, el silencio efectivo correspondería a un nivel de 76 dBA. Estos estudios proporcionan datos útiles para determinar niveles de exposición seguros.



**Figura 9.46.** Niveles experimentales de silencio efectivo (Ward, 1973).

Las condiciones de exposición con niveles por debajo de los niveles de silencio efectivo deben considerarse inocuas. Es decir, solo los componentes de frecuencia de una exposición al sonido que tengan niveles por encima de los niveles del silencio efectivo presentarán un riesgo para la audición.

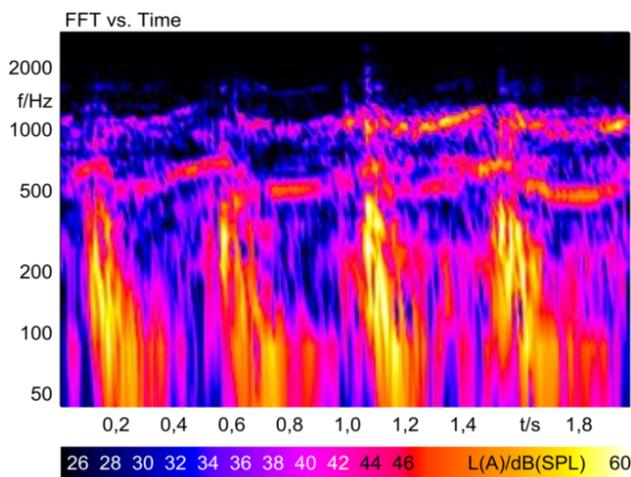
Una de las métricas propuestas que muestran las mayores correlaciones generales con el PTS observado fue el llamado SPL equivalente modificado, en el que el historial de tiempo de presión instantánea en 1/3 de octava se estableció en 0, si estaba por debajo de un valor umbral arbitrario de 80 dB SPL, o se establecía con la diferencia entre el valor de presión medido y el valor umbral. Esto sugiere que la corrección de los niveles de exposición para mostrar la energía que excede el nivel de silencio efectivo puede ser una buena predicción de los efectos de la exposición al ruido.

### 9.1.7. Detección de patrones

La valoración subjetiva de los sonidos encierra un gran componente de incertidumbre asociado a la gran variabilidad de opiniones respecto de un mismo sonido. A esto

se suma que, para la descripción cualitativa del sonido, el lenguaje puede tener cambios significativos de interpretación. Por ejemplo, se suele hablar de un sonido lleno o un sonido suave, cuando ambas acepciones no son estrictamente acústicas.

El sentido auditivo no puede hacer una valoración precisa como un equipo de medida (sonómetro o analizador espectral), por ejemplo, para determinar el nivel equivalente de un fragmento de sonido de unos minutos de duración. La figura 9.47 muestra el espectro en frecuencia producido por el limpiaparabrisas de un coche. Podemos ver la evolución espectral en función del tiempo y los niveles.



**Figura 9.47.** Espectro en frecuencia (FFT) en función del tiempo de un limpiaparabrisas de automóvil.

Sin embargo, a la hora de valorar los aspectos cualitativos del sonido, puede usar determinadas características de la señal de audio que los equipos electrónicos no pueden. El sentido auditivo en este ámbito tiene la capacidad innata de encontrar patrones tanto a nivel temporal como en frecuencia dentro de una señal de audio. La presencia de información de patrones crea problemas para obtener resultados subjetivamente válidos a partir de medidas convencionales o psicoacústicas típicas. En una comparación inmediata (sonido A frente a sonido B), la audición humana puede detectar pequeñas diferencias del orden de 1 dB entre el nivel sonoro de dos eventos. Pero, con un lapso de tiempo de algunos minutos entre presentaciones, nuestra memoria acústica no es buena y solo puede recordar si los patrones que observó de ambos sonidos eran diferentes.

La audición humana es muy sensible a los patrones en el tiempo o la estructura tonal. Para el proceso de reconocimiento automático, se crea un «archivo de compara-

ción» del sonido de referencia contra el cual se clasifica la información de patrón tonal o temporal cada instante. Estas señales proceden de la memoria, donde se almacenan todas las experiencias previas. Cuando escuchamos un sonido, se compara la diferencia entre el patrón instantáneo tanto en tiempo como en frecuencia y el contenido suave o menos estructurado en intervalos de frecuencia y tiempo similares. Cuando el sentido auditivo detecta la presencia de un patrón, este domina la percepción sonora, dejando en segundo plano aspectos como el nivel sonoro obtenido de la evolución suave del sonido.

El detector de patrones RA (Relative Approach), patentado por HEAD Acoustics, es capaz de detectar componentes tonales, patrones de frecuencia y tiempo dentro de un sonido. El RA simula la adaptabilidad del oído humano. El oído humano es muy sensible a los patrones en el dominio de la frecuencia y el tiempo. Las señales monótonas causan una adaptación muy rápida, mientras que los sonidos que cambian permanentemente y los sonidos con patrones dominantes atraen constantemente la atención (curiosidad acústica).

El RA separa las partes sonoras con y sin patrón y evalúa los patrones contenidos. Una señal estimada, basada en los valores anteriores, se compara constantemente con la señal real. De una manera simplificada, el RA puede considerarse como una sustracción del promedio deslizando, de un análisis instantáneo en ejecución centrado en él. El resultado final podría considerarse «el opuesto del promedio». Aplicando el RA, se mejora la resolución temporal y en frecuencia.

Se utilizan dos mecanismos diferentes para la estimación de patrones en la señal. Esencialmente, se utiliza el análisis del espectro en frecuencia. Este análisis no permite obtener buena resolución en frecuencia y temporal simultáneamente. El primer método sensible al tiempo está optimizado para patrones temporales y tiene una definición suavizada en frecuencia. El segundo método sensible a la frecuencia está optimizado para componentes de frecuencia y tiene una definición suavizada sobre el eje de tiempo. La combinación de ambas estrategias permite obtener el indicador RA.

La figura 9.48 muestra la aplicación del RA en el caso del análisis del ruido producido por las escobillas del limpiaparabrisas de un vehículo. Es conocido que, en función de estado de la goma y la humedad del cristal, se producen ruidos de deslizamiento difíciles de valorar por medios clásicos (Genuit & Sottek, 2018).

### **9.1.8. Visualizar el sonido**

Las imágenes tienen unos atributos que permiten cuantificarlas. Una imagen tiene básicamente cuatro atributos: brillo, matiz, saturación y contraste. En función del valor de cada atributo, una imagen posee unas características determinadas. Esto permite comparar imágenes de forma objetiva. Estos atributos también se pueden valorar en un

sonido, mediante una equivalencia. No obstante, en sonido, matiz y saturación se unen en un único concepto llamado «color».

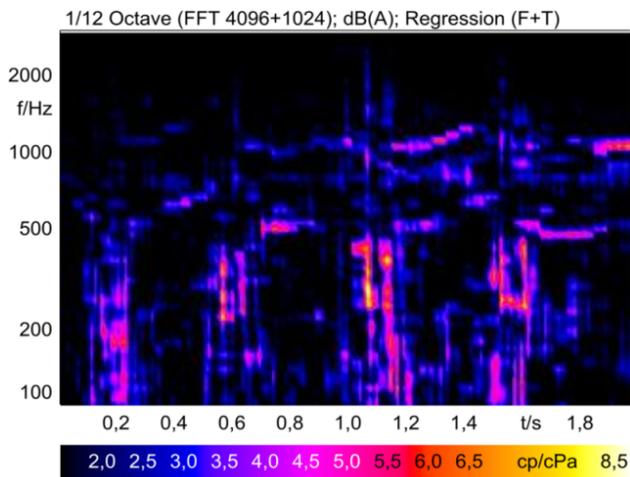


Figura 9.48. Análisis RA de un limpiaparabrisas de un vehículo.

- El brillo de una imagen se refiere a la cantidad de luz que proyecta la imagen. El equivalente en sonido sería el nivel de presión acústica global, sin ponderar. A mayor presión acústica, en general, mayor nivel sonoro percibido.
- El matiz y la saturación de una imagen muestran la percepción del color. Equivalen al timbre sonoro percibido, llamado en ocasiones *color del sonido*.
- El contraste de una imagen es la distancia o diferencia entre el blanco y el negro, es decir, entre la máxima y la mínima iluminación. Equivale al margen dinámico del sonido, que es la distancia o desnivel entre los valores más bajos de nivel sonoro y los más elevados. Por ejemplo, entre los percentiles L10 y L90 que muestran los niveles más elevados y los más bajos de un fragmento sonoro.

De los tres atributos, el primero es el más usado para describir el nivel sonoro. El concepto de *color del sonido* a veces lo usan los músicos, pero no se ha establecido un significado oficial en cuanto al timbre y, hasta este momento, no es común con el fenómeno de la sinestesia, es decir, la tendencia de ciertos sonidos, a veces incluso de ciertos tonos, a sugerir para algunas personas una sensación visual de color (Bernard, 1986). El color del sonido es un atributo del sentido auditivo y no es en sí mismo una propiedad acústica del sonido. Lo mismo ocurre con el color, que es una percepción visual y no una propiedad de la luz.

Con estos atributos, es posible una representación multidimensional del sonido que permite «clasificar» los sonidos de una manera más cercana a la realidad percibida. Al igual que la luz, el color del sonido no tiene dependencia temporal. Uno de los primeros y más destacables trabajos sobre el concepto del color del sonido es el publicado por el compositor francés P. Schaeffer. Schaeffer describe un ambicioso programa de investigación cuyo objetivo es nada menos que la clasificación de todos los sonidos y una pedagogía (solfeo) para entrenar a los músicos en el uso musical del esquema de clasificación. Esencial para el enfoque de Schaeffer es el desarrollo del concepto de audición reducida. El modo común de escuchar, en el que respondemos a un sonido identificando su fuente (el sonido que puede ser un oboe o un avión de reacción), deben distinguirse según Schaeffer de otro modo, en el que deliberadamente, y quizá automáticamente, separamos lo que escuchamos de su fuente, concentrándonos en cambio en las propiedades del sonido mismo.

Este tipo de objetivación o reducción de sonidos es necesaria para que un evento sonoro se escuche como un objeto sonoro. Dado que los sonidos producidos por diferentes cosas a menudo suenan parecidos cuando se reducen, el número de objetos sonoros es menor que el universo de todos los sonidos posibles (Schaeffer, 1966).

Diversos estudios recientes revelan que el tono se asocia específicamente con la luminosidad del color, mientras que el volumen se asigna a una mayor prominencia visual. La manipulación del espectro de sonidos sin modificar su tono muestra que se asocia un cambio creciente de la energía espectral con las mismas características visuales (mayor luminancia y saturación) que un tono más alto. Sorprendentemente, el matiz de los colores con la misma luminancia y saturación no se asocia con ninguna de las características acústicas probadas, excepto por una débil preferencia por hacer coincidir los tonos más altos con el azul (frente al amarillo) (Anikin & Johansson, 2018).

### 9.1.9. Contraste acústico

La falta de vocabulario específico nos impide poder describir con palabras cómo es el ruido que nos molesta. La psicoacústica aporta herramientas potentes que pueden cuantificar los aspectos cualitativos del ruido, pero no resuelven el problema de cuantificar la molestia percibida. Si las personas somos capaces de valorar subjetivamente la molestia de una manera relativamente rápida, ¿se podría hacer lo mismo de forma objetiva?

La experiencia demuestra que, en acústica, la solución más compleja no siempre es la mejor. En este apartado se describe el concepto de *contraste acústico*. Conceptualmente, es muy simple: se basa en el fenómeno bien conocido por el que un sonido con muchos desniveles, en general, se considera más molesto que un sonido de nivel casi

constante. Este sencillo indicador permite valorar el grado de molestia de una forma simple sin precisar de instrumentación específica ni de cálculos complejos. Es un indicador experimental que permite resolver muchos casos y puede explicar, entre otros, por qué una persona se puede dormir sentada dentro de un avión con 85 dBA y, en cambio, se despierta en su cama con 25 dBA.

Para evaluar la afectación que el ruido produce sobre las personas, se realizan mediciones sonométricas. Diversos trabajos de investigación confirman que existe una correlación clara entre el nivel de molestia percibido y el nivel de presión sonora expresado en dBA para niveles superiores a los 60 dBA aproximadamente. Para los niveles de presión acústica de este orden de magnitud, son suficientemente elevados para producir molestia *per se*. Sin embargo, cuando se miden niveles sonoros bajos, el dictamen ya no es tan fácil o tan claro. Este problema puede darse con facilidad en las mediciones de presión sonora en ambiente interior, en las que el nivel sonoro suele ser bastante bajo, normalmente por debajo de los 30 dBA.

La proximidad de un sonido en general conlleva un mayor grado de alerta, lo cual a su vez causa una mayor alteración sobre las personas afectadas. Este efecto es consecuencia de la función natural del oído, que esencialmente nos alerta de lo que acontece a nuestro alrededor, complementando en ocasiones a la visión. Como es sabido, no se puede desconectar el oído, este siempre trabaja, las 24 horas los 365 días del año. De noche, cuando la visión no es útil, es cuando el sonido adquiere mayor relevancia. Escuchar un ligero chasquido cerca de nosotros nos puede generar inquietud por querer saber de qué se trata. Para que ese sonido sea perceptible mientras estamos durmiendo, debe superar el ruido de fondo tanto como para atraer la «curiosidad acústica» del sentido auditivo y que este nos despierte. El grado de superación sonora que produzca este efecto dependerá de la fase de sueño en la que se está y del individuo.

En general, la decisión de si un ruido molesta, no requiere mucho tiempo, y siempre se hace según el ruido que nos rodea en ese momento y el tipo de actividad que deseamos o estamos realizando. Si ese ruido interfiere en nuestra tarea, se considerará molesto (Berlung & Lindvall, 1995). El ruido o sonido tiene diferentes aspectos físicos que se pueden medir y, por tanto, cuantificar. Los más básicos son:

- El nivel de presión acústica global (sea ponderado o no).
- La distribución espectral del ruido.

La presión acústica se suele promediar energéticamente, por lo que, a mayor presión acústica, generalmente mayor molestia. Los niveles de presión acústica medidos suelen integrarse durante un tiempo, dependiendo de la variabilidad de la fuente sonora. Es bien conocido que, ante fuentes con muchas variaciones de nivel, el resultado obtenido de la integración temporal no refleja el grado de molestia.

Hay diversos ejemplos cotidianos: los camiones de recogida de basura que pasan durante la madrugada, el paso de una moto ruidosa, un perro que ladra, etc. En todos estos casos, el evento es considerado de corta duración; su presencia de apenas un minuto, en una medida de diez minutos en período nocturno, puede alterar notablemente los niveles de presión obtenidos, pero en un promediado más largo, por ejemplo, treinta minutos, su influencia será despreciable. El hecho de que unas personas se han despertado durante la noche a causa del ruido no queda reflejado en una medición con un grado de integración elevado. La distribución energética por bandas (octava o tercios) aporta una información cualitativa de la distribución espectral de la energía acústica. Si la energía se centra en las bandas centrales, alrededor de 2 kHz, el sonido será muy molesto, ya que a esas frecuencias el oído presenta su máxima sensibilidad. Si la misma energía se centra en las bajas frecuencias, la sensación producida será muy distinta.

El grado de molestia en ambiente interior no depende solo del nivel de presión sonora, o del espectro de frecuencia del ruido: hay algo más. Para que un sonido sea perceptible por el oído, debe ser audible y, además, este debe ser similar o superar al ruido ambiente; aunque, dependiendo del sonido, el oído es capaz de distinguir sonidos 10 dB por debajo del sonido ambiente. En general, cuanto más destaque sobre el sonido ambiente, este puede ser más perceptible y hay una mayor probabilidad de que resulte molesto, sobre todo si este interfiere en nuestra tarea (por ejemplo, dormir).

#### **9.1.9.1. Concepto de contraste acústico**

El contraste de una imagen es la distancia entre los valores más oscuros y los más luminosos. Una imagen en blanco y negro sería la más contrastada, puesto que no hay grises. En acústica, no podemos «ver» el sonido y, por tanto, perdemos esa capacidad de referenciar un nivel con otro. Notemos que, para comparar sonidos, estos no se pueden superponer, ya que se crearía un nuevo sonido. No obstante, en acústica tenemos dos conceptos similares: el nivel de inmisión y el nivel de ruido ambiente. Las distintas fuentes de ruido se producen en diferentes momentos y diferentes lugares. Por ejemplo, en la cocina existen diversos utensilios que producen diferentes niveles de ruido ambiente.

La nevera y el lavavajillas suelen producir niveles bajos de ruido, mientras que una batidora o un molinillo de café suelen hacer niveles de ruido muy superiores. Independientemente del utensilio considerado, se podría definir un nivel de sonido ambiente esperado dentro de una cocina. El tiempo de funcionamiento es también otro factor que se debe tener en cuenta. La duración de un vuelo comercial suele ser muy superior al del tiempo que se tarda en hacer una mayonesa o triturar una carne, por ejemplo, aunque los niveles sonoros sean similares. Para valorar el grado de confort sonoro, se deben analizar los desniveles que una fuente sonora produce sobre su entorno más cercano y relativizar-

los a la tarea que se realiza. A pesar de la subjetividad que produce el sonido, la decisión del grado de molestia se obtiene siempre por comparación (Barti R. , 2015).

El contraste acústico tiene a su vez dos variantes: el contraste global o por bandas de frecuencia. Con vistas a valorar el grado de molestia de forma sencilla, se utiliza el contraste de nivel global, que permite obtener un único resultado. El contraste espectral es más complejo y no está completamente desarrollado. Como se trata de cuantificar los desniveles sonoros entre el ruido producido por la fuente sonora y el ruido ambiente, no se utiliza el  $L_{eq}$ , puesto que con su integración «elimina» justamente las oscilaciones o variaciones de nivel, que es lo que se pretende encontrar. Para valorar el grado de irregularidad de nivel, se recurre a los percentiles. Experimentalmente, se determina que los percentiles L5 y L90 son los adecuados, de acuerdo con las respuestas obtenidas en diversos test. El contraste acústico se define como la diferencia entre el L5 y el L90 (ecuación 9.7), evaluados en un período razonable, entendiendo por tiempo razonable una duración similar al que una persona necesita para decidir si el sonido que escucha le molesta o no.

$$C(dB) = L_5 - L_{90} \quad (9.7)$$

Este indicador debe ser complementado con otros que valoren los aspectos subjetivos que rodean al evento sonoro. Nótese que el contraste acústico no depende del nivel sonoro. Seguidamente, se muestran algunos ejemplos de la aplicación del contraste acústico para valorar el confort sonoro.

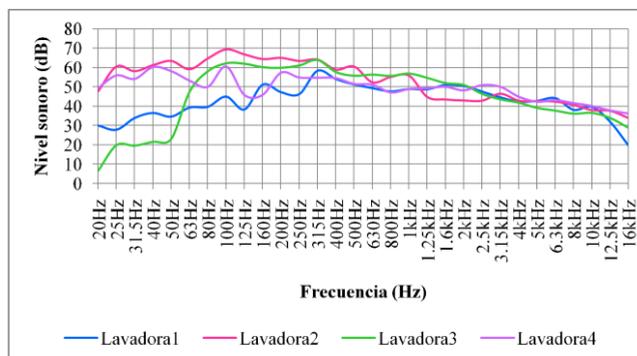
#### 9.1.9.1.1. Ejemplo 1: lavadora

El sonido de una lavadora no suele tener un nivel elevado y suele pasar desapercibido de día, pero de noche probablemente nos impida dormir, sobre todo si la lavadora no es la nuestra. No es solo una cuestión de nivel sonoro. De noche, cualquier electrodoméstico que haga ruido molesta porque deseamos dormir. Sin embargo, es curioso que el sonido de nuestro electrodoméstico siempre nos molesta menos que el del vecino, a pesar de estar más cerca. Parece una incongruencia, pero la diferencia está en que nuestro electrodoméstico podemos apagarlo cuando queramos, cosa que no podemos hacer con los aparatos ajenos, y eso acrecienta la sensación de molestia.

El sonido procedente de una lavadora no es constante. El nivel de intensidad depende de la fase de programa durante el lavado. La entrada de agua suele ser un momento en el que el nivel sonoro incrementa su valor, mientras que la fase de lavado es la más silenciosa. Durante esta fase, por un lado, se percibe el ruido del motor (generado por el control electrónico) y, por otro, el sonido de la ropa y del agua golpeando dentro del tambor.

Por último, la expulsión del agua junto con el centrifugado suelen ser los momentos más ruidosos. La figura 9.49 muestra los espectros de las cuatro lavadoras analizadas.

El tipo de sonido generado es muy similar entre los distintos fabricantes. Dependiendo de los materiales utilizados por este, y de las medidas acústicas adoptadas, los niveles sonoros pueden variar entre marcas y modelos.



**Figura 9.49.** Espectro en frecuencia de cuatro lavadoras durante el ciclo de lavado.

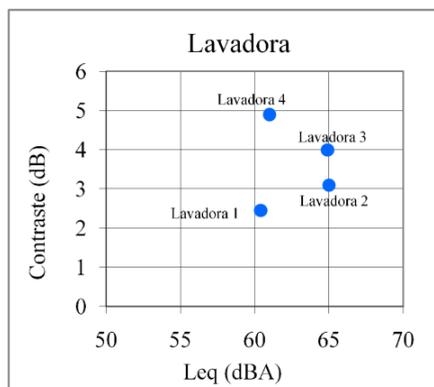
Según los resultados de la tabla 9.13, por un lado tenemos la lavadora 2 con 65 dBA y la lavadora 3 con un nivel de 64,9 dBA. Por otro lado, están la lavadora 1 con 60,4 dBA y la lavadora 4 con 61 dBA. Estos resultados indican que las lavadoras 1 y 4 son las más silenciosas. Observando los espectros de ambas lavadoras, vemos que la lavadora 1 tiene un menor contenido de energía a baja frecuencia y valores muy similares a partir de los 400 Hz.

**Tabla. 9.13.** Niveles sonoros y sonoridades correspondientes a cuatro lavadoras durante el ciclo de lavado

|                   | Lavadora 1 | Lavadora 2 | Lavadora 3 | Lavadora 4 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| Leq (dBA)         | 60,4       | 65         | 64,9       | 61         |
| Sonoridad (Sonio) | 19,01      | 24,14      | 18,42      | 17,97      |

El espectro en frecuencia y el nivel sonoro global dan valores muy similares; eso no permite saber con exactitud qué lavadora es realmente la más silenciosa o si realmente ambas dan el mismo grado de silencio. Las pruebas subjetivas obtenidas de la escucha del nivel sonoro muestran claramente que la lavadora 1 se considera más silenciosa, o menos molesta. Lo sorprendente es que el sonido procedente de la lavadora 4 es considerado mayoritariamente como el más molesto y, sin embargo, tiene un nivel sonoro bajo. El contraste acústico valora los desniveles sonoros. En este caso, la figura 9.50 muestra

el contraste acústico de cuatro lavadoras durante el ciclo de lavado, comparado con el nivel equivalente.



**Figura 9.50.** Contraste sonoro de cuatro lavadoras durante el ciclo de lavado.

Este tipo de análisis permite clasificar los sonidos en función de su potencial molestia causada por los desniveles sonoros. Esto posibilita, en el caso que nos ocupa, discernir correctamente entre la lavadora 1 y la 4 respecto al grado de molestia. Los niveles sonoros obtenidos por las dos lavadoras más silenciosas son similares; sin embargo, el contraste presenta variaciones entre ellas que permite detectar la más molesta. Los dos modelos con un nivel muy similar cercano a los 60 dBA suenan distinto. La que tiene menor contraste genera menos molestia, a pesar de tener prácticamente el mismo nivel sonoro.

#### 9.1.9.1.2. Ejemplo 2: despertadores

La función de un despertador es, evidentemente, «despertar» al durmiente. Resulta obvio que un estruendo despierta a cualquier persona. No obstante, hay casos en que los usuarios manifiestan que no oyen al despertador o, más exactamente, no oyen determinado tipo de despertador. Cuando se dice «oye», realmente hay que interpretar «despertar»; para ello, el sentido auditivo debe alertar de la presencia de esta alarma.

Para valorar qué tipo de despertador es mejor para despertar, se hacen una serie de mediciones del nivel sonoro y del espectro en frecuencia, así como otros parámetros de la señal temporal. Todas las mediciones acústicas se realizan en el mismo sitio y a la misma distancia del despertador (0,7 m, que se ha considerado como una distancia habitual), siendo este factor irrelevante para el propósito de este análisis. La figura 9.51 muestra la evolución del espectro sonoro radiado por los distintos despertadores analizados.

Se puede constatar que los de campana dan un nivel sonoro superior al resto. En cuanto al contenido en frecuencia, algunos modelos centran la energía por encima de los 8 kHz, y eso quizá dificulte a las personas mayores o con patologías auditivas escuchar estos sonidos. Observamos como los niveles sonoros medidos son similares, oscilando en los casos medidos entre 73 y 84 dBA. *A priori*, se podría asociar que el despertador mejor es el que radia más nivel sonoro. No obstante, algunas personas no se despiertan a pesar de que su despertador es ruidoso. Es destacable que los niveles sonoros de los despertadores tienen diferentes evoluciones temporales, como se muestra en la figura 9.52.

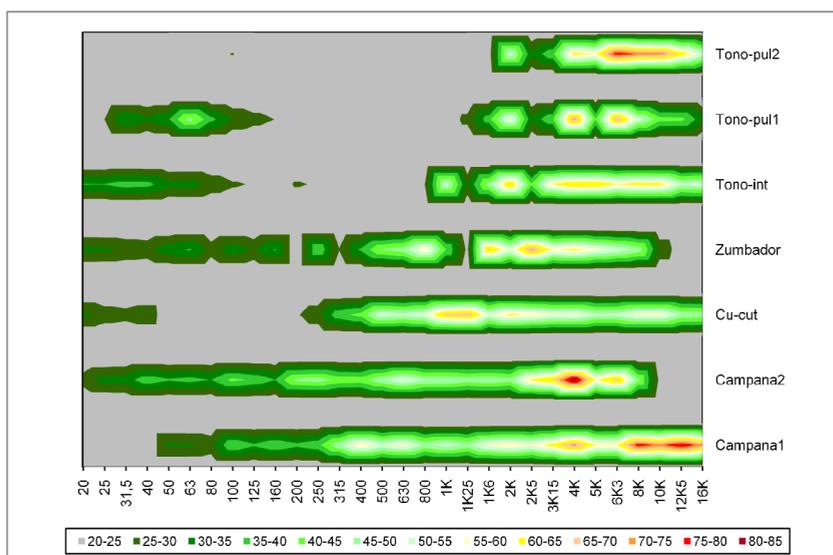
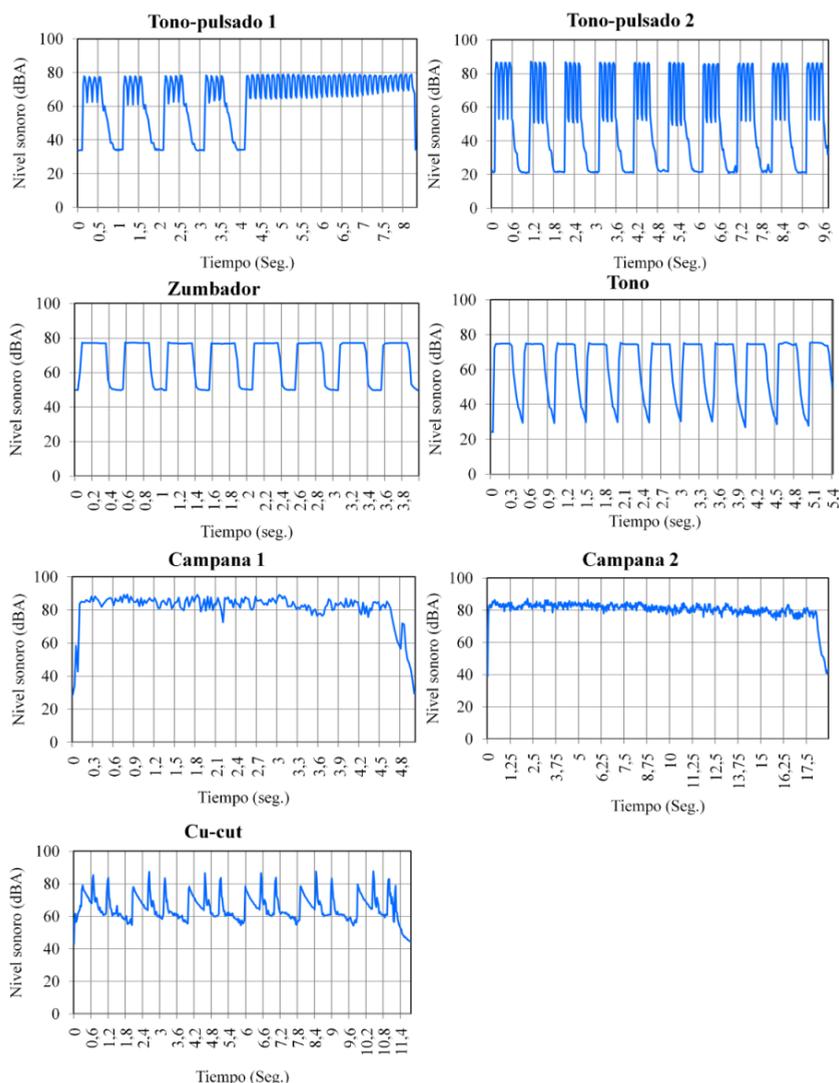


Figura 9.51. Espectro sonoro de distintos despertadores.

Los llamados *de campana* son los «clásicos», en los que el sonido se genera por el impacto de un pequeño martillo metálico sobre una pieza metálica acampanada. Estos despertadores mantienen un nivel sonoro casi constante. Los despertadores electrónicos generan el sonido por la vibración de un elemento cerámico y ofrecen una mayor variabilidad de nivel sonoro con el tiempo. El llamado *zumbador* lleva un elemento electro-mecánico que produce la vibración de la carcasa y esta transmite el sonido al aire.

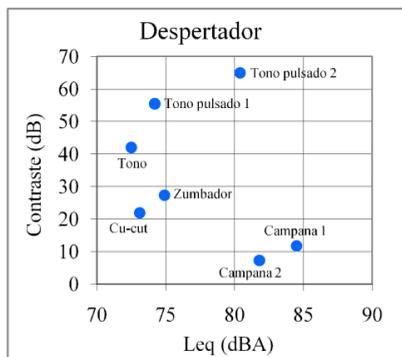
Dependiendo del montaje del mecanismo interno y el estado del despertador, el nivel sonoro radiado puede variar apreciablemente. Los llamados *de tono pulsado* son electrónicos y generan una señal tonal emitida por un dispositivo cerámico en contacto con la carcasa de plástico del despertador, que enfatiza el nivel sonoro radiado; son parecidos a los electrónicos, pero el tono emitido no es constante durante un cierto tiempo, sino que está pulsado.



**Figura 9.52.** Evolución temporal del sonido de distintos despertadores.

La figura 9.53 muestra los niveles de presión sonora y el contraste acústico para distintos despertadores de tipo electrónico, electromecánico, de campana y el de cucú, con algunas variantes en el caso de los de tono y campana. Los de tono tienen tres variantes: *a)* el tono intermitente con una duración de 0,25 s, *b)* el tono pulsado 2 que repite una secuencia de cuatro tonos breves de 50 ms y *c)* el tono pulsado 1 que es igual que el pulsado 2, pero cada cuatro secuencias intercala una de 3,5 s. Los de campana presentan distinto tamaño de la campana. Y el de cucú es un reloj clásico de pared. Este último se

mide a mayor distancia y, aunque no es un despertador, sirve para comparar resultados con los anteriores.



**Figura 9.53.** Contraste sonoro producido por diversos despertadores.

Los mejores despertadores son los que ofrecen un mayor desnivel sonoro, es decir, mayor contraste. Los desniveles sonoros podrán despertar eficazmente a cualquier persona. Se puede apreciar que los modelos de campana presentan mayor nivel sonoro, pero menor contraste. Nótese que el nivel sonoro apenas varía mientras suena la campana. En este tipo de despertadores, solo al iniciar el sonido se produce un desnivel sonoro. Esta circunstancia explica por qué algunas personas manifiestan que algunas veces «no oyen» el despertador cuando este suena.

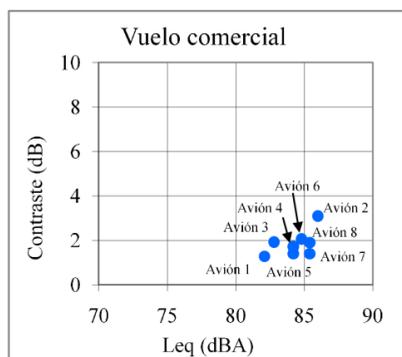
En el extremo opuesto, tenemos los despertadores electrónicos basados en tonos pulsados, que tienen un nivel sonoro entre 73 dBA y 80 dBA, aproximadamente, pero ofrecen un mayor contraste acústico. Los despertadores de zumbador electromecánico pueden ser suficientes para la función de despertar, pero no son los mejores. Los modelos de tono, y especialmente los de tono pulsado, son sin duda los mejores despertadores.

#### 9.1.9.1.3. Ejemplo 3: vuelo comercial

Este ejemplo muestra el nivel sonoro en el interior de distintos vuelos comerciales cuando se alcanza la altura de vuelo a velocidad de crucero. A la capacidad ensordecedora del sonido con más de 80 dBA, se añade que el sonido es muy monótono (bajo contraste).

Como se puede apreciar en la figura 9.54, los niveles sonoros en los distintos vuelos comerciales son similares, oscilando entre 82 dBA y 86 dBA. El contraste en todos los casos es muy similar, alrededor de 2 dB, lo que significa que el sonido

apenas tiene variaciones. Este aspecto es el que hace que este sonido sea «aburrido» para el sentido auditivo y desconecta pasados unos minutos, lo que propicia un estado de somnolencia creciente y facilita que podamos conciliar el sueño fácilmente, a pesar de estar vestidos y calzados, y sentados generalmente, en una butaca estrecha e incómoda.

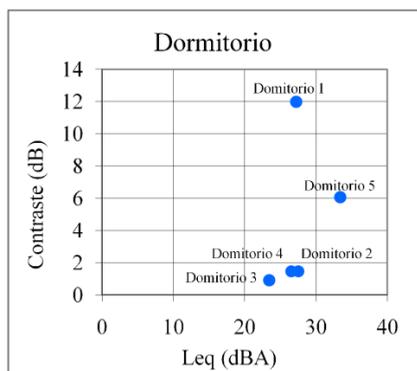


**Figura 9.54.** Contraste sonoro del ruido interior de ocho aviones comerciales.

#### 9.1.9.1.4. Ejemplo 4: ambiente sonoro en el interior de un dormitorio

Se analiza el nivel sonoro presente en el interior de un dormitorio en período nocturno. Para poder dormir placenteramente, es necesario tener un bajo nivel sonoro, pero esta condición no es suficiente para garantizar un sueño reparador sin despertarse. La segunda condición es que la calidad sonora en el dormitorio sea la adecuada. Para evitar que el sentido auditivo haga su función natural de alertarnos de un peligro, hay que evitar la presencia de sonidos puntuales que puedan irrumpir en la habitación. En este ejemplo se muestran cinco situaciones, correspondientes a cinco dormitorios. Las mediciones se realizan en período nocturno, sin presencia de gente en su interior, con ventanas y puerta cerrada. La figura 9.55 muestra los resultados obtenidos. Los niveles sonoros en el interior de los dormitorios son bastante similares.

El nivel máximo en el interior de un dormitorio debería ser inferior a 25 dBA en período nocturno. Los resultados muestran que solo uno de los dormitorios está por debajo de este valor. Sin embargo, de los cinco casos mostrados, solo dos manifiestan que tienen dificultades para dormir porque escuchan ruidos. El dormitorio con un contraste de 12 dB es el que tiene una peor calidad sonora, que dificulta o impide conciliar el sueño.



**Figura 9.55.** Contraste sonoro en cinco dormitorios en período nocturno.

No es una cuestión de nivel sonoro, sino de calidad. Se evidencia que con las mediciones tradicionales ( $L_{Aeq}$ ) no se puede valorar lo que realmente perciben los humanos y que la correlación entre nivel equivalente ponderado A y la molestia percibida es muy baja. El dormitorio 4 tiene un nivel sonoro ligeramente inferior al dormitorio 1 y, sin embargo, tiene un contraste acústico muy inferior que ayuda a conciliar el sueño fácilmente. Se da la misma situación entre los dormitorios 1 y 2, con el mismo nivel sonoro (dBA): en el primero se puede dormir y en el segundo hay más dificultad.

Nótese que los dormitorios 2 y 4 tienen el mismo contraste y este es bastante bajo, lo que facilita conciliar el sueño a pesar de superar los 25 dBA. Con estos resultados cabe preguntarse: ¿tener un nivel inferior a 25 dBA es suficiente para poder dormir correctamente? La tabla 9.14 resume los niveles sonoros medidos en el interior de los dormitorios y el valor del contraste acústico calculado.

**Tabla 9.14.** Nivel sonoro y nivel de contraste acústico para cinco dormitorios en período nocturno

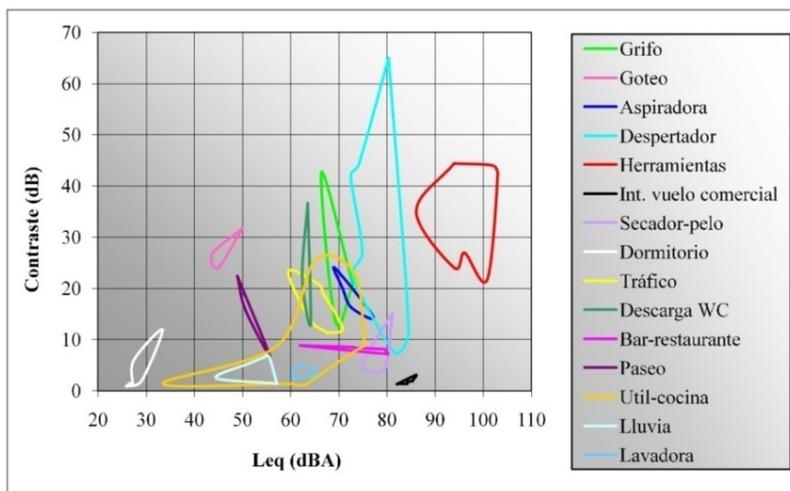
|                | <b>Dormit 1</b> | <b>Dormit 2</b> | <b>Dormit 3</b> | <b>Dormit 4</b> | <b>Dormit 5</b> |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Leq dB(A)      | 27,2            | 27,5            | 23,4            | 26,5            | 33,4            |
| Contraste (dB) | 12,0            | 1,5             | 0,9             | 1,5             | 6,1             |

### 9.1.10. Confort sonoro

Diariamente, estamos expuestos a diversos ambientes sonoros: en el trabajo, en casa, mientras nos desplazamos... En general, se espera que el sonido percibido en cada situación tenga determinadas características que se ajusten más o menos a unos niveles

de energía según nuestra experiencia previa. Así, si estamos en el trabajo, reconocemos fácilmente un ruido extraño, distinto a los ruidos «habituales» como los ordenadores, las voces de la gente de nuestro alrededor, etc. Si molemos café, y la máquina no hace ruido, probablemente deduciremos que está averiada. Si observamos que un vehículo empieza a moverse en un semáforo sin hacer ruido, quizá pensemos que es un sueño. Es decir, se hace una previsión *a priori* de la calidad acústica de los sonidos del entorno, lo que se llama una *escena sonora*, de acuerdo con nuestra experiencia previa.

La figura 9.56 muestra el concepto de confort sonoro aplicado a diferentes clases de sonidos mediante una clasificación grupal. Cada tipología de sonido (por ejemplo, aspiradoras, lavadoras, etc.) ocupa una región en el espacio, en función de su nivel sonoro y el contraste acústico. Se aprecia la relación entre  $L_{eq}$  dBA, que es más común, y el contraste acústico.



**Figura 9.56.** Sectorización del grado de molestia de distintos sonidos en función de su nivel sonoro y el contraste acústico.

Si las áreas de la figura 9.56 se encuentran en la parte inferior izquierda, significa que el nivel sonoro es moderado-bajo y con poco contraste, lo que redunda en un mayor confort sonoro. Por ejemplo, los dormitorios que tienen un contraste situado en la parte inferior izquierda de la gráfica de la figura 9.56 son los mejores en cuanto a calidad sonora para la función básica de descansar y tener un sueño reparador. En el lado opuesto tenemos mayor nivel sonoro y mayor contraste, lo que origina mayor molestia o desagrado del sonido (por ejemplo, herramientas). El despertador supone un caso particular, donde lo que se desea es justamente que no sea un sonido confortable.

El concepto de confort sonoro es más adecuado usarlo para describir las propiedades cualitativas que el sonido puede producir sobre las personas. El confort sonoro se basa en dos aspectos: la calidad y la cantidad de energía acústica recibida. La calidad sonora tiene diversas facetas: la evolución temporal, el patrón temporal o el espectro en frecuencia, entre otros. El confort sonoro tiene influencia sobre la calidad en el ambiente de trabajo, del sueño, etc. Cuando la calidad del ambiente sonoro se deteriora, se observan efectos negativos, como la baja productividad, los conflictos vecinales y, en casos muy graves, incluso problemas psicológicos. Así, pues, podemos hablar del confort sonoro que un sonido produce sobre las personas.

El confort acústico no debe confundirse con la calidad acústica de un sonido, en el que, mediante indicadores psicoacústicos, se cuantifican los aspectos cualitativos de un sonido. Distintos trabajos muestran que las personas moderadamente expuestas al ruido, en general, se quejan mucho más que otras expuestas a niveles sonoros superiores y que supuestamente deberían quejarse más (Vallet M., 2000) (Hiramatsu K., 2000) (Ouis D., 2002). Parece que los elevados niveles de contaminación acústica en algunas zonas conllevan un cierto grado de «resignación» por parte de los afectados, que, por agotamiento, lo consideran una situación «normal». Ciertamente, los niveles de ruido cerca de las vías de comunicación con densidades de circulación elevadas producen menor molestia que a las personas expuestas al ruido discontinuo de un cruce regulado con semáforo.

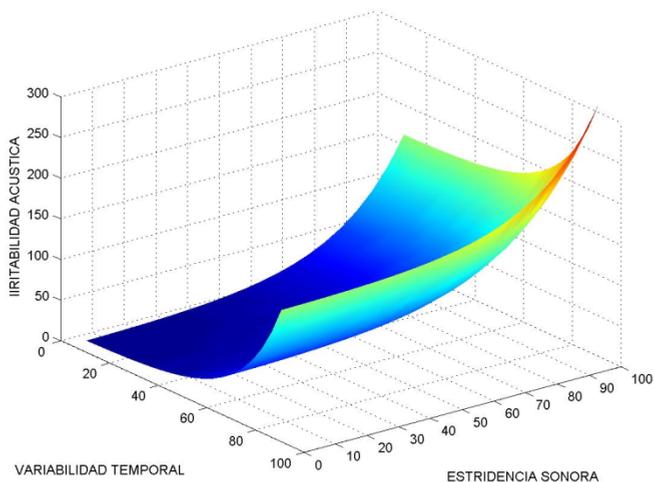
El confort acústico se define como el nivel de sonido que se considera «aceptable» para una persona, tanto por el nivel sonoro como por las características de frecuencia y evolución temporal de este (Barti R. , 2017).

Podríamos decir que el confort acústico sería el «sonido esperado» para una situación concreta. La presencia de sonidos no deseados produce, en general, malestar, rechazo e irritabilidad. Estas reacciones no se correlacionan únicamente con el nivel sonoro, ni con el contenido espectral; también hay que tener en cuenta los factores de índole temporal y la capacidad de nuestro cerebro para procesar los distintos sonidos. La medida de la capacidad de irritabilidad de un sonido podría ayudar a identificar situaciones complejas que no es posible valorar con métodos tradicionales. El índice de irritabilidad acústica es un indicador de lo contrario del confort acústico, como muestra la figura 9.57.

### **9.1.11. Valoración subjetiva del sonido**

Las valoraciones subjetivas se hacen en función de las sensaciones que produce un sonido determinado y dependen de muchos factores, como ya se ha visto. Las valoraciones subjetivas de un sonido pueden cambiar constantemente, no son repetitivas y, por descontado, no son reproducibles.

Cuando se evalúan los niveles sonoros para estudiar sus efectos sobre las personas, interesa siempre saber el grado de molestia o el grado de nocividad. Son dos cuestiones muy diferentes; aunque ambas afecten a la salud, conviene distinguir entre afectación fisiológica y afectación psicológica.



**Figura 9.57.** Índice de irritabilidad acústica. Irritabilidad de un sonido en función de su variabilidad temporal y su estridencia sonora.

La nocividad de un sonido está en general más enfocada a la salud laboral, pues los trabajadores pueden estar expuestos a niveles sonoros elevados que generan efectos fisiológicos sobre el oído y otros órganos. En estos casos, se recurre a las mediciones del nivel equivalente  $L_{eq}$ , expresado en dBA, porque la nocividad está ligada directamente con el nivel de presión sonora (por lo general, superior a 85 dBA). Los límites se establecen a partir de unos límites de exposición, que sería el resultado de multiplicar el nivel sonoro por el tiempo, como ya se ha explicado.

La molestia causada por el sonido no se puede evaluar únicamente con el nivel sonoro ponderado A. El motivo más evidente es que la molestia no es una cuestión del nivel sonoro, sino de la calidad sonora y de las circunstancias que rodean al evento sonoro. Un simple ejemplo: pensemos en nuestra mejor música, escuchada al mediodía; sin duda, será agradable y deseada. Pero, esa misma música, para nosotros mismos, escucharla de madrugada mientras dormimos probablemente no nos generará la misma reacción que durante el día. El procesado sonoro de los humanos es mucho más complejo.

La transformación de un evento sonoro en un evento auditivo está influenciado por diferentes aspectos:

- Aspectos físicos del sonido.
- Aspectos psicoacústicos, donde el sentido auditivo percibe sensaciones que tienen una estructura temporal y una distribución en frecuencia.
- El contexto, el tipo de información que trasmite el sonido y las expectativas y sensaciones que provoca, y que influyen en la clasificación del evento sonoro.

Es muy difícil establecer unos valores a partir de los cuales se produce sensación de molestia, ya que cada persona va a valorar el ruido de una manera diferente. Esta situación dificulta el estudio objetivo del problema. La valoración de los aspectos relacionados con la producción del sonido (frecuencia e intensidad) son sencillos de determinar; sin embargo, otro tipo de factores que influyen sustancialmente (como son el contexto psicosocial, la actitud personal hacia la fuente sonora, la actividad, la tarea, la hora del día, etc.) son mucho más complicados de valorar de forma objetiva.

La evaluación subjetiva del ruido se lleva a cabo mediante cuestionarios y escalas en las que se puntúa un determinado aspecto del sonido. Es decir, mediante estas encuestas se trata de objetivar las sensaciones que el sonido escuchado nos produce. De la relación entre estas evaluaciones subjetivas y las características físicas del sonido surgen las bases psicoacústicas del ruido, que ha permitido el desarrollo de una serie de índices acústicos cuyo objetivo es describir el sonido de una forma más objetiva.

El estudio de los aspectos subjetivos del sonido se puede abordar desde dos enfoques distintos. Por un lado, se analiza la respuesta ante el ambiente sonoro, desde una visión determinista, en función solo de las características físicas del estímulo sonoro. Desde este planteamiento, la respuesta ante el ambiente sonoro, medida generalmente desde el punto de vista de la molestia, es una respuesta que valora distintos aspectos del sonido: por un lado, su intensidad y, por otro, sus aspectos cualitativos.

Con este enfoque, se considera que los sujetos no responden de una manera pasiva a las condiciones del ambiente sonoro, sino que dichas respuestas se encuentran mediadas por una serie de variables no acústicas, relacionadas con la situación y el contexto en los que es percibido el ruido, así como con las características sociales y culturales de la persona que percibe el sonido.

### **9.1.12. Medición de la calidad sonora**

Las mediciones acústicas del nivel sonoro tienen por objetivo valorar el grado de afectación sobre las personas. Pero también se mide el sonido para controlar su calidad, es decir, para comprobar que el contenido espectral es el deseado. Estas técnicas se aplican a la reproducción musical tanto de instrumentos naturales como amplificados y electrónicos. Para los sonidos procedentes de los instrumentos naturales, es fácil hacer

la comparación entre el sonido original y el amplificado y sacar conclusiones. Sin embargo, para la música electrónica (instrumentos electrónicos), no hay un estándar que defina cómo debe ser cada sonido y, por tanto, estrictamente en estos casos no se puede hablar de calidad sonora. Los sonidos en la música electrónica se han ido estereotipando a medida que la tecnología ha introducido novedades y mejoras en los sistemas, principalmente en los soportes de grabación-reproducción y en los sistemas electroacústicos (altavoces). El concepto clásico de alta fidelidad o calidad del sonido, queda desdibujado cuando reproducimos música electrónica.

Los equipos profesionales de grabación-reproducción de sonido actuales son en su inmensa mayoría digitales. La tecnología digital permite hacer ediciones del sonido de una manera fácil, rápida y transparente, sin alterar la señal original con ruidos no deseados, como ocurre con los equipos analógicos. Las técnicas digitales aplicadas a la música de origen electrónico permiten experimentar con efectos, así como la creación de nuevos sonidos.

#### **9.1.12.1. Primeros equipos public address**

La sigla PA, del inglés *public address*, significa ‘aviso al público’. Los primeros sistemas aparecieron en la década de los cincuenta con prestaciones y potencias muy contenidas, pero que en su momento significaron todo un reto. Estos equipos estaban pensados para enviar mensajes al público presente en cualquier acontecimiento deportivo, social o festivo. La música reproducida a través de estos medios era de muy baja calidad y tenía como función la llamada «música ambiente». Los primeros equipos de PA eran a válvulas electrónicas y ofrecían unas potencias muy limitadas. Por otro lado, la impedancia eléctrica de salida de estos dispositivos es elevada y no permite conectar directamente un altavoz. Es necesario usar un transformador que adapte ambas impedancias para transferir la máxima energía del amplificador al altavoz.

La distancia entre los altavoces distribuidos por las zonas con público y los amplificadores podía ser bastante considerable, de manera que, para no perder potencia en los altavoces (baja impedancia), se precisaba de cable con una sección de cobre notable, incrementando bastante el coste y el peso de los cables. Para solucionar este problema, los altavoces también tenían que llevar un transformador para adaptar su impedancia (típicamente, de 4-8  $\Omega$ ) directamente a la salida del amplificador a válvulas, que, por una cuestión de aislamiento galvánico, también tenían un transformador. La idea de reducir la sección del cable implicaba incrementar la impedancia de la línea de altavoces. La intensidad se reduce de forma inversamente proporcional al aumento de la tensión. El transformador es un dispositivo con pérdidas y no linealidades que afecta tanto al rendimiento como a la respuesta en frecuencia del altavoz y, sobre todo, al control del desplazamiento de su cono.

Con la llegada de los primeros transistores al mercado a finales de los años cincuenta, los amplificadores pasaron a ser de estado sólido. La salida de estos equipos es de baja impedancia, que permitía controlar directamente a los altavoces, pero se siguió usando el transformador para evitar las pérdidas en la línea de distribución. Los equipos de PA actuales integran muchas funciones, como sistemas de alarma, avisos preferentes y un largo etcétera, aunque se utiliza la misma configuración de base.

La calidad acústica de estos equipos no permite reproducir bajas frecuencias en toda su magnitud, por el efecto del transformador. En consecuencia, los equipos llamados de PA eran equipos rudimentarios pensados para sonorizar señales con una banda pasante muy limitada, como la voz humana. La primera locución amplificada de la que hay constancia está registrada en San Francisco en el año 1915, usando un equipo Magnavox (a válvulas) de 10 W, para sonorizar un discurso de Navidad dirigido a una multitud de 100.000 personas, según consta en la prensa de la época, que podemos ver en la figura 9.58.



**Figura 9.58.** Imagen del primer equipo de PA de la historia. Sonorización de un discurso navideño en directo en San Francisco (1915) con un equipo de 10 W ante 100.000 personas.

Aunque no está documentado, a pesar de que, como se aprecia en la foto, el altavoz disponía de una bocina (que aumentó notablemente el rendimiento acústico), era la primera vez que unas personas escuchaban una locución amplificada, y se supone que se hizo un gran silencio que permitió a la mayoría de asistentes escuchar «en directo» ese discurso. Destaca que la potencia empleada fue de 0,0001 W/persona, muy lejos de los 20 W/persona de los sistemas de refuerzo musical actuales. Se aprecia que la bocina no está orientada al público, probablemente debido a la rigidez del sistema.

### 9.1.12.2. *Primer concierto con public address en espacio abierto*

La primera sonorización de una actuación musical ante un público de 55.600 personas se hizo en el Shea Stadium de Nueva York, en el concierto de los Beatles en 1965. Los Beatles llevaban uno de los equipos de sonido más potentes en ese momento, formado por un sistema VOX con cinco altavoces de gran volumen y cinco amplificadores de 100 W (a válvulas), que era lo más avanzado en tecnología a nivel mundial. Desde el principio, se vio que sonorizar adecuadamente todo el público sería imposible, puesto que en aquel momento no se disponía de equipos de sonido con suficiente potencia para cubrir toda la zona de público. Para la ocasión se diseñaron las primeras agrupaciones lineales de altavoces, dirigidos hacia las gradas y situados entre el escenario y el público. En total, el refuerzo estaba formado por 30 cajas con 6 altavoces por caja. Las primeras filas de público estaban a unos 35 m, y las más alejadas, a 150 m. El equipo de los Beatles estaba situado a unos 75 m de las primeras filas de público y a unos 190 m de las últimas. Entre ambos equipos de sonido se producía un retardo de 120 ms que resultó ser un auténtico desastre, por lo que rápidamente se desconectó el «refuerzo» perimetral.

En total, se usaron 30 columnas de 25 W cada una. La prensa de la época describió la actuación de apenas 30 minutos como un griterío constante que dificultó escuchar la actuación de los Beatles. Con el equipo de los Beatles sonando, los niveles sonoros se situaron entre los 86 dB y los 78 dB (sin distorsión) para las primeras filas de público y las últimas. Sin embargo, el griterío de las fans fue ensordecedor. La prensa de la época describe cómo se tapaban los oídos los agentes de seguridad que estaban en el campo. Las referencias en la prensa de la época apuntaban a un nivel sonoro de 120 dB. Lamentablemente, no hay ninguna medición del nivel sonoro.

Los amplificadores a válvulas permiten expresar mucho la potencia disponible, es decir, aunque distorsionan, esta no resulta desagradable y el nivel sonoro puede aumentar notablemente. Se estima que el nivel sonoro (con distorsión) podría situarse sobre los 96 dB y 88 dB aproximadamente sobre la zona de público. La realidad expuesta por los propios Beatles fue que no se escuchaban entre ellos y tocaban acompasados gracias a su destreza.

La figura 9.59 muestra unas imágenes de los equipos utilizados en el primer concierto en espacio abierto de los Beatles en 1965 en el Shea Stadium. Se observa en blanco y negro una visión general antes de la actuación donde se distinguen unos puntos blancos en círculo cerca del público, que son las agrupaciones de refuerzo. Abajo, a la izquierda, se aprecian estas agrupaciones sobre el césped, donde se observa una orientación y elevación poco precisa. Abajo, a la derecha, uno de los amplificadores a válvulas Altec 1570 que se conserva, donde se pueden observar los cuatro pentodos de salida en configuración *push pull*. Arriba, a la derecha, un detalle de las agrupaciones de altavoces Altec A30, diseñadas *ad hoc* para la ocasión.



**Figura 9.59.** Imágenes del primer concierto amplificado en espacio abierto de la historia, con la actuación de los Beatles en el Shea Stadium en 1965.

En 1965, ya existían los amplificadores a transistores, pero no eran muy fiables debido a que los primeros equipos usaban transistores de germanio, que eran bastante inestables con la temperatura y, al trabajar con niveles elevados de potencia, literalmente se fundían. Con la aparición de la tecnología basada en el silicio, a finales de la década de los sesenta, se consiguió diseñar amplificadores de potencias muy superiores a las que podían ofrecer las válvulas sin los problemas de inestabilidad térmica. Esto permitió una eclosión de sistemas de sonorización con elevadas potencias en la década de los setenta.

### **9.1.12.3. Equipos de public address actuales**

Sorprende que hoy en día se use este término para referirse a los sistemas de sonorización de los grandes festivales y conciertos musicales, que ofrecen un sonido realmente espectacular y consiguen una alta definición sonora con unos niveles de presión acústica impresionantes. Los sistemas electroacústicos actuales empleados para sonorizar grandes espacios ofrecen unas características muy concretas que cubren las necesidades de los nuevos sonidos creados por la música electrónica.

La principal diferencia respecto a los equipos PA tradicionales, al margen de la mayor potencia radiada, es un sonido «nítido» y una precisión en la reproducción de las señales electrónicas. Para poder conseguir esto, se precisa de unos altavoces capaces de reproducir las señales enviadas. Cuando se diseña un altavoz, se debe elegir entre calidad o nivel sonoro radiado. Ambas cualidades no son compatibles para un único altavoz. Un altavoz destinado a reproducir la señal de audio con una fidelidad excepcional no puede radiar niveles

elevados de sonido, mientras que un altavoz destinado a radiar elevados niveles sonoros no puede ofrecer una fidelidad excepcional. La tecnología de los altavoces electrodinámicos tiene su origen en el año 1925, cuando se comercializa el primer modelo. El principio de funcionamiento básico no ha cambiado, pero sí la tecnología de algunos de sus elementos.

Los altavoces actuales con un sistema de PA están diseñados para radiar elevados niveles sonoros y reproducir las señales electrónicas generadas. Con estos altavoces no podemos reproducir fielmente el sonido de un instrumento natural, porque, comparado con este, las diferencias van a ser destacables. Se trata de generar sonidos que sean novedosos y el altavoz debe reproducirlos lo mejor posible.

La mejora en la linealidad de las suspensiones del cono y de la interacción entre la bobina y el campo magnético interior han permitido desarrollar altavoces con un desplazamiento de cono impensable unos años atrás. El resultado es un mayor rendimiento y un mayor control del desplazamiento del cono. Esto es especialmente importante en los altavoces para bajas frecuencias, donde se consiguen niveles sonoros muy elevados. Gracias a la electrónica y al procesado de señal que incorporan los amplificadores actuales de PA, se mejora la respuesta del conjunto, permitiendo un sonido de elevadas prestaciones donde el grave es contundente hasta frecuencias cercanas a los 30 Hz, un reto imposible unas décadas atrás.

Para poder transmitir baja frecuencia de una manera nítida, se requiere un rígido control sobre el desplazamiento del cono del altavoz en todo momento. Este control solo se puede hacer con amplificadores de potencia con salidas de muy baja impedancia y elevado *damping*, que permiten controlar eficazmente la corriente que pasa por el altavoz y, por tanto, el desplazamiento del cono. Nótese que para aplicar 1.000 W eficaces a un altavoz de 4  $\Omega$  se precisan 7,9 A, lo que representa tener picos de intensidad superiores a los 13 A. Actualmente, las etapas de potencia se montan lo más cerca posible de los altavoces, para evitar longitudes de cables excesivas que se traduciría en pérdidas de señal y en un sonido no tan nítido, al perder control sobre el desplazamiento del cono del altavoz. El control Ethernet del sistema de sonido permite una supervisión y un control total del sistema desde el control de sonido (FOH).

La configuración del sistema PA situado en un escenario es la conocida como L-R, o sea, la estéreo «de toda la vida». La configuración estéreo originalmente obedece a la necesidad de permitir la reproducción de los sonidos procedentes de una orquesta o agrupación de músicos, que se encuentran en unas posiciones claramente definidas, para que el espectador, situado en una zona «central» entre ambos altavoces, tenga la sensación de procedencia del sonido, ubicando los instrumentos a izquierda, centro o derecha, y eso permitía reproducir la experiencia sonora como si el oyente estuviera en la sala de conciertos. La idea original y las primeras pruebas «bicanal» se hicieron en 1881 en París. Sin embargo, la tecnología estéreo, como la conocemos hoy, nació en los años treinta. Esta tecnología permite al espectador escuchar el sonido en su casa como si tuviera la orquesta delante.

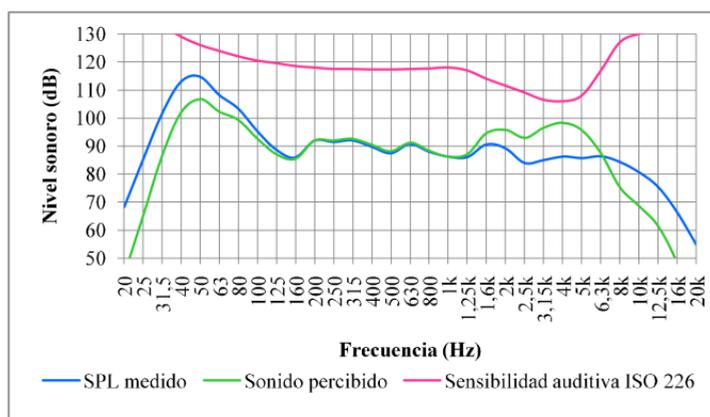
La música electrónica se genera desde un teclado o cualquier otro instrumento electrónico que no tienen una posición definida en el espacio. Los sonidos de los distintos instrumentos electrónicos se mezclan, se procesan y se editan sin necesidad de un control panorámico, salvo para conseguir algún efecto. Entonces, ¿por qué se sigue utilizando la configuración L-R para reproducir música electrónica?

La inmensa mayoría de las sesiones de música electrónica que se programan actualmente son en estéreo. Eso permite crear efectos con sonidos envolventes, da sensación de amplitud y presencia y, además permite unas producciones mucho más trabajadas que mejoran la experiencia de los usuarios.

#### 9.1.12.4. Medida de la calidad de sonido

Para controlar y evaluar la calidad sonora, los buenos profesionales se guían por su oído, ayudados por equipos que siempre miden igual. Para valorar el contenido espectral, se utiliza el análisis en tercio de octava, porque esta resolución de frecuencia es la que más se asemeja a la humana. Los niveles sonoros se pueden obtener a partir de estos espectros, con o sin ponderación A.

Como es sabido, la sensibilidad auditiva y, por tanto, la forma en cómo escuchamos el sonido, depende del volumen de este. A mayor nivel sonoro, la respuesta del oído es más plana y no es necesario enfatizar tanto las bajas y las altas frecuencias para compensar la deficiencia auditiva. La figura 9.60 muestra un caso real con el nivel sonoro medido en el control de sonido de una sesión de música EDM en espacio abierto.



**Figura 9.60.** Nivel sonoro medido en el control de sonido de una sesión de música EDM en espacio abierto. Curva azul: espectro en frecuencia medido en el control de sonido. Curva roja: curva de sensibilidad auditiva según ISO 226. Curva verde: señal espectral realmente percibida por el oído humano.

Se observa claramente que lo medido no se corresponde con lo que se escucha. Debería utilizarse correctamente la potencia que nos brinda la tecnología para presentar la información sonora real percibida por las personas. Aunque las curvas de igual sonoridad de la norma ISO 226 se han obtenido en campo libre con sonido frontal, escucha diótica y tonos puros de corta duración, que no son las mismas condiciones que en un festival de música, la sensibilidad auditiva a estos niveles superiores a los 100 fonios supone una aproximación razonable para explicar el fenómeno.

Como muestra la figura 9.60, hay una clara enfatización entre las bandas bajas (40-63 Hz) respecto del resto de bandas, que se mantiene con el paso del tiempo. El desnivel supera los 20 dB. En potencia, significa que las bandas de baja frecuencia (20-100 Hz) se llevan el 97,5 % de la potencia, y el resto de bandas (100-20 kHz), solo el 2,5 % de la potencia total. Sin duda, esta enfatización no obedece a una necesidad de compensar la falta de sensibilidad auditiva, sino más bien de buscar un sonido espectacular y artificial que no existe en la naturaleza.

Nótese que, cuando se asiste a una sesión de jazz con instrumentos naturales sin amplificación, no se produce esta desproporción tan exagerada, y eso se traduce en que este tipo de eventos no causa problemas de contaminación acústica. Sin embargo, la misma sesión de jazz pero amplificada y «maquillada» con compresiones *ad hoc*, generan niveles sonoros con un elevado grado de energía a baja frecuencia que suele ser el origen de las quejas por contaminación acústica. Sería aconsejable volver al sonido natural, respetando las dinámicas y características de los instrumentos naturales. Lamentablemente, los instrumentos electrónicos no tienen un sonido «original» que sirva de referencia, como los instrumentos naturales.

# Capítulo 10.

## El paisaje sonoro

### 10.1. Introducción

El entorno sonoro puede considerarse en relación con el término paisaje sonoro. Los Acuerdos de la Convención Europea del Paisaje (Europa, 2000) definieron el paisaje como un área, tal como la perciben las personas, cuyo carácter es el resultado de la acción e interacción de factores naturales o humanos. Las interpretaciones que se pueden dar sobre el término *paisaje sonoro* pueden ser tan diversas como las diferentes interpretaciones que la gente ya tiene de su paisaje homónimo. Por ejemplo, este último puede incluir el paisaje como forma geográfica, el paisaje como sistema de componentes físicos, el paisaje como determinante y reflejo de la cultura (pintura, literatura y música), el paisaje como lugar de actividad recreativa y el paisaje en la actividad de diseño de la planificación del paisaje o la arquitectura. Una diversidad similar se aplica a las interpretaciones/aplicaciones del término *paisaje sonoro*.

El concepto de paisaje sonoro tiene diferentes definiciones. Un estudio define al paisaje sonoro como toda la energía sonora producida por el paisaje (Almo, 2014). El *Manual de ecología acústica* define paisaje sonoro como «un entorno de sonido (o entorno sónico) con énfasis en la forma en que lo percibe y lo entiende el individuo o la sociedad» (Truax, 1999). A nivel general, un paisaje sonoro son todos los sonidos que se perciben en un lugar determinado, ya sea urbano o no. Dependiendo de la experiencia de cada persona, la capacidad de discernir los diferentes sonidos no resulta evidente, ya que estos se presentan mezclados de forma totalmente aleatoria.

Comprender el análisis de la escena auditiva humana y el importante papel de la atención auditiva, nos permite esbozar mejores métodos de evaluación del paisaje sonoro y llegar a metodologías mejoradas para diseñar paisajes sonoros deseables dentro de un contexto específico y para un uso concreto. El sonido ambiental por definición, no es el foco principal de atención de una persona sumergida en él.

Los paisajes sonoros suelen contener muchos sonidos, que se producen simultáneamente o por separado en el tiempo. Estos sonidos pueden ser considerados positivos (por ejemplo, los sonidos naturales) o negativos (por ejemplo, el tráfico rodado intenso). A pesar de esta complejidad, el paisaje sonoro se puede evaluar de manera significativa. Por ejemplo, el paisaje sonoro en un parque «tranquilo» puede percibirse como más agradable, más relajante, menos molesto y menos estresante que el paisaje sonoro en una acera cerca de una carretera muy transitada (Nilsson & Berglund, 2006).

Diversos estudios (Kerrick, Nagel, & Bennett, 1969) (Gabrielsson & Sjögren, 1979) (Björk, 1985) sobre paisajes sonoros han incluido un conjunto limitado de ambientaciones sonoras o un conjunto limitado de atributos de percepción o ambos, y, por tanto, han dado como resultado una gran variabilidad en las dimensiones propuestas para subyacer a la percepción del paisaje sonoro. La principal dimensión encontrada en varios estudios se relaciona con la preferencia o el agrado. Además, algunos estudios han encontrado una segunda dimensión relacionada con la actividad o variabilidad en los paisajes sonoros (Berglund, Eriksen, & Nilsson, 2001) (Nilsson & Berglund, 2006) (Cain & Jennings, 2009) (Kawai, Kojima, Hirate, & Yasuoka, 2004) (Rainbault & Dubois, 2005).

No solo la composición del entorno acústico determina qué sonidos se perciben, sino también la atención, las actividades actuales y las expectativas del oyente y su conocimiento previo de los sonidos que se pueden escuchar. Dado que la atención es en gran medida multisensorial y los estímulos multisensoriales pueden en parte vincularse a una sola percepción incluso antes de la atención, el contexto visual y la visibilidad de la fuente desempeñan un papel importante en su evaluación subjetiva.

La secuencia de sonidos tanto percibidos conscientemente como subliminales puede influir en la valoración del entorno acústico. La predictibilidad conduce a una valoración positiva porque el éxito de la predicción provoca una emoción estética (Leder H., 2004).

Los estudios *in situ* en parques urbanos y espacios verdes abiertos sugieren que las propiedades «informativas» de los paisajes sonoros (es decir, las categorías de sonidos) son mejores predictores de la calidad sonora percibida del paisaje sonoro que las propias mediciones acústicas del paisaje sonoro, como el nivel equivalente,  $L_{Aeq}$  (Nisson, Botteldooren, & De Coensel, 2007) (Barti & Vida, 2018). Estos estudios indican que las personas tienden a percibir los sonidos naturales (como el canto de los pájaros o los sonidos del agua en movimiento) como componentes positivos del paisaje sonoro a pesar de que sus niveles en ocasiones superan notablemente el nivel de sonido ambiente. En cambio, el ruido del tráfico y otros sonidos artificiales generados por el humano a menudo se perciben como componentes negativos (Guastavino, 2006).

### 10.1.1. Origen del término *soundscape*

Uno de los trabajos de investigación más reciente sobre la autoría del término *soundscape* se publicó en el año 2016 en el *Aegean Journal of Environmental Science*, con el título «The interdisciplinary Development of the Term “Soundscape”; Tracing its Ecological Roots». Los autores fueron Yiannis G. Matsinos, Aggelos Tsaligopoulos y Chris Economou, del Departamento de Medioambiente de la Universidad de Aegean, en Grecia.

El trabajo llevó a cabo una búsqueda del término *soundscape*. Se analizaron unas 3.200 referencias publicadas entre los años 1969 y 2011, 979 de las cuales se consideraron válidas. Las bases de datos consultadas fueron: Google Scholar, Web of Science (*knowledge*) y Google Search. El resultado del trabajo atribuye la autoría del término *soundscape* a Murray Schafer por un trabajo iniciado en el año 1969 titulado: *The World Soundscape Project*, publicado en tres áreas: *a*) ciencias sociales, arte y humanidades; *b*) ingeniería, ciencia computacional y matemática, y *c*) biología, ciencias de la vida y del medioambiente. En todas ellas se incorporó el término *soundscape*.

Sin embargo, en el año 1967, el arquitecto Michael Southworth había publicado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) su trabajo para optar al máster en Planificación Urbana con el título: «The Sound Environment of Cities». El término *soundscape* aparece citado cinco veces en el resumen (*abstract*) y también en el posterior desarrollo del trabajo de máster. Michael Southworth es actualmente (2022) profesor emérito en el MIT y doctorado en planificación arquitectónica y urbanística por el MIT con una extensa lista de publicaciones en el ámbito arquitectónico.

Carlotta Darò, en su obra *Avant-garde sonore en architecture* (Darò, 2013), publica una entrevista con Murray Schafer en la que este reconoce que la expresión *soundscape* es original de Michael Southworth.

En su inicio, el término *soundscape* («paisaje sonoro») se asoció al sonido exterior en las poblaciones. No obstante, la evolución de los estudios en la materia estas últimas décadas ha posibilitado la aparición de variantes del término o concepto original. Actualmente, el término *paisaje sonoro* también puede aplicarse a espacios interiores. La razón hay que buscarla en la creciente necesidad de reflejar mediante datos objetivos las reacciones de las personas expuestas a esos sonidos. Nótese que en general no se usa el término *ruido*, sino *sonido*, dado que este es más neutro que el primero.

El enfoque del paisaje sonoro proporciona un método para desarrollar indicadores que describen la percepción sonora de las personas con respecto a sus condiciones físicas y su relevancia para la vida. Esos parámetros deberían permitir medir de forma fiable la calidad del sonido, que tendrá en cuenta las características de los sonidos que provocan reacciones humanas específicas, tanto positivas como negativas: bienestar, tranquilidad, excitación, calma, molestia, descontento, ansiedad, etc., así como los efectos patógenos.

Resulta interesante determinar la contribución de las fuentes importantes, como el ruido del tráfico y su influencia en las evaluaciones de los residentes.

La pregunta clave es: ¿en qué medida una fuente sonora determina el paisaje sonoro del entorno con respecto a la percepción y la evaluación? Esta cuestión no tiene una respuesta fácil, dada la elevada subjetividad de la percepción sonora por parte de las personas y la falta de indicadores objetivos (métricas) de la calidad sonora.

Existe la necesidad de correlacionar el lenguaje de las personas con las métricas e introducir los métodos cualitativos de la psicología y la sociología en el análisis de ingeniería, combinando herramientas cuantitativas y cualitativas para la valoración del paisaje sonoro. El análisis del paisaje sonoro debe colocar el sonido en contexto, con el ruido y el sonido vinculados a la actividad en sitios de estudio realistas. Hay que distinguir entre el concepto de *paisaje sonoro* y la idea limitada de una *zona tranquila*, que, evidentemente, no son lo mismo.

Es importante destacar que los parámetros físicos medibles y los aspectos subjetivos no medibles tendrán una relación única vinculada a cada comunidad y contexto de vida específicos y que están relacionados con el entorno socioeconómico y el estilo de vida específico.

### 10.1.2. Primer paseo sonoro

Southworth desarrolló el primer paseo sonoro de la historia, con 33 puntos por el centro de Boston, un extenso y riguroso trabajo de lectura obligada para conocer los orígenes del paseo sonoro (Southworth, 1967). La figura 10.1 muestra una vista aérea con los puntos marcados del primer paseo sonoro de la historia. En 1967 solo se disponía de fotos aéreas que tuvo que preparar diversas fotografías aéreas, para marcar la ruta. En cada punto se hicieron observaciones en distintos días de la semana y varias veces al día para tratar de obtener unos resultados correctos.



**Figura 10.1.** Recorrido del primer paseo sonoro de la historia, creado por Southworth en 1967.

Se llevaron a cabo mediciones del nivel sonoro con un sonómetro en bandas de octava. Estos equipos eran 100% analógicos y no disponían de memorias, por lo que la función  $L_{eq}$  no se podía ofrecer. Para suplir esta carencia, el observador tenía que estar pendiente constantemente del indicador de aguja del equipo de medida mientras iba escuchando el sonido y, a su vez, ir anotando lo que acontecía. Tampoco podía obtener el espectro en frecuencia de la señal, que se tenía que hacer después a partir de las grabaciones de audio.

El análisis de frecuencia por bandas de octava se tenía que repetir tantas veces como bandas analizadas, ya que el equipo solo podía medir el nivel sonoro en la banda seleccionada. Si se repetía la medición varias veces, el sonido en cada medición sería distinto, por lo que se optó por grabar el sonido en cinta magnetofónica. Con las grabaciones de nivel sonoro, se reproducía la grabación tantas veces como bandas se analizaban. Para suplir la carencia del indicador  $L_{eq}$ , se recurría a «dibujar» la evolución del nivel sonoro en un registrador gráfico y manualmente se hacían cálculos para determinar «con mayor precisión» el nivel  $L_{eq}$ . Sin embargo, solo fue posible aprovechar esta facilidad en las calles con más nivel sonoro, ya que la sensibilidad del grabador era limitada, según comenta el propio autor.

Para facilitar la clasificación de sonotipos de una manera cómoda y rápida, Southworth ideó unos símbolos (que se reproducen en la figura 10.2) mediante los cuales el observador, en el paseo sonoro, anotaba la tipología de sonidos que iba percibiendo. Previamente, se anotaron los sonidos que se podían escuchar en distintas calles de la ciudad, para poder definir la simbología sin olvidar ningún sonido.

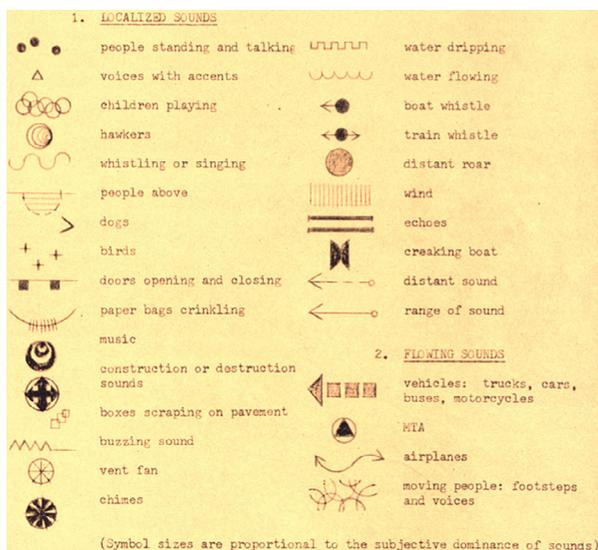
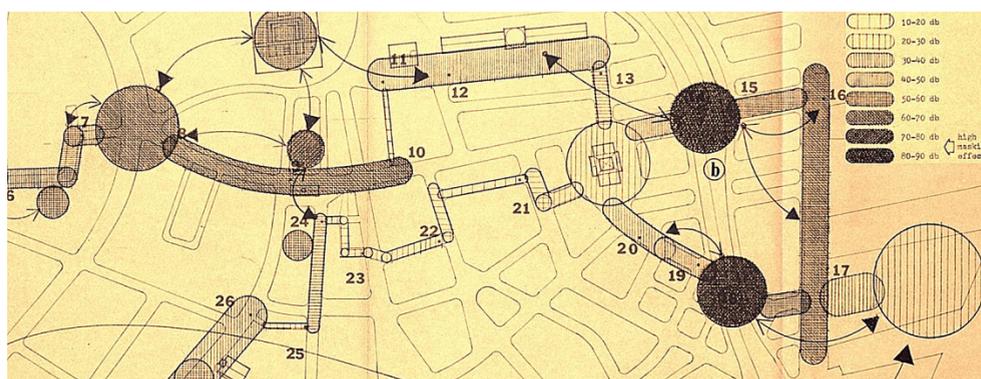


Figura 10.2. Simbología para indicar los sonotipos escuchados durante el primer paseo sonoro de la historia.

De la observación y medición del nivel sonoro efectuado en los distintos puntos, Southworth ideó una manera fácil y simple de representar los niveles sonoros a modo de «mapa de nivel sonoro», esbozando unos trazos con distinto sombreado sobre las calles analizadas. La figura 10.3 muestra un fragmento del paseo sonoro con los niveles sonoros medidos en las calles. A la derecha de la imagen se puede ver la escala de nivel sonoro en dB. Nótese que, al margen del sombreado, el grosor del trazo estaba relacionado con el nivel sonoro medido (a mayor nivel, mayor grosor), lo que permitía ver rápidamente las calles donde había más nivel sonoro. Hoy en día se utilizan colores, ya que de esta manera no se altera la morfología de las calles.



**Figura 10.3.** Representación del nivel sonoro en las calles mediante sombreado.

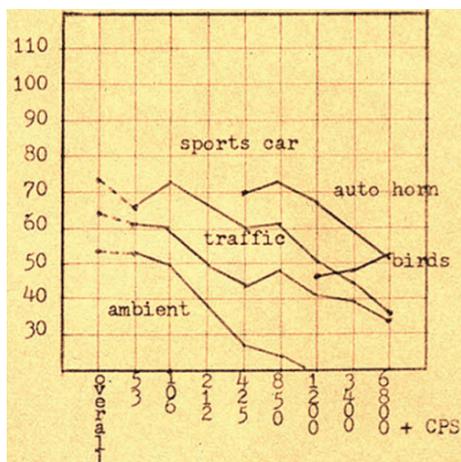
El análisis por bandas de octava realizado a partir de las grabaciones se muestra en la figura 10.4. A pesar de las limitaciones técnicas de la época, obtuvo resultados interesantes. En esta figura se aprecian los espectros del sonido ambiente (sin tráfico), del sonido de tráfico, del sonido de vehículos deportivos, del sonido de bocinas y, por último, de pájaros. Aunque no aparece en el gráfico, los niveles se representan con la ponderación A.

Es destacable que los coches deportivos de la época emitían unos 10 dBA más de ruido que el resto de vehículos. La gráfica «ambient» reflejaba el nivel sonoro sin tráfico, con un nivel global de unos 53 dBA. Nótese que las bandas de octava no coinciden con las actuales. En el año 1967, las frecuencias centrales de las bandas de octava eran distintas en el continente americano respecto al europeo.

#### 10.1.2.1. Primer experimento

El propósito de este experimento fue estudiar la percepción del entorno sonoro independiente de la visión. La preocupación principal era determinar cuánto se podía decir sobre la ciudad con solo escucharla, y también cómo la percepción del paisaje sonoro

cambia con el tiempo y bajo diversas condiciones climáticas. Un propósito secundario fue probar previamente las técnicas experimentales para el estudio del entorno no visual en general.



**Figura 10.4.** Espectro de diferentes fuentes de sonido.

Se llevó a los sujetos en silla de ruedas, comenzando en el escenario 1 y terminando en el escenario 33. Se les vendaron los ojos para sensibilizarlos al sonido eliminando los estímulos visuales. La silla de ruedas eliminó los problemas de ansiedad que habrían resultado de caminar sin experiencia con los ojos vendados. El viaje se realizó en diferentes momentos del día y de la semana y bajo diferentes condiciones climáticas para estudiar el patrón temporal de los sonidos.

Se pidió a los sujetos que dijeran lo que podían escuchar mientras llevaban a cabo el paseo sonoro. Se animó a todos los sujetos a utilizar sonidos hechos por sí mismos, como aplausos, silbidos o gritos, para probar el carácter de los espacios en los que se encontraban (reconocimiento sonoro del espacio).

Todos los comentarios durante el viaje fueron registrados en forma de nota por un asistente. La técnica de toma de notas redujo el tiempo de viaje habitual de un peatón de una hora y media a dos horas. Después del paseo, se pidió a todos que dibujaran un mapa de la secuencia tal como la recordaban. Luego se les preguntó informalmente sobre sus experiencias más memorables y se les pidió que las clasificaran de acuerdo con sus preferencias; lo mismo se hizo con los sonidos. También se les preguntó qué tipo de pistas les daban más información sobre los lugares y cómo se podría haber mejorado el viaje.

### **10.1.2.2. Segundo experimento**

En este experimento, el propósito principal fue investigar las interacciones entre la percepción de los entornos visual y sónico. Además, se deseaba perfeccionar las técnicas del experimento 1 y también explorar algunas técnicas nuevas.

Para probar las interacciones entre la vista y la audición, tres sujetos diferenciados sensorialmente fueron expuestos a la configuración simultáneamente. Estas eran:

- Audición: sujetos que podían oír pero no ver.
- Visión: sujetos que podían ver pero no oír.
- Audición y visión: sujetos con audición y visión normales.

Esta especialización en el tema facilitó el análisis de las interacciones sensoriales porque las respuestas a los entornos se podían analizar por separado, así como en conjunto. Dado que el paisaje sonoro está cambiando, era imperativo que cada grupo estuviera expuesto a la configuración simultáneamente.

Aunque es extremadamente difícil prevenir la sensibilización de los sujetos a la audición o la visión, los sujetos que oyen y ven actúan como controles sobre otros sujetos, al no estar especializados. Además, a pesar del aparato visible, la mayoría de los sujetos no sabían qué se estaba probando. Los sujetos participantes estaban con los ojos vendados y en una silla de ruedas como antes, ya que esto había demostrado ser bastante exitoso en el experimento 1.

### **10.1.2.3. Resultados obtenidos**

#### *1. Identidad: singularidad e información*

Los entornos más dominantes fueron aquellos que estaban más contrastados o eran más singulares en relación con todos los demás entornos y los eventos inmediatamente anteriores y siguientes en la secuencia. También tendían a ser más informativos de la forma espacial y de actividad, siendo los sonidos novedosos más informativos que los redundantes.

#### *2. Entorno deseable*

Los escenarios preferidos, además de ser altos en singularidad e información, eran los más receptivos y permitían una mayor participación del receptor, mientras que los escenarios menos preferidos eran menos informativos, redundantes y en general muy llamativos, con sonidos de mayor intensidad y frecuencia.

#### *3. Refuerzo visual-auditivo*

Los entornos visuales-auditivos dominantes tenían actividad visible y características espaciales que estaban respaldadas por los sonidos, siendo tanto la forma sónica

como la visual única e informativa. Los entornos con una forma visual no solidaria, es decir, una forma que era débil o contradictoria con los sonidos, eran menos dominantes.

### 10.1.3. Entendiendo el paisaje sonoro

El término *paisaje sonoro* se puede interpretar como el sonido que se escucha en una ubicación específica, generalmente dentro de un entorno urbano, aunque el término también puede ser utilizado para describir ambientes sonoros en entornos naturales.

En general, existe una gran experiencia acumulada durante varias décadas en el control y la reducción del nivel sonoro de fuentes de ruido no deseadas. Este control permite no solo reducir el nivel sonoro, sino alterar su contenido espectral, siempre con el objetivo de minimizar el impacto acústico producido por distintas fuentes sonoras sobre la población. Aprovechar esta experiencia quizá sería ventajoso para el diseño de paisajes sonoros.

Para mejorar o alterar un sonido, la técnica más eficaz es analizarlo. Con ello se puede extraer toda la información útil y, posteriormente, y en función de estos resultados, mejorar o modificar este sonido. Aplicando esta técnica al diseño o a la mejora de un paisaje sonoro, se efectúa un análisis de este con el fin de construir un enfoque que sea armonioso con el enfoque «clásico» del control del ruido. El enfoque clásico se centra en una fuente de ruido a la vez, y todas las herramientas y la experiencia que utilizamos para controlar el ruido están especializadas en un tipo particular de ruido.

La calidad del paisaje sonoro no solo tiene en cuenta los sonidos no deseados, sino también la incorporación o recuperación de aquellos sonidos que son en general deseables. En este proceso hay dos cuestiones básicas a las que hay que dar respuesta. Por un lado, qué fuentes son menos deseables en un paisaje sonoro, y, por otro, qué fuentes sonoras son más deseables. Respecto a las primeras, generalmente no se pueden eliminar al 100%. Tal es el caso del ruido de tráfico, donde las acciones tratan de mitigar su nivel sonoro aplicando diferentes técnicas. En cuanto a las segundas, en general supone añadir esas fuentes deseables o esperadas al paisaje sonoro, pero siempre de forma armonizada con el entorno.

En resumen, el enfoque en principio más ventajoso para el diseño o la mejora de un paisaje sonoro sería deconstruir el paisaje sonoro actual en sus componentes indeseables y deseables para que cada uno pueda abordarse con las herramientas y la experiencia adecuadas con vistas a obtener el mejor resultado. Esa deconstrucción del paisaje sonoro implica, por un lado, la cuantificación de sus características sonoras mediante indicadores diversos. A estos indicadores se les llama *métricas*, ya que cuantifican en números distintos aspectos de los sonidos analizados.

Por otro lado, la valoración de la calidad del paisaje sonoro se complementa con una valoración subjetiva basada en la opinión de diversas personas que escogen de una

lista distintos calificativos para describir lo mejor posible ciertos aspectos de los sonidos escuchados. Normalmente, se usan unas escalas de nivel (por ejemplo, del 0 al 10 para una determinada expresión verbal), aspecto que permite modelar la respuesta. Dada la elevada variabilidad de respuestas ante el mismo sonido recibido por distintas personas, se tendrá que hacer un análisis muy delicado para obtener los valores que aparecen más veces. Eso conlleva que el diseño de un paisaje sonoro no puede ser nunca universalmente óptimo.

#### **10.1.4. Sostenibilidad sonora**

La sostenibilidad sonora en el diseño de paisajes sonoros implica actuar en la planificación, el diseño y la gestión para lograr ser amigables con el medioambiente, mejorar la calidad de vida, ser eficientes y sostenibles. La dimensión de la calidad de vida quizá es el aspecto más directamente relacionado con la percepción audiovisual que las personas tenemos frente a los espacios urbanos, aunque también se aplican a los espacios naturales con acceso de personas.

La mayoría de los lugares en los que vivimos, trabajamos, jugamos y por los que nos movemos se caracterizan no solo por el paisaje natural, los paisajes urbanos o la arquitectura, sino también por un paisaje sonoro característico. En términos de mejorar el paisaje sonoro, no son solo los aspectos indeseables de los sonidos los que deben ser considerados, sino la preservación o restauración de los sonidos deseables que están tapados o enmascarados por los sonidos llamados «indeseables». Si nuestros espacios de vida deben proporcionar satisfacción y calidad de vida, entonces se debe considerar la sonoridad que experimentamos con el objetivo de preservar o restaurar paisajes sonoros deseables.

Los sonidos de los paisajes naturales se componen de los sonidos biológicos emitidos por la fauna del lugar y los sonidos no biológicos que se producen por los elementos naturales como el discurrir del agua o el paso del viento. Los sonidos en entornos urbanos están generalmente dominados por fuentes sonoras artificiales que en ocasiones enmascaran los sonidos de procedencia natural.

Diversos autores apuntan a que el paisaje sonoro natural ofrece una mayor cantidad de información que el paisaje sonoro urbano, lo que redundaría en una progresiva desconexión entre humanos y naturaleza.

El paisaje sonoro urbano está saturado de señales sonoras que aportan poca o nula información y que son generalmente consideradas ruido no deseado por muchas personas. La mayoría de señales acústicas proceden de vehículos con propulsor térmico y máquinas rotativas. Estas señales acústicas presentan un espectro con niveles de energía significativos, por debajo de los 4 kHz.

### 10.1.5. Tranquilidad del paisaje sonoro

Los espacios pensados para que las personas se relajen, distraigan y recuperen la paz suelen tener una relación directa con la presencia de elementos naturales, como la vegetación, los saltos de agua y la fauna. El calificativo que mejor describe estos espacios es la *tranquilidad* que ofrece a sus visitantes. Recientes estudios han revelado que el cerebro humano maneja las entradas sensoriales de ambientes tranquilos de manera muy diferente a los ambientes no tranquilos, y subraya la importancia de tener en cuenta las interacciones audiovisuales para comprender los beneficios de los espacios tranquilos (Hunter, y otros, 2010).

La naturaleza en entornos rurales suele estar alejada de las ciudades y, en general, eso propicia que sea frecuentada por una pequeña parte de la población. Por este motivo, los entornos relativamente tranquilos en los espacios urbanos pueden ser más importantes para el bienestar de una buena parte de la población en lugar de los espacios rurales tranquilos, ya que brindan un medio de fácil acceso por el cual los habitantes de las ciudades pueden escapar de la sobrecarga cognitiva diaria que caracteriza la vida moderna.

Los entornos naturales pueden ayudar a la recuperación de la sobrecarga cognitiva al interactuar con entornos restauradores naturales que están lejos de las distracciones diarias y tienen la extensión y el encanto que permite que la imaginación pueda deambular, lo que permite a las personas interactuar sin esfuerzo con su entorno. Esto es la base de la teoría de restauración de la atención (Kaplan & Kaplan, 1989). Esta teoría se basa en el principio de que la cantidad de reflexión posible dentro de un entorno natural depende del tipo de compromiso cognitivo, es decir, el nivel de fascinación que genera el medioambiente.

Explicaciones teóricas para estos beneficios se obtienen de dos marcos principales:

- Teoría de la restauración de la atención, que propone un enfoque de procesamiento de información para las experiencias restaurativas (Kaplan S. , 1995).
- Teoría de la recuperación del estrés (Ulrich R. , 1983), que sugiere que las valoraciones afectivas de nuestro entorno son responsables de los resultados restaurativos.

La teoría de la restauración de la atención sugiere que los beneficios cognitivos y afectivos de la exposición a la naturaleza surgen a través de la reposición de los recursos cognitivos necesarios para dirigir o mantener la atención durante un período prolongado. Se propone que dicha reposición se produzca mediante el uso de una atención sin esfuerzo, lo que permite la recuperación de los recursos necesarios para una atención sostenida o dirigida.

Esta teoría sugiere que esta atención sin esfuerzo se compromete a través de estímulos que son fascinantes, y en particular aquellos que fomentan lo que se denomina *fascinación suave*; en otras palabras, no ocupan toda la atención de un individuo, sino que brindan la oportunidad de reflexionar.

Esta fascinación puede ser necesaria, pero no suficiente para la restauración completa: estos estímulos fascinantes deben ser parte de un entorno que genere una sensación de estar lejos, o escape psicológico de las demandas de atención dirigida; es compatible con los objetivos y deseos propios de una experiencia restauradora.

Se considera que una *fascinación suave* ocurre cuando hay suficiente interés en el entorno para mantener la atención, pero no tanto como para poner en peligro la capacidad de reflexión. En esencia, la fascinación suave proporciona un nivel agradable de información sensorial que no implica ningún esfuerzo cognitivo más que retirarse de un espacio mental abarrotado. Esto permite al cerebro «desconectar» sin centrarse en lo que le rodea. A nivel acústico, los sonidos percibidos no deben tener estridencias o connotaciones artificiales, y deben además ser los esperados por el ambiente visual.

Otros estudios que investigan los efectos sobre los niveles de estrés muestran que la recuperación del estrés mental es mucho más rápida cuando las personas están expuestas a entornos naturales en lugar de artificiales (Ulrich, Simons, Losito, Fiorito, Miles, & Zelson, 1991).

El concepto de *tranquilidad* ha sido motivo de diversos trabajos que culminan con una propuesta de la herramienta de predicción de calificación de tranquilidad desarrollada para uso profesional y que relaciona los factores ambientales con la calificación de tranquilidad mediante la ecuación 10.1 (Watts G. , 2018).

$$TR = 10,55 + 0,041 \cdot NCF - 0,146 \cdot L_{Aeq} + MF \quad (10.1)$$

Donde:

NCF es el porcentaje de características naturales y contextuales. Se determina experimentalmente mediante un análisis de la imagen visual 360 y se define mediante la ecuación 10.2.

TR es la calificación de tranquilidad en una escala de calificación de 0 a 11.

$L_{Aeq}$  es el nivel de presión sonora equivalente ponderado A del ruido artificial (por ejemplo, ruido de transporte).

MF es un factor de corrección que se añade a la ecuación, en función de la presencia de basura o grafitis, que deprecia el resultado, o ante la presencia de saltos o fuentes de agua, que potencia positivamente el resultado. Este ajuste es de 1 punto (negativo o positivo) en la escala final del TR.

$$NCF = \frac{\sum_1^7 \frac{\text{Área}_{\text{natural}} \cdot 100}{\text{Área}_{\text{total}}}}{7} \quad (10.2)$$

Donde:

$\text{Área}_{\text{natural}}$  es el área ocupada por elementos naturales (píxel).

$\text{Área}_{\text{total}}$  es el área total de la imagen (píxel).

Se excluye el cielo en ambos cálculos.

En algunos casos extremos, el valor predicho de TR se vuelve negativo debido a la técnica de regresión lineal utilizada para relacionar estas variables. En estos casos, el valor calculado se establece en 0. Cuando TR es mayor de 10, los valores se establecen en 11.

El escalado de TR sigue la valoración indicada seguidamente:

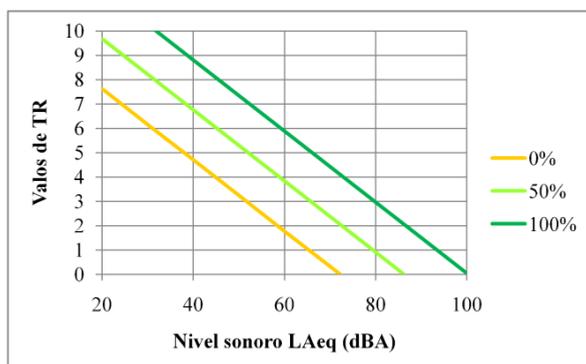
|           |             |
|-----------|-------------|
| < 5       | Inaceptable |
| 5,0 a 5,9 | Aceptable   |
| 6,0 a 6,9 | Buena       |
| 7,0 a 7,9 | Muy buena   |
| ≥ 8,0     | Excelente   |

Por ejemplo, la ecuación 10.1 predice que un aumento del 50% en NCF aumentará TR en aproximadamente 2 puntos, mientras que, si el nivel de ruido  $L_{\text{Aeq}}$  disminuye en 14 dBA, el TR disminuirá aproximadamente en la misma cantidad. Estas compensaciones se pueden utilizar para identificar medidas adecuadas para mejorar la tranquilidad de un paisaje sonoro.

La figura 10.5 muestra la relación entre  $L_{\text{Aeq}}$  y TR para tres niveles de NCF (0%, 50% y 100%). Las gráficas se han dibujado con el factor MF = 0. Para un determinado nivel sonoro, la mejora visual del paisaje mediante elementos naturales incrementa la puntuación en un máximo de 4 puntos. Esto demuestra gráficamente la importancia que supone la presencia de las componentes naturales de la escena visual, para la sensación de tranquilidad.

### 10.1.6. Influencia del paisaje sonoro sobre la calidad de vida

La mejora de la calidad de vida es quizás el principal objetivo. Los trabajos y estudios que se llevan a cabo en distintas partes del planeta tienen por objetivo mejorar la calidad de vida y la salud de las personas. Se sabe que la vida en las ciudades suele tener componentes elevados de estrés. El quehacer diario para muchas personas supone un sinnúmero de tareas, muchas rutinarias, que deben hacerse y que en ocasiones precisan soportar responsabilidades.



**Figura 10.5.** Tranquilidad del paisaje sonoro TR según G. Watts (2018).

Los ambientes sonoros en las ciudades pueden resultar muy molestos y estresantes para sus residentes. A pesar de que gran parte de la población residente en grandes ciudades considera que el ruido ambiente es una cosa propia de las grandes aglomeraciones, no exige de los efectos nocivos que supone estar sometido diariamente a sonidos no deseados.

La evidencia epidemiológica sobre el valor positivo intrínseco de áreas con alta calidad acústica, como áreas verdes/áreas silvestres/agua, es limitada. Para la restauración a través de la mediación, varios estudios mostraron que el acceso a la tranquilidad en el domicilio, o cerca de él, reduce las molestias en el hogar y también tiene un efecto beneficioso sobre la calidad del sueño y la presión arterial (de Kluizenaar Y., 2013).

El respiro temporal de la exposición al ruido ambiental no deseado en el domicilio puede mitigar los efectos negativos sobre la salud y el bienestar. Diferentes características del entorno físico cercano desempeñan un papel importante. Por ejemplo, el acceso a espacios verdes en las inmediaciones de las viviendas modera el efecto de molestia producido por el tráfico en la zona. En este sentido, la acción de «tapar» con vegetación la visión de los vehículos reduce el grado de molestia percibido por las personas, a pesar de tener el mismo nivel de presión sonora.

### 10.1.7. Ambientes sonoros

Uno de los sonidos que más está cambiando en las últimas décadas es el ambiente sonoro que hay en los lugares donde la gente puede estar, como las calles y plazas de las ciudades: es el llamado *paisaje sonoro*. Lógicamente, ha habido una evolución de la vida rural a la vida en ciudad y los ruidos en ambos casos eran y son muy distintos. La transición de la vida rural a la vida urbana puede ser caracterizada en cuanto al ambiente sonoro, como el paso del sonido Hi-Fi al Lo-Fi (alta fidelidad a baja fidelidad, en el sentido de calidad sonora). La causa es la pérdida de los sonidos y ritmos cotidianos que se

pueden encontrar en los ambientes naturales y no en los ambientes urbanos. Además, en los ambientes sonoros urbanos (Lo-Fi, baja calidad sonora) se producen sonidos con informaciones acústicas que entran en conflicto con los sonidos que queremos o deseamos escuchar (Ipsen D., 2002).

Diariamente tenemos nuevas experiencias sonoras. Si no detectamos nuevos sonidos, nuestra experiencia sonora diaria puede llegar a ser aburrida. En estos casos, en general se opta por dejar de prestar atención al sonido envolvente y no recordamos ningún sonido concreto. Nuestro sentido auditivo funciona perfectamente, pero es como si no se «grabara» ninguna información en el cerebro. La presencia de nuevos sonidos propicia la curiosidad auditiva y, por tanto, capta nuestro interés, aunque, si la información presentada es muy redundante, o cuando los sonidos nuevos son extremadamente complejos y no podemos reconocerlos, se pierde esa curiosidad.

Un ejemplo de sonido monótono es el ruido en el interior de un avión en vuelo. El nivel de presión sonora en su interior es elevado, entre 83 y 86 dBA aproximadamente, y el ruido se asemeja mucho al ruido rosa. En este caso, nuestro sentido auditivo percibe a los pocos minutos que no hay información acústica nueva y «desconecta», lo cual permite conciliar el sueño perfectamente. Sucede lo mismo con el sonido de la lluvia, las olas del mar, etc. A estos sonidos se les atribuye erróneamente efectos relajantes.

Un ejemplo de sonido que despierta curiosidad es el procedente de la calle en el casco antiguo de una ciudad. Probablemente no haya tráfico de vehículos y los niveles de ruido ambiente sean bastante moderados, digamos entorno a los 40-45 dBA, pero las voces que aparecen irregularmente y con diferentes intensidades de algunos peatones despiertan la curiosidad auditiva y eso dificulta conciliar el sueño. Nótese que, en estos casos, podemos tener en el interior de la vivienda niveles  $L_{eq}$  alrededor de 25 dBA y, sin embargo, no es posible conciliar el sueño. El  $L_{eq}$  no tiene en cuenta los desniveles, que es lo que realmente atrae nuestra atención acústica, y produce finalmente sensación de molestia e incomodidad.

### **10.1.8. Medidas acústicas para la valoración del paisaje sonoro**

Desde mediados del siglo xx hasta la actualidad, la sociedad ha evolucionado mucho, los conocimientos científicos son mejores y la tecnología permite unos registros de audio perfectos que permiten un análisis exhaustivo y detallado de los sonidos, que van mucho más allá de una simple medida de presión acústica. Sin embargo, hasta la fecha no se ha desarrollado ningún indicador que permita establecer una correlación precisa entre el resultado objetivo de una medición y las diferentes percepciones sonoras subjetivas de las personas que están inmersas en un determinado ambiente sonoro. Entre las causas probables, algunas son bien conocidas, como la diferencia entre lo medido con

un micrófono y lo percibido con dos oídos por un humano. Otras son más desconocidas, como la influencia del estado de ánimo, las condiciones climatológicas o la influencia de la visión sobre la percepción de los sonidos.

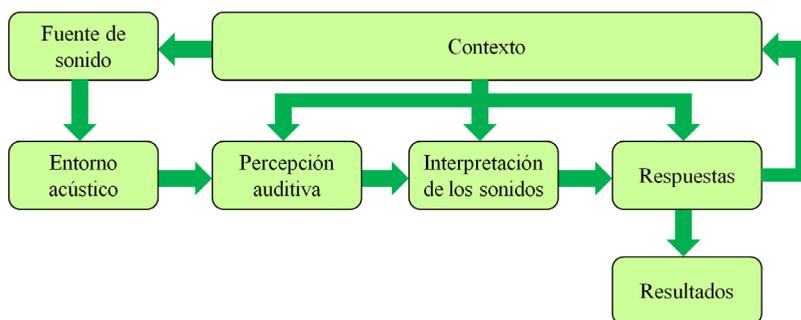
#### **10.1.8.1. Estándar ISO 12913. Paisaje sonoro**

Existe un gran interés en la investigación relacionada con el paisaje sonoro. En un afán de mejorar la calidad de vida y conseguir un entorno más saludable y eficiente, se han llevado a cabo varios estudios, con puntos de partida diferentes, que están generando diversidad de opiniones sobre la definición y los objetivos relacionados con el paisaje sonoro. El Comité Técnico de la Organización Internacional 43/Subcomité 1/Grupo de Trabajo 54 hizo el primer esfuerzo para desarrollar una norma de paisaje sonoro que culminó en la norma ISO 12913-1:2014. Esta norma internacional tiene como objetivo permitir un amplio consenso internacional sobre la definición de paisaje sonoro y proporcionar una base para la comunicación entre disciplinas y profesionales con interés en el paisaje sonoro. Según la norma ISO 12913-1:2014, un paisaje sonoro se define como «un entorno acústico según lo percibido o experimentado y/o entendido por una persona o personas en un contexto». Se puede afirmar que el paisaje sonoro se basa en tres supuestos principales:

- El paisaje sonoro puede entenderse como un conjunto de recursos en lugar de reducirse a un simple ruido.
- Los análisis y las evaluaciones del paisaje sonoro deben contextualizarse.
- Las percepciones de las personas, y sus reacciones y valoraciones, se combinan hacia una interpretación holística del entorno sonoro.

En esta norma se proporciona un marco conceptual relacionado con el proceso del paisaje sonoro, como se muestra en la figura 10.6. Un paisaje sonoro se origina con las fuentes de sonido habituales en entornos urbanos (tráfico rodado, trabajos en la vía pública, canto de pájaros, voces, fuentes/saltos de agua, etc.) y su distribución en el espacio y el tiempo. Las fuentes de sonido pueden ser estáticas o móviles. La mayoría de fuentes sonoras en un entorno urbano están relacionadas con el tráfico rodado. A pesar de que los vehículos van cambiando constantemente, el sonido generado es muy similar, si bien que no es conveniente hacer grandes integraciones temporales para hacer una valoración cualitativa.

El entorno acústico tiene en cuenta las características acústicas del entorno, como los efectos de la propagación del sonido resultante de las condiciones meteorológicas, absorción, difracción, reverberación y reflexión, que modifican y matizan a todas las fuentes sonoras presentes en ese espacio. El resultado de esta interacción entre los sonidos generados y las condiciones acústicas crea el entorno sonoro, que es el resultante de todas las interacciones acústicas.



**Figura 10.6.** Elementos que intervienen en la percepción del paisaje sonoro (ISO 12913:2014).

Los sonidos presentes en el paisaje sonoro considerado llegan al sentido auditivo a través del oído. El primer paso es tener conciencia de la percepción del sonido. La percepción del sonido está influida por las condiciones de contorno (contexto) donde se encuentra el observador.

Estos sonidos percibidos son interpretados en función de la cultura, la experiencia, la situación, el estado de ánimo, etc. La fase de interpretación significa una asimilación profunda de las características del sonido no solamente físicas, sino emocionales, de información, etc., que van asociadas a la recepción de cualquier sonido. Esta interpretación está condicionada por el contexto y uno de los aspectos más influyentes es la visión. La misma fuente sonora escuchada en el mismo entorno pero con una imagen distinta (por ejemplo, día nublado o soleado) se interpreta de forma distinta.

Después de la interpretación, llega la fase de la respuesta en forma generalmente de decisión. Si estamos haciendo alguna tarea que requiera cierto ambiente silencioso (por ejemplo, hablamos con alguien), la decisión estará relacionada con la dificultad en realizar esta tarea, generalmente con una decisión binaria: molesta o no molesta. Si lo que se pretende es «desconectar», la interpretación es mucho más compleja y está fuertemente influida por nuestro estado de ánimo, cansancio y grado de estrés.

Las respuestas incluyen reacciones y emociones a corto plazo, así como comportamientos, mientras que los resultados consisten en una consecuencia general a largo plazo facilitada por el entorno acústico, como las actitudes, la salud, el bienestar y la calidad de vida.

La parte 2 del estándar ISO 12913:2014, en el apartado A3, establece qué parámetros deben reflejarse en el informe de valoración de un paisaje sonoro. Respecto a las mediciones acústicas, hay que indicar los niveles de presión equivalente A y C, así como los percentiles  $L_{AF5}$  y  $L_{AF95}$ . También debe indicarse la sonoridad según el estándar ISO 532-1 para los niveles percentiles N5 y N95, que corresponden al nivel de sonoridad

excedido durante el 5% y el 95% del tiempo, respectivamente. Se añade la sonoridad raíz cúbica del cubo de suma de sonoridades,  $N_{rmc}$  según el mismo estándar, con la formulación de la ecuación 10.3:

$$N_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^3} \quad (10.3)$$

Donde:

$N$  representa la sonoridad en un instante  $i$ .

$n$  es el número de muestras de sonoridad.

La justificación de este indicador está motivada por las respuestas que se producen ante eventos de distinta duración y con nivel sonoro muy diferente. Concretamente, un estudio realizado por Fiebig (Fiebig A., 2016) consistió en valorar la sonoridad percibida por un solo evento de elevada sonoridad respecto de cuatro eventos iguales de menor sonoridad y mayor duración en conjunto. La figura 10.7 muestra los tres casos analizados.

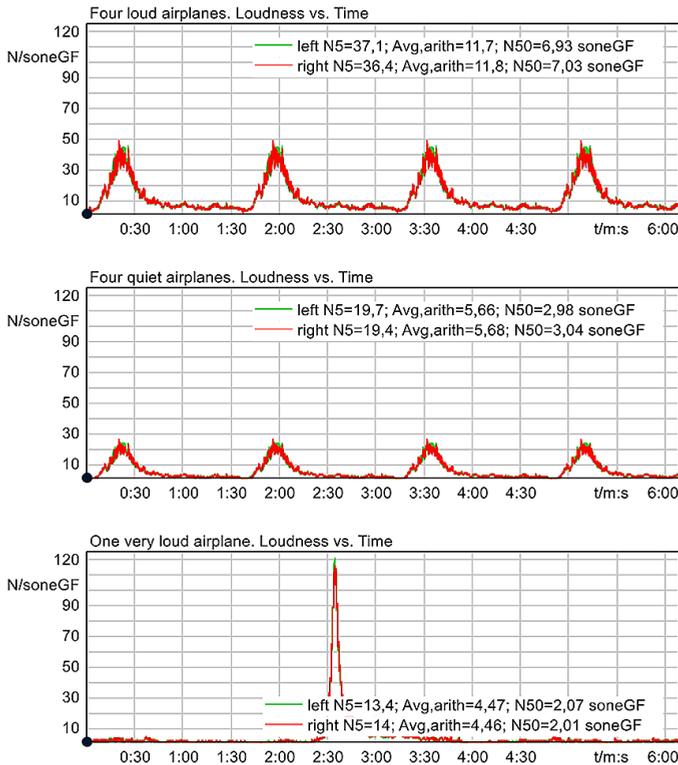


Figura 10.7. Sonoridad de los tres eventos analizados (Fiebig A., 2016).

El tiempo total de la muestra fue de 6 minutos, de los cuales el evento solo tenía una duración de 30 segundos. Los resultados indican que, en caso de grandes variaciones de sensaciones momentáneas (volumen) dentro de episodios de ruido más largos, pueden ocurrir grandes diferencias interindividuales. En tales casos, la persona a la que se solicita que proporcione una evaluación general debe compensar entre picos sensoriales (cortos) y pasajes más largos de sensaciones de bajo nivel.

En el experimento presentado se observó que, con respecto a un evento ruidoso dominante (sobrevuelo de un avión muy ruidoso) dentro de una secuencia de ruido de 6 minutos de duración, algunos participantes dieron mucho peso al pico de sonoridad dominante, mientras que otro grupo de participantes aparentemente integró las partes de sonoridad de bajo nivel fuertemente en sus evaluaciones generales de sonoridad.

Este comportamiento de calificación diferente apoya la suposición de que posiblemente no exista una impresión general en un sentido fenomenológico, como se había sugerido (Schreiber & Kahneman, 2000) y los participantes tienen que construir una impresión general si se ven obligados a proporcionar una evaluación general. Si es así, los participantes pueden aplicar diferentes lógicas y reglas para construir su evaluación general con respecto a un episodio de ruido experimentado.

En el contexto de la detección de un único indicador de sonoridad que predice de forma fiable la sonoridad global evaluada de un episodio de ruido, se debe concluir que los valores de percentiles de sonoridad tienen la desventaja de que siempre son «ciegos» a ciertos períodos dentro del episodio considerado. Si se determina una métrica de sonoridad media en función de una función de sonoridad calculada a lo largo del tiempo (en sonios), que se supone que es una aproximación justa de la sonoridad momentánea percibida, parece probable que se necesite un exponente más alto para el cálculo de un valor medio de potencia y sea necesario enfatizar adecuadamente la importancia de los eventos destacados.

En el caso analizado, se comparan los resultados de cálculo de la sonoridad total de cada evento aplicando distintos factores potenciales (0, 1, 2, 3 y 4), obteniendo los valores mostrados en la tabla 10.1 (Fiebig A., 2016).

**Tabla 10.1.** Indicadores de sonoridad global para dos casos

| Sonido                  | $N_{ave}$ | $N_{rms}$ | $N_{rmc}$ | $N_{4pot}$ |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Un avión muy ruidoso    | 4,46      | 11,83     | 22,22     | 31,82      |
| Cuatro aviones ruidosos | 11,72     | 15,34     | 18,84     | 21,70      |

Como se puede apreciar, el valor promedio de la sonoridad ( $N_{ave}$ ) para el avión muy ruidoso es notablemente inferior al de los cuatro aviones ruidosos. La sonoridad cuadrática ( $N_{rms}$ ) se asemeja mucho numéricamente en ambos casos, pero el evento más

ruidoso sigue quedando por debajo. La sonoridad cúbica ( $N_{\text{mmc}}$ ) permite que, en el ejemplo mostrado, la sonoridad de un avión muy ruidoso sea superior a la sonoridad total de cuatro aviones ruidosos. Por último, la sonoridad cuarta ( $N_{\text{4pot}}$ ) consigue una mayor diferenciación. Esto es lo que en general se hace cuando se evalúa la molestia o nocividad de un sonido: nuestro sentido auditivo centra la atención en la parte con más nivel sonoro, obviando o restando importancia al tiempo en que los niveles fueron notablemente más bajos. Sería discutible qué indicador sería más adecuado, el  $N_{\text{mmc}}$  o  $N_{\text{4pot}}$ , pero resulta obvio que el resultado se asemeja más a la reacción mayoritaria de la población.

Naturalmente, el proceder utilizado para valorar la sonoridad total puede alterarse de forma voluntaria para un profesional acústico, aunque con resultados inciertos. Nótese que las personas no podemos llevar a cabo integraciones temporales como un equipo de medida. En un fragmento sonoro de nivel irregular de pocos minutos resulta más fácil recordar los instantes con niveles sonoros mayores, los cuales pesan más a la hora de valorar la sonoridad global. Por tanto, el índice  $N_{\text{mmc}}$  parece adecuado para valorar aspectos de sonoridad global de un evento acústico irregular, ofreciendo unos resultados más cercanos a los que un humano puede observar.

### **10.1.8.2. Criterios psicoacústicos aplicados al paisaje sonoro**

En general, se observa que sonidos con el mismo nivel de presión acústica producen sensaciones muy distintas sobre las personas. Los aspectos cualitativos no se pueden valorar con las mediciones tradicionales del nivel de presión acústica. La norma ISO 12913-2 recomienda el uso tanto de indicadores de presión sonora ( $L_{\text{eq}}$ ) como de parámetros psicoacústicos. Los indicadores de nivel equivalente, sea ponderado A o C, valoran el nivel sonoro global de un registro sonoro en su totalidad. La sonoridad valora mejor la sensación sonora producida que el  $L_{\text{eq}}$ , pero también se valora el registro sonoro en su totalidad. Los criterios psicoacústicos propuestos en la ISO 12913-2 son: *Sharpness* (agudeza), *tonality* (tonalidad), *roughness* (rugosidad) y *fluctuation strenght* (fluctuación), que valoran aspectos relacionados con el contenido en frecuencia del sonido, lo que aporta mucha más información cualitativa sobre este, y también valora el registro sonoro en su totalidad.

La psicoacústica cubre un campo importante que describe las diferentes dimensiones involucradas en el proceso de evaluación del sonido percibido. Describe los mecanismos de percepción del sonido partiendo de varios parámetros, como el volumen, la agudeza, la rugosidad y el poder de fluctuación, así como otros parámetros relacionados con la audición. Diversos estudios muestran que la procedencia del sonido desempeña un papel importante en las reacciones fisiológicas y la sensación de molestia percibida. Para el mismo nivel sonoro en la posición del oyente, los sonidos con distinta procedencia aparecen como más molestos respecto a los sonidos percibidos en la misma dirección.

Por tanto, la distribución espacial de las fuentes sonoras, así como la dirección y velocidad de cualquier movimiento de estas fuentes, pueden ser relevantes para la percepción y evaluación del ruido ambiental. Esto es relativamente importante en entornos urbanos, donde los espacios destinados al descanso de los ciudadanos están rodeados de calles con circulación rodada de vehículos.

El hecho de que la molestia resultante del paisaje sonoro circundante del oyente también depende de la actitud personal del oyente aumenta aún más la complejidad del enfoque del paisaje sonoro, que tiene que integrar aspectos importantes, como la situación física, la experiencia y la interacción e interpretación del medioambiente en un concepto amplio.

Diferentes métodos y modelos de cálculo indican que, de acuerdo con la regla de la atenuación sonora por la distancia recorrida, y teniendo en cuenta las propiedades de propagación, el tipo de fuente sonora, las reflexiones con los objetos, y los factores de atenuación del aire, son un intento de predecir cómo el nivel sonoro generalmente ponderado  $A$  evoluciona como una función de la distancia entre fuente y receptor; sin embargo, no se tiene en cuenta la información sobre la evolución temporal y en frecuencia del sonido.

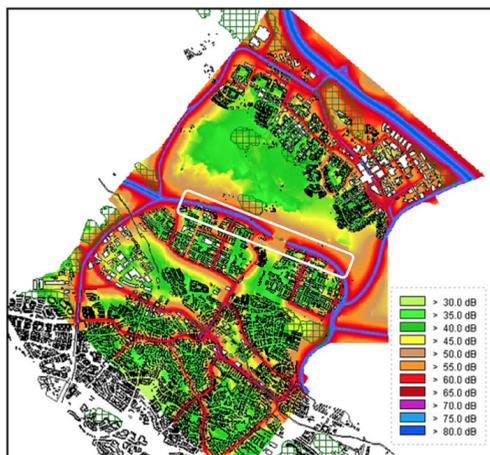
Pero la realidad es que el nivel  $L_{Aeq}$  calculado o medido y la molestia percibida a menudo difieren ampliamente de las evaluaciones llevadas a cabo por los residentes interesados (Genuit K. , 1991) (Barti R. , 1995). Esto se explica por el hecho de que el sentido auditivo humano, a diferencia de un sonómetro, no es un instrumento de medida. El oído humano tiene una percepción sonora diferenciada debido a su no linealidad y adaptabilidad, así como a sus características de procesamiento de la señal, prestando atención a factores adicionales y no solo a la intensidad promedio del evento sonoro (Genuit K. , 2002) o al contraste acústico (Barti R. , 2015), entre otros.

### **10.1.9. Medidas para reducir el nivel sonoro en entornos urbanos**

La mejora del paisaje sonoro está fuertemente condicionada al punto de partida de la situación acústica del lugar. En entornos urbanos, es bien conocida la existencia de un ruido ambiente producido por la circulación de vehículos de motor. Si bien estos vehículos irán desapareciendo paulatinamente con la electrificación del transporte, en los años de transición el nivel de ruido apenas variará. Un primer paso para conseguir una mejora notable del paisaje sonoro es la reducción del nivel de ruido de tráfico en las ciudades.

El proyecto de investigación europeo Quiet City Transport (QCity 2005) subraya el esfuerzo por explorar más a fondo la conexión entre el ruido urbano y su percepción y evaluación. En este documento se reflejan diversos estudios encaminados a ofrecer

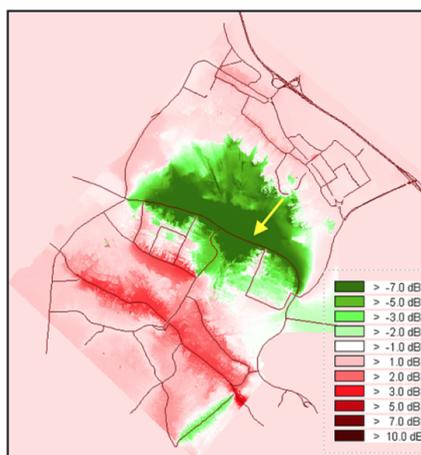
soluciones a los problemas relacionados con la contaminación acústica desde diversas perspectivas. Mostramos un ejemplo del WP 2.3. El objetivo de este grupo de trabajo era estudiar las medidas relacionadas con la gestión del tráfico. El primer escenario estudiado se centra en reducir el nivel sonoro emitido por una carretera. El mapa de ruido inicial se muestra en la figura 10.8 y corresponde a la ciudad de Järva, Estocolmo. El rectángulo blanco muestra el fragmento de carretera seleccionado.



**Figura 10.8.** Mapa de ruido del área estudiada, mostrando el  $L_d$  (Qcity, 2005).

Como se puede observar, los niveles sonoros  $L_d$  en la zona de influencia más cercana a la carretera son elevados. La primera propuesta estudiada fue cerrar al tráfico la carretera. Es una medida drástica que, si bien soluciona de forma rápida y económica (no hay que hacer inversiones) el problema del ruido, genera otros problemas con la movilidad que no pueden desaparecer. Con esta solución trivial, los niveles sonoros van a bajar en la carretera y su área de influencia, pero lo interesante en este estudio es visualizar cómo se modifican los niveles sonoros en las rutas alternativas para mantener la movilidad. La figura 10.9 muestra los niveles sonoros previstos.

Como era de esperar, en las zonas cercanas a la carretera es donde la reducción del nivel sonoro es mayor, llegando a ser superior a los 7 dBA. Sin embargo, a cambio de reducir el nivel sonoro en estas zonas, hay otras que se visualizan en el mapa, donde el nivel sonoro aumenta. Son las vías alternativas situadas en la parte inferior izquierda, marcadas de color rojo, que supone un incremento de nivel sonoro superior a los 3 dBA respecto a la situación inicial de la figura 10.8. La solución mostrada es la más radical y la que da mejores resultados (obviamente) sobre la zona de interés.



**Figura 10.9.** Reducción del nivel sonoro cuando se cierra la carretera (Qcity, 2005).

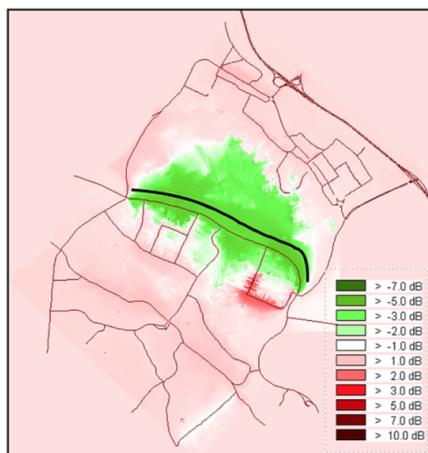
Esta propuesta sirve a los diseñadores para comparar la situación actual (figura 10.8) y la máxima reducción posible del nivel sonoro mostrada en la figura 10.9. A partir de este punto, se pueden analizar soluciones alternativas, por ejemplo: reducir la densidad de vehículos, reducir la velocidad de estos, poner asfalto poroso (caso de no haberlo), etc. La carretera seleccionada tiene una velocidad máxima de 70 km/h y la propuesta es reducir la velocidad a 50 km/h. Este cambio de velocidad permite predecir que la reducción sonora esperada estará entre 3 y 4 dBA.

La figura 10.10 muestra el mapa de mejora en el caso de reducir la velocidad de los vehículos de 70 km/h a 50 km/h. Esta medida no reduce el nivel sonoro en la carretera como en la propuesta anterior (sin tráfico), pero se consigue una disminución del nivel sonoro de unos 5 dBA, lo cual es bastante aceptable y perceptible por el oído humano y, por tanto, es una buena solución. La parte negativa es el incremento de 2 dBA en una vía cercana. La decisión deberá tomarse en función del coste/beneficio de la medida propuesta. La reducción de la velocidad del tráfico, con estos valores de partida, es quizá la medida más eficiente.

#### **10.1.9.1. Asfalto absorbente**

Es un asfalto también llamado *poroelástico*, que une las propiedades de la porosidad a una mayor elasticidad que le proporcionan los aditivos elásticos (que suelen ser goma de neumáticos reciclados) para disminuir el nivel sonoro en la interacción entre los neumáticos y la calzada. Para la optimización de las superficies de las vías de circulación, el WP 3.5 estudia la aplicación de estos asfaltos para la reducción del nivel sonoro radiado.

El ruido externo de la interacción entre neumático y calzada con acabado poroelástico, desarrollado y refinado en el marco del proyecto QCITY, se ha comparado con superficies de carreteras estándar desgastadas en varios grados.



**Figura 10.10.** Variación del nivel sonoro reduciendo la velocidad (Qcity, 2005).

Las comparaciones entre la superficie de la carretera poroelástica y las superficies de la carretera de referencia estándar se han llevado a cabo con SMA11 y SMA16: SMA11 es una superficie de betún asfáltico con un tamaño máximo de piedra de 11 mm y con un alto contenido de piedras más grandes en la mezcla de áridos; SMA16 es el mismo tipo de superficie, pero con un tamaño máximo de piedra de 16 mm. El porcentaje de poro estudiado para el asfalto es del 15%.

La figura 10.11 muestra la reducción del nivel sonoro del ruido de rodadura que ofrece un asfaltado poroso respecto al convencional. La velocidad del vehículo va de 30 km/h a 70 km/h. Se puede observar que la reducción de nivel a 30 km/h es de 3,5 dBA, mientras que a 70 km/h esta reducción pasa a ser de 5,6 dBA. El beneficio de utilizar asfalto poroso para reducir el nivel de ruido de tráfico, es, pues, evidente.

La reducción del nivel sonoro por la acción de la absorción del asfalto se produce principalmente a las bandas medias y altas. La figura 10.12 muestra el espectro en frecuencia radiado por los neumáticos para una velocidad de 30, 50 y 70 km/h. La figura muestra que hasta la frecuencia de 800 Hz no hay ninguna reducción del nivel sonoro. A partir de esta banda, la reducción del nivel sonoro oscila por bandas entre los 6 dBA y los 3 dBA, dependiendo de la frecuencia. Como se puede comprobar, la tendencia del

grado de reducción es bastante similar, pero creciente con la velocidad. La ventaja del uso de asfalto poroelástico es que todos los vehículos que circulan se benefician de la reducción del nivel sonoro.

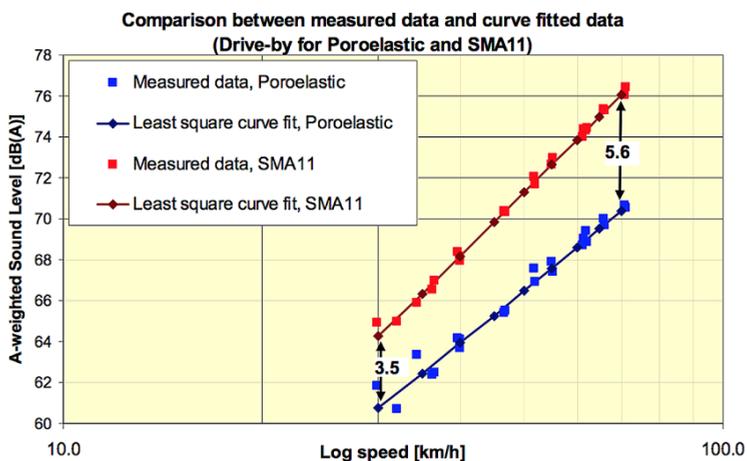
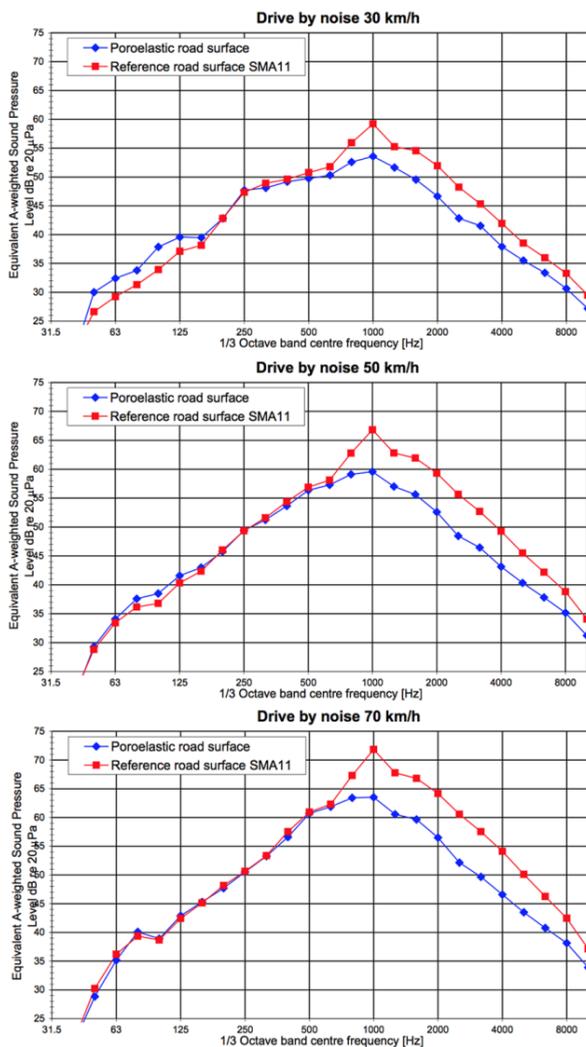


Figura 10.11. Reducción del nivel sonoro del asfalto poroso (Qcity, 2005).

Los niveles de reducción sonora mostrados son apreciables entre 3,5 y 5,6 dBA. Pasado un tiempo, y por colmatación de parte de los «poros» de la superficie asfaltada, la reducción del nivel sonoro real se queda sobre los 3 dBA; pero, a pesar de esta disminución, la sensación percibida *in situ* suele ser más elevada. La causa es que la reducción del nivel sonoro se centra en las frecuencias medias. El sonido percibido con asfalto poroelástico es menos estridente, el sonido es más «apagado» y esta cualidad tiene mucha importancia en la valoración subjetiva.

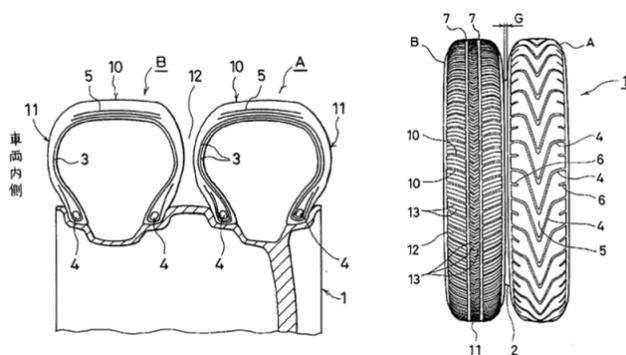
### 10.1.9.2. Diseños de neumáticos innovadores

La tecnología del neumático tiene muchos años de experiencia que han permitido obtener diseños eficientes en diversos aspectos. La investigación sobre estos elementos en las décadas pasadas se centró básicamente en mejorar las prestaciones mecánicas y de seguridad. No se tuvo en cuenta el ruido generado como un factor de diseño. En consecuencia, desde mediados de los años noventa, el nivel de ruido emitido por los vehículos en la Unión Europea ha permanecido constante porque el ruido de los neumáticos impedía reducir el nivel sonoro de los vehículos. Con los estudios realizados sobre todo a partir de la década de los noventa en los nuevos diseños de neumáticos, se han conseguido algunas mejoras reduciendo el nivel sonoro, pero a costa de bajar las prestaciones mecánicas.



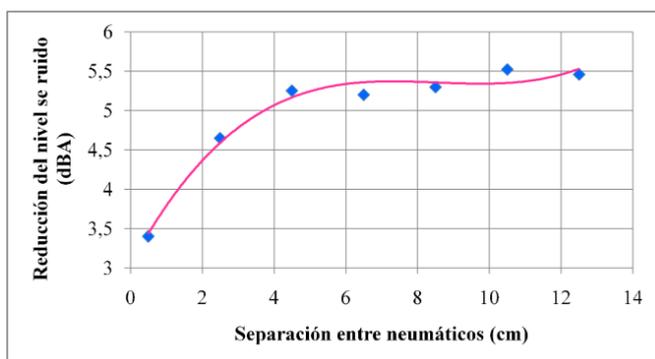
**Figura 10.12.** Espectro en frecuencia del ruido de neumático sobre asfalto convencional (rojo) y poroelástico (azul) para velocidades de 30, 50 y 70 km/h.

En el afán de reducir el ruido generado por los neumáticos, se están investigando nuevas alternativas que permitan conseguir una disminución del nivel de ruido emitido. Esto ha propiciado el desarrollo de nuevos conceptos, como el propuesto por Yokohama con el neumático gemelo. Este neumático está formado por dos neumáticos más estrechos montados sobre una llanta especial, como se muestra en la figura 10.13, patentado por Yokohama Rubbers.



**Figura 10.13.** Prototipo de rueda gemela de Yokohama.

Los neumáticos individualmente son más estrechos y pueden ser de distinto tipo para ofrecer unas prestaciones mecánicas más amplias. Esta configuración permite reducir notablemente la contribución del *horn effect*, como se indica en la figura 10.14.

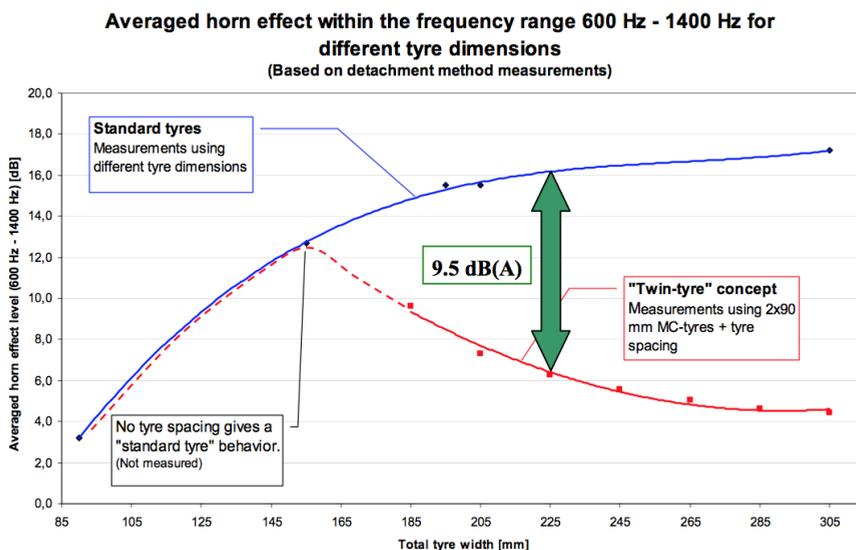


**Figura 10.14.** Reducción del nivel sonoro radiado por un neumático gemelo en función del espacio entre ellos (600 Hz-1,4 kHz)(Qcity, 2005).

Cerca del área de contacto entre el neumático y la calzada, la superficie de la vía y la banda de rodadura (dibujo) del neumático forman una geometría similar a una bocina, por un lado la calzada plana y por otro la curvatura del neumático, que proporciona un mecanismo de amplificación significativo para las fuentes de sonido.

La reducción de ruido entre 600 Hz y 1,4 kHz a la que hace referencia el gráfico de la figura 10.14 es únicamente el efecto de radiación y utiliza la forma espectral de un neumático de automóvil estándar como referencia. La influencia de la separación

es prácticamente plana (con una reducción media de 5,4 dBA) hasta un espacio de separación entre neumáticos de 50 mm (correspondiente a un ancho total del neumático gemelo de 245 mm). En la figura 10.15 se muestra cómo el *horn effect* para los neumáticos gemelos anchos es mucho menor que para un neumático estándar con la misma sección.



**Figura 10.15.** Reducción del nivel sonoro de un neumático gemelo en función de su anchura total (Qcity, 2005).

También se puede ver que, sin espacio entre los neumáticos secundarios, el neumático gemelo proporciona el comportamiento estándar de los neumáticos con respecto a la radiación sonora.

Otras soluciones innovadoras del neumático que tratan de reducir el nivel sonoro radiado pasan por la desaparición de la cámara del neumático. Al no tener una cámara con aire de presión, el *torus noise* se elimina. Para los neumáticos de mayor sección y diámetro, supone una reducción notable del nivel sonoro. Se han elaborado algunos prototipos, como el mostrado en la figura 10.16. La banda de rodadura está formada por goma maciza.

Las pruebas de este tipo de neumático se remontan al año 1990, dirigidas por el profesor Ulf Sandberg. La reducción sonora obtenida fue de 10 dBA, un valor muy elevado. No obstante, el problema encontrado fue una duración insuficiente de este neumático.

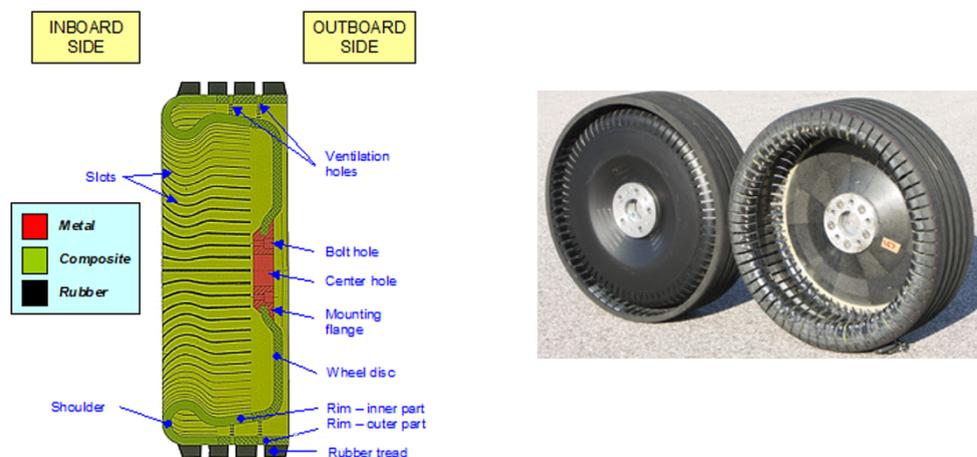


Figura 10.16. Prototipo de neumático sin cámara (Qcity, 2005).

Unos diez años más tarde aparece una propuesta mejorada que consiste en un diseño similar, pero con agujeros en los surcos del «neumático», como se puede apreciar en la figura 10.17, y que reduce el nivel de ruido radiado apreciablemente.

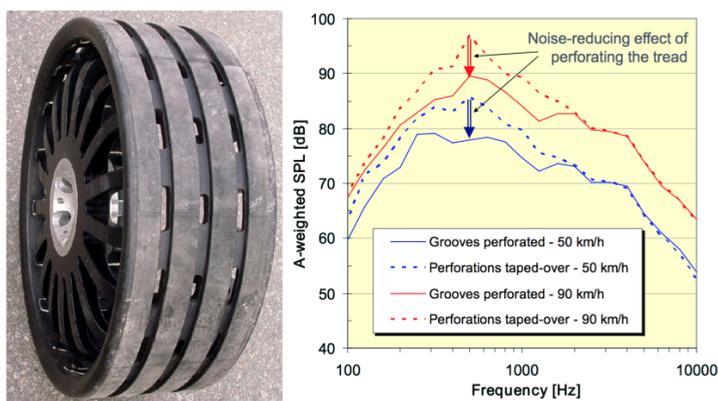


Figura 10.17. Propuesta de neumático sin cámara de Hans-Erik Hansson para Volvo en el año 2002. Efecto de la perforación en los surcos del neumático.

Posteriormente, se han desarrollado distintos modelos de neumáticos sin cámara de aire, donde se busca una durabilidad similar a la actual. El reto también es mantener unas prestaciones mecánicas y, dentro de esta faceta, cómo se absorben los impactos con bordillos, piedras, etc., por parte de las nuevas estructuras. La tendencia de los distintos

fabricantes es sustituir la actual cámara de aire por un entramado de materiales que den una elasticidad, pero a su vez rigidez lateral, para que el neumático tenga un comportamiento mecánico similar al actual.

La figura 10.18 muestra diversas propuestas de neumáticos silenciosos sin cámara de seis fabricantes distintos. El efecto amortiguador de la cámara de aire se sustituye por elementos elásticos que forman parte del diseño estructural del neumático.

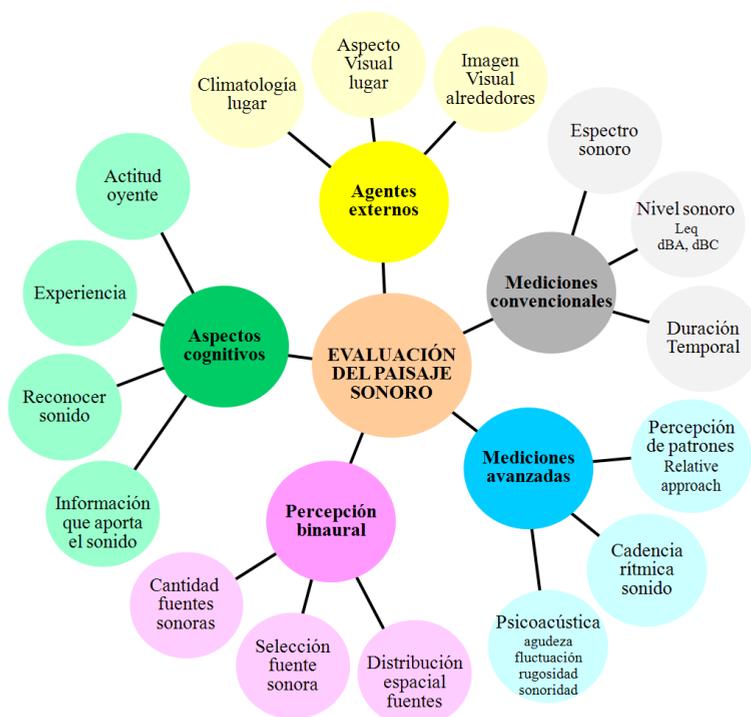


**Figura 10.18.** Propuestas de neumáticos sin cámara de seis fabricantes distintos.

En resumen, los ejemplos mencionados anteriormente muestran la necesidad de nuevos enfoques, técnicas de medición y parámetros para mejorar el paisaje sonoro y considerar suficientemente el mecanismo de percepción del sonido por parte de los humanos. No hay que olvidar que el estudio del paisaje sonoro se hace para mejorar la calidad de vida de las personas, no para redactar informes o pintar mapas de colores. Los parámetros y las técnicas de análisis convencionales no son suficientes. Debe aplicarse un nuevo enfoque que incluya mediciones y análisis psicoacústicos con precisión auditiva, en el que se tengan en cuenta las características del aparato auditivo humano y toda la parte subjetiva de interpretación sonora. Los criterios psicoacústicos tampoco son la panacea universal que va a permitir describir objetivamente todos los paisajes sonoros con precisión, pero sí que aportan muchísima más información que las mediciones tradicionales.

### 10.1.10. Evaluación del paisaje sonoro

El paisaje sonoro se puede evaluar desde diferentes ópticas o diferentes ámbitos, como resume la figura 10.19. La audición humana puede clasificar paisajes sonoros complejos en eventos de sonido único debido a su audición binaural y a la capacidad de seleccionar la fuente sonora. Las contribuciones individuales a un paisaje sonoro pueden seleccionarse voluntariamente por el sentido auditivo e influir decisivamente en la evaluación individual. Es decir, ante la misma secuencia de eventos sonoros complejos, distintas personas pueden dar diferentes opiniones o valoraciones al haberse fijado individualmente en determinados sonidos en detrimento de otros. Por tanto, si las personas se quejan de molestias por ruido, primero deben explorarse las razones reales de la objeción por ruido.



**Figura 10.19.** Diagrama de los componentes principales que intervienen en la evaluación del paisaje sonoro.

El procesamiento de señales físicas, psicoacústicas y binaurales, así como los aspectos cognitivos y de agentes externos, afectan a la evaluación del paisaje sonoro. Las mediciones acústicas, ya sean convencionales o avanzadas, permiten cuantificar los resultados. La pregunta más frecuente, desde el punto de vista de nocividad o molestia, es

saber qué fuente/s del sonido existente causa/n la molestia por ruido. También se evidencia que la percepción o detección de patrones tanto temporales como en frecuencia de la señal sonora, la cadencia rítmica, etc., son importantes a la hora de valorar su grado de molestia.

#### **10.1.11. Preferencias sonoras**

Las personas en cierta manera esperan o desean determinados sonidos por sus aspectos cualitativos, más que por sus aspectos cuantitativos. En primer lugar está la preferencia esencial, por la que generalmente las personas escogen sonidos naturales o que les resulten familiares en detrimento de los sonidos artificiales. Los sonidos extraños producen alerta en nuestro sentido auditivo y captan la atención de nuestro cerebro, y eso se traduce en una peor calificación de la calidad sonora. En este grupo se encuentran como no deseables los sonidos de vehículos. El sonido de actividades humanas, voces, música, etc., tiene generalmente una valoración neutral, siempre que no suponga una vulneración de su intimidad acústica.

En segundo lugar está la preferencia influida por la experiencia cultural, que puede coincidir con otras personas con similares experiencias. Es el caso del ruido de los vehículos: las personas amantes del motor valoran positivamente este tipo de sonidos, mientras que otras no. Las valoraciones pueden presentar resultados muy dispares debido a estas particularidades llamadas *macro preferencias*. Por ejemplo, mientras se observa el ambiente sonoro en una plaza, pasa un vehículo deportivo de alta gama: la valoración de este sonido para cada oyente está condicionada por su experiencia y preferencias personales.

Y en último lugar están los aspectos sociales, género o edad, que se definen como *micro preferencias*. En este caso, la evaluación de sonidos por gente joven es distinta de la gente mayor. Los jóvenes son más tolerantes a sonidos de origen mecánico o tecnológico, mientras que la gente mayor es más tolerante a los sonidos naturales, culturales o de actividades humanas.

#### **10.1.12. Valoración subjetiva del paisaje sonoro**

Las mediciones acústicas que se efectúan del paisaje sonoro permiten tener datos cuantitativos de los distintos aspectos del sonido. Sin embargo, hay una parte importante en la evaluación de la calidad acústica del paisaje sonoro que se basa forzosamente en la sensación subjetiva que el sonido produce sobre las personas. Estas apreciaciones se plasman en forma de encuesta, donde el participante utiliza una escala de nivel para puntuar ciertos aspectos del sonido. Cabe destacar que el paisaje sonoro está formado de multitud de sonidos, con distintos matices, y que debe distinguirse entre evento sonoro



un modelo que identifique las dimensiones subyacentes de la percepción del paisaje sonoro y que pueda guiar la medición y la mejora de la calidad del paisaje sonoro. Con el propósito de desarrollar tal modelo, se llevó a cabo un experimento con cien participantes. Los valores promedio de la escala de atributos se sometieron a análisis de componentes principales, definidos en tres términos: agrado, agitación y familiaridad, que explican el 50, 18 y 6% de la varianza total, respectivamente (v. figuras 10.20 y 10.21).

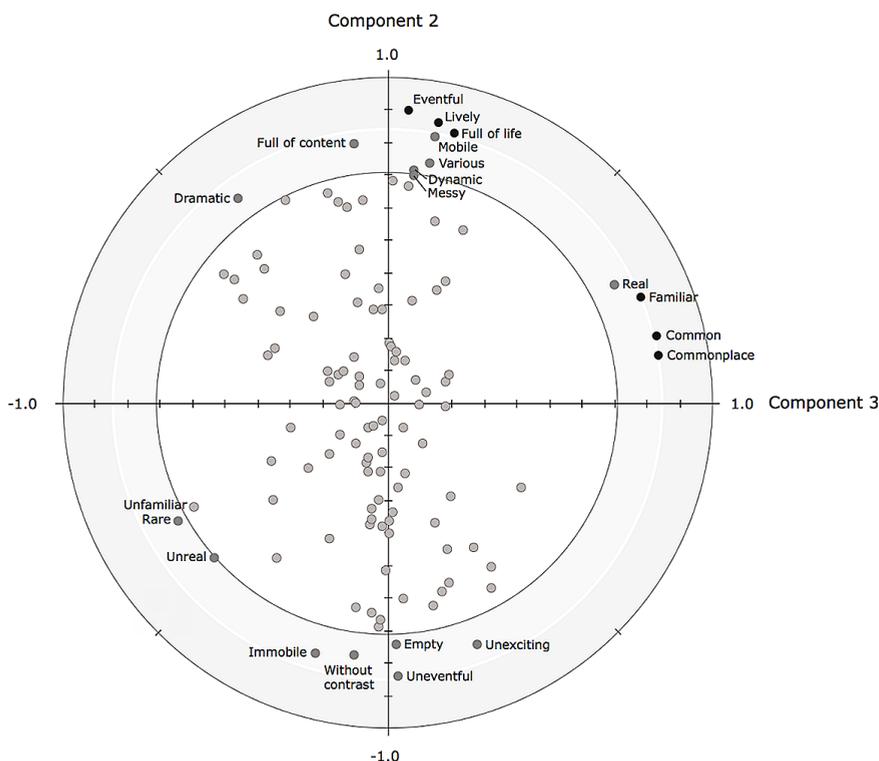
Las puntuaciones de los componentes principales se correlacionaron con las propiedades físicas del paisaje sonoro, incluidas las categorías de sonidos dominantes y variables acústicas (Axelsson, Nilsson, & Berglund, 2010). En la figura 10.20 se puede comprobar cómo el vector agrado-desagrado tiene multitud de calificativos, tanto en sentido positivo como negativo. Eso significa que los humanos tenemos una «facilidad» para describir o percibir estas sensaciones y darles unos calificativos que, como se aprecia, son bastante coincidentes.

Acepciones como atractivo, confortable, tierno, estético, etc., están muy cercanas entre sí, lo que significa que la sensación que produce el sonido es muy coincidente. Sin embargo, los calificativos quizá no estén tan cercanos. Depende sobre todo de la lengua y cultura, la traducción del calificativo no siempre es plenamente coincidente de una lengua a otra, a veces incluso es difícil de traducir, con los errores que conlleva, y algunos expertos defienden que se debería resolver esta cuestión antes de proponer estándares de medición del paisaje sonoro (Nagahata, 2018) (Aletta, y otros, 2020).

En la figura 10.21 se observa como la componente 3 (familiaridad del sonido) tiene mucha dispersión de resultados. Eso significa que el concepto de familiaridad es difícil de interpretar por distintas personas.

Como era previsible, los paisajes sonoros dominados por sonidos tecnológicos se consideraron en general desagradables. El ruido del tráfico y otros sonidos tecnológicos a menudo se perciben como molestos, y varios estudios de paisajes sonoros sugieren que tales sonidos suelen tener una influencia adversa en la calidad general del paisaje sonoro (Nilsson & Berglund, 2006).

Es importante destacar que la asociación negativa entre el agrado y los sonidos tecnológicos se mantendría también después de controlar el nivel de sonoridad. Esto muestra que este efecto no solo estaba relacionado con la sonoridad percibida, sino también con el carácter percibido de los sonidos tecnológicos. Por tanto, es probable que los sonidos tecnológicos audibles, que pueden no contribuir significativamente al nivel de sonido general del paisaje sonoro, aún ejerzan una mayor influencia negativa en la percepción de agrado.



**Figura 10.21.** Componentes principales 2 y 3, vectores agitación-estático y familiar-no familiar, respectivamente (Axelsson, 2010).

Aunque los sonidos naturales predominan en los paisajes sonoros más agradables, otros casos de paisajes sonoros con sonidos naturales dominantes fueron menos agradables. Esto explica la débil asociación entre sonido de origen natural y las puntuaciones de los componentes de agrado. Es frecuente que los paisajes sonoros dominados por sonidos naturales también contengan un bajo nivel sonoro de fondo, lo que puede explicar por qué son juzgados menos agradables. Estas observaciones arrojan algunas dudas sobre la noción de que agregar o promover sonidos naturales existentes mejoraría la calidad del paisaje sonoro (Axelsson, Nisson, & Berglund, 2010).

### 10.1.13. Entorno sonoro natural y urbano

El entorno sonoro contiene generalmente múltiples fuentes sonoras, algunas deseadas y otras no. En los entornos urbanos, el ruido de tráfico constituye la fuente sonora más extendida en área y en población afectada. Diversos estudios indican que la exposición a largo plazo al ruido de tráfico puede causar problemas fisiológicos y psicológicos sobre

las personas y también afecta a la calidad del descanso nocturno y al aprendizaje. El entorno sonoro urbano está dominado actualmente por las fuentes de ruido que la actividad humana genera. En un futuro próximo, la electrificación de los vehículos de transporte, tanto privados como colectivos, reducirá drásticamente los niveles sonoros, acercándolos a los experimentados en todo el mundo con el confinamiento obligado en 2020.

Los entornos urbanos donde el cemento y asfalto dominan no son considerados espacios agradables, mientras que los espacios verdes que incluyen fuentes o saltos de agua se consideran más saludables (Völker & Kistemann, 2011). Los comportamientos que promueven la salud (por ejemplo, la actividad física) y que reducen el estrés son más frecuentes en áreas con fácil acceso a parques y espacios naturales y en las proximidades de la costa.

#### **10.1.13.1. Sonidos naturales: aves**

Las aves que viven en las ciudades tienen que ajustar su comportamiento a entornos novedosos. La contaminación acústica impone una grave limitación a la comunicación vocal al interferir con la detección de señales acústicas. Estudios recientes muestran que las aves de la ciudad cantan con mayor frecuencia que sus congéneres en hábitats no urbanos. Esto se ha interpretado como una adaptación para contrarrestar el enmascaramiento causado por el ruido presente en las ciudades. Sin embargo, esta noción es objeto de debate, ya que los cambios de frecuencia observados parecen ser menos eficientes para mitigar el ruido que cantar más fuerte, y se ha sugerido que las aves de la ciudad podrían usar elementos de canto particularmente de alta frecuencia porque pueden producirse con mayor nivel. Se ha observado que los mirlos de la ciudad emiten sonidos con contenido de mayor frecuencia, que pueden producirse a intensidades más altas y, al mismo tiempo, resultan menos enmascarados por el ruido del tráfico de baja frecuencia (Fuller, Warren, & Gaston, 2013).

Las aves utilizan múltiples tácticas para mitigar el enmascaramiento acústico por ruido antropogénico. Por ejemplo, los petirrojos (*Erithacus rubecula*) en las ciudades cambian su actividad de canto hacia la noche para evitar los períodos ruidosos durante el día. Además de los cambios en la actividad del canto, las aves también reducen el enmascaramiento de la señal al cambiar las características de sus cantos. Tanto las aves como los mamíferos exhiben el efecto Lombard, es decir, aumentan la amplitud de sus vocalizaciones en respuesta a un aumento del ruido ambiente. También se observa que las aves situadas en entornos muy ruidosos de una ciudad emiten sonidos de más alta frecuencia.

Las altas frecuencias son más fáciles de detectar cuando se encuentran inmersas en un ruido dominado por la baja frecuencia generada principalmente por la actividad humana.

Como se ha comentado anteriormente, la teoría de la recuperación del estrés también se basa en la evidencia de los beneficios de los entornos naturales y cómo pueden facilitar la reducción de la excitación fisiológica después del estrés. Se argumenta que estos beneficios, y las mejoras asociadas en el afecto positivo y la atención, surgen en función del interés y las evaluaciones afectivas positivas de los entornos naturales que poseen ciertas cualidades adaptativas.

Además, se ha sugerido que las propiedades acústicas de los sonidos de los animales, como la suavidad, la intensidad y el tono, están relacionadas con la presencia o ausencia de amenaza asociada con estos sonidos. Es posible que tales propiedades influyan en las valoraciones afectivas de los sonidos de las aves y su capacidad posterior para facilitar la recuperación percibida del estrés de manera similar a las propiedades estructurales visuales.

Se ha estudiado cómo es la restauración de la atención después de la fatiga laboral en entornos de oficina y se ha encontrado que la exposición a un paisaje sonoro natural (sonidos de ríos y pájaros) mejoraba la motivación para trabajar en mayor medida que escuchar los sonidos de la oficina (Jahncke, Hygge, Halin, Green, & Dimberg, 2011).

Los sonidos de algunas aves, además de proporcionar distracción o un enfoque alternativo, se perciben como fáciles de escuchar. Esta cualidad está estrechamente ligada a la curiosidad acústica. Los sonidos que atraen la atención del cerebro requieren de un cierto esfuerzo, ya que nuestro cerebro estará pendiente de ese sonido, y eso que no hay un relajamiento, sino todo lo contrario: se genera adrenalina que tensa nuestros sentidos. Un sonido fácil de escuchar y procesar no requiere de nuestra atención y eso potencia la capacidad relajante o desestresante de dichos sonidos.

Pero no todas las aves pueden ser percibidas como reconstituyentes y no todos los oyentes pueden encontrarlas reconstituyentes. Parece sensato explorar cómo las asociaciones personales con diferentes aves y sus sonidos, así como la relación general de uno mismo con el mundo natural, pueden influir en el grado en que se consideran beneficiosos para la restauración del estrés.

#### *10.1.13.1.1. Sonidos de aves con valoración negativa*

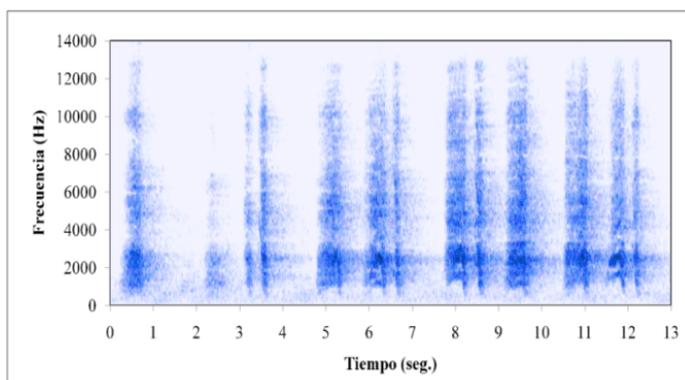
Los sonidos de aves que generaban valoraciones afectivas de carácter negativo o alta excitación no son útiles para la restauración de la atención y la recuperación del estrés. Esto suele estar ligado con alguna especie como, por ejemplo, la urraca, cuyo sonido está asociado con un comportamiento agresivo hacia otras aves.

Sucede algo parecido con las palomas en las calles de una ciudad, donde a menudo se consideran como algo negativo o una molestia, y puede ser que sus sonidos adquieran

estas propiedades por asociación. En general, cualquier ave que grazne emite sonidos arquetípicos, que infunden la sensación de miedo. Esta sensación tiene su origen en el elevado margen dinámico de estas señales, que generalmente se producen en entornos silenciosos y que son carentes de información tonal.

Esta particularidad parece ser la causa de considerar los sonidos como espeluznantes. La figura 10.22 muestra el espectro del sonido de graznar de la urraca común (*Pica pica*).

Como se puede apreciar en la figura 10.22, las señales sonoras son de banda ancha, que generalmente se corresponden con señales de corta duración. En este caso aparentan de mayor duración, ya que el graznido está formado por una sucesión de señales abruptas, que no se distinguen en la figura y que estarían dentro de las zonas azules más oscuras. Este tipo de señales carecen de información tonal, por lo que nuestro cerebro no las puede interpretar, como en el caso de una voz o una melodía musical.



**Figura 10.22.** Evolución del espectro sonoro del graznar de una urraca común.

Respecto de la paloma (*Columba livia*), suele tener unas connotaciones entre la población mayoritariamente asociadas con la suciedad y la transmisión de enfermedades, que la hace bastante impopular entre la población urbana. La figura 10.23 muestra el sonido de las palomas en su deambular por las calles.

Se aprecian unas señales similares a las generadas por la urraca, pero con transiciones temporales mucho más suaves, es decir, con menor dinámica. Son señales sin contenido tonal. La ausencia de componentes tonales no transmite al sentido auditivo ningún elemento sonoro que permita interpretar algún mensaje o sentimiento.

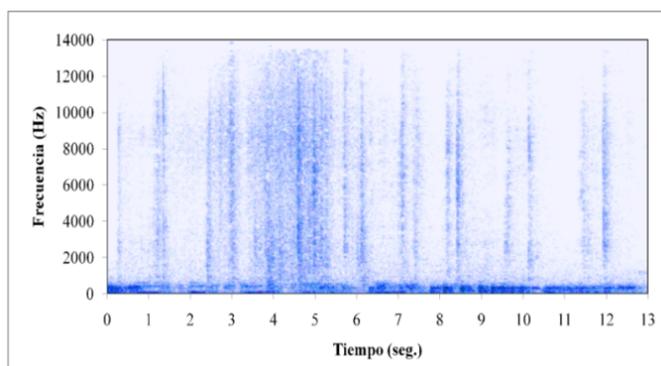


Figura 10.23. Evolución del espectro sonoro del sonido emitido por palomas.

#### 10.1.13.1.2. Sonido de aves con valoración positiva

En contraposición a los ejemplos mostrados de aves que emiten sonidos que no ayudan a la relajación, encontramos las aves que emiten sonidos tonales. Un ave muy frecuente en los parques y jardines es el mirlo común (*Turdus merula*). El canto del mirlo suele dar valoraciones contradictorias por parte de quien escucha los sonidos. En ocasiones, los sonidos impiden la relajación y recuperación del estrés y en otras simplemente es un foco de atención que, si bien tiene un efecto de «distracción», no impide la recuperación del estrés. En general, el canto del mirlo común se valora positivamente. La figura 10.24 muestra el espectro del sonido de un mirlo común en pleno canto. Se pueden apreciar claramente las evoluciones tonales. Las de color más oscuro corresponden al primer formante, que oscila entre 1.000 Hz y 3.800 Hz. Sobre estos trazos se pueden apreciar unas réplicas en tonos azules más suaves que van perdiendo intensidad: estas señales son los armónicos que dan la riqueza tonal inconfundible al sonido.

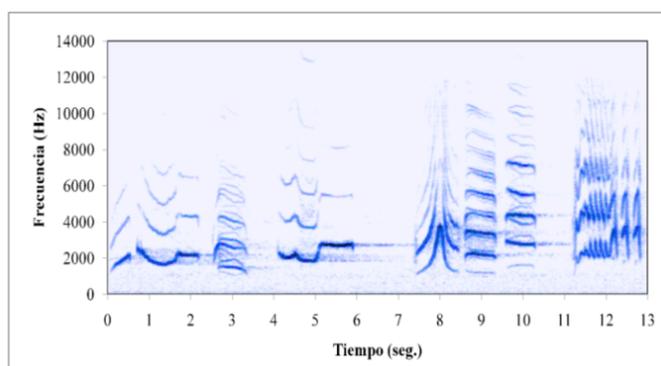
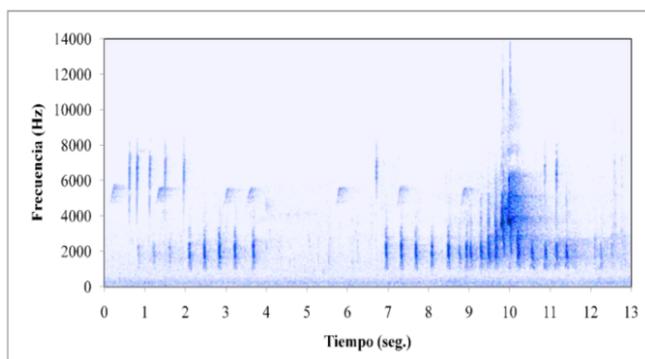


Figura 10.24. Evolución del espectro sonoro del canto tonal del mirlo común.

Se pueden observar las evoluciones de modulación en frecuencia del canto del mirlo común, que es especialmente rápida en el segundo 8 con una subida y bajada repentina pero continua de la tonalidad, algo muy característico del canto del mirlo común. Hacia el segundo 12, se aprecia la variación tonal más rápida que puede hacer esta ave. Pero, además, es capaz de hacer sonidos con más de una componente de frecuencia de forma simultánea. Por ejemplo, en los segundos 3, 9 y 10 se distingue un trazo corto y oscuro que corresponde a la frecuencia fundamental, y superpuesto a este, otros trazos con trazo más diluido en la parte superior, que no son réplicas del primero (armónicos). Este contenido en frecuencia da al canto del mirlo un elevado contenido multitonal armónico de gran belleza sonora. Los sonidos presentados en la figura 10.24 transmiten información tonal. El contenido tonal da una connotación positiva al canto y se valora como un elemento positivo dentro de los sonidos percibidos en un paisaje sonoro. Recordemos que los sonidos como las voces o las melodías musicales son un conjunto de señales tonales con cierta cadencia, lo que nos transmite información que nuestro cerebro «entiende».

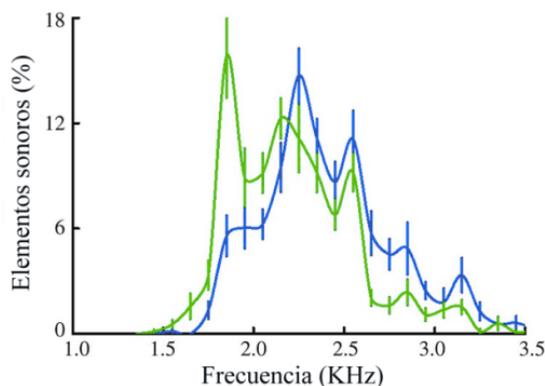
Sin embargo, el mirlo también emite otros sonidos, en los que no hay información tonal. Estos sonidos corresponden a la señal de alerta que envía a otros semejantes ante la presencia de un depredador o una amenaza. La figura 10.25 muestra estas señales sonoras.



**Figura 10.25.** Evolución del espectro sonoro de una señal de alarma del mirlo común.

Como se puede comprobar, las componentes en frecuencia desaparecen y quedan señales de breve duración temporal y de banda ancha en frecuencia. En cierta manera, estos sonidos recuerdan al graznar de la urraca, aunque hay una mayor separación temporal entre los impulsos sonoros. El tren de impulsos sonoros es más breve y con una separación temporal, constante. Uno de los efectos que produce la contaminación acústica sobre la fauna en entornos urbanos es la variación del canto. Se ha observado que, para la misma especie, el canto tiene un intervalo de frecuencia y una intensidad diferente.

La figura 10.26 muestra la distribución espectral para el canto del mirlo común en ciudad (color azul) y en bosque (color verde). El gráfico mostrado representa el contenido de información en función de la frecuencia con un escalado de 100 Hz. Las líneas verticales indican el porcentaje de error o desviación de los resultados por cada frecuencia. Los resultados evidencian lo que muchos expertos están apuntando (Nemeth, y otros, 2013).



**Figura 10.26.** Distribución de elementos sonoros del mirlo común en la ciudad de Viena (azul) y en los bosques de Viena (verde) (Nemeth, y otros, 2013).

Las aves en entornos urbanos están sometidas a un nivel sonoro ambiente muy superior al que encontrarían en los parajes naturales. Instintivamente, las aves han reaccionado de tres maneras:

- Por un lado, han aumentado el intervalo de frecuencia en el que emiten las señales sonoras. Se puede apreciar como en las bandas de 2,3 kHz hasta los 3,2 kHz la línea azul (canto en ciudad) está por encima de la verde (canto en bosque). Lo más destacable es que la fundamental ha pasado de 1,9 kHz de promedio en bosque a 2,3 kHz en ciudad.
- Por otro lado, la energía emitida en ambas situaciones es similar en valor absoluto, pero se ha variado su distribución en frecuencia. El aumento de la frecuencia emitida permite al canto separarse de las frecuencias presentes en el sonido ambiente en las ciudades, facilitando su distinción por otros seres. Concretamente, para la frecuencia de 2,3 kHz en ciudad el nivel aumenta 6 dB respecto del nivel en bosque. Aumentar la frecuencia supone un esfuerzo mayor para el ave.
- Y, por último, algunas aves han optado por aumentar la redundancia de las señales acústicas para tratar de asegurar que, a pesar del ruido ambiente, sus homónimos

puedan escuchar bien el mensaje. La redundancia de la información se consigue repitiendo más veces el mismo mensaje. Se han encontrado tres especies con esta estrategia: la codorniz japonesa, el pingüino rey y los pinzones comunes.

La estrategia de agregar sonidos de pájaros al paisaje sonoro produce un efecto enmascarador, solo para ruidos con niveles estables sin interrupciones, como es el caso de las autopistas. Una posible explicación de este fenómeno es la curiosidad acústica, donde se llama la atención auditiva hacia el sonido que tiene la mayor variabilidad temporal en el nivel sonoro conjunto. Es decir, el ruido de tráfico, si es continuo y poco variable, queda en un segundo plano cuando otros sonidos variables aparecen en la escena sonora. Estos resultados sugieren que la calidad del paisaje sonoro está fuertemente influida por el significado asociado a los diferentes sonidos que se escuchan, por lo que los diseñadores acústicos no deben dirigir su atención únicamente al nivel de los sonidos no deseados.

#### ***10.1.13.2. Sonidos naturales: saltos y fuentes de agua***

El agua es el elemento original de la vida y tiene un simbolismo único. Sin embargo, la lluvia, una fuente, un río, una cascada, el mar..., cada uno hace su propio sonido único y distinto de los otros, pero todos comparten el mismo simbolismo: el agua. A lo largo de la historia, las características del agua se han utilizado por su valor estético, siendo muy populares por sus atributos visuales y por su contribución a la estimulación de otros sentidos (Brown & Rutherford, 1994).

Los sonidos ambientales, como los sonidos del agua, desempeñaron un papel importante en el paisajismo y la jardinería de las culturas antiguas. En Egipto, el agua ha dictado la forma de los jardines y el patrón de vida desde los primeros tiempos. La característica central de un jardín egipcio antiguo solía ser la piscina, a menudo para los peces, pero también para el placer. Además de proporcionar agua potable, se utilizaron elementos de agua para la decoración. En la Antigua Roma (siglo VIII a. C.-siglo V d.C.), el agua era venerada como un regalo de los dioses y las fuentes estaban decoradas con máscaras de bronce o piedra, simbolizando animales o héroes.

Las características sonoras del agua se pueden clasificar en dos tipos: aguas tranquilas o en movimiento. El agua tranquila se refiere a un cuerpo de agua plano, estático y silencioso, como estanques, lagos o piscinas. El agua en movimiento se refiere al agua que fluye y cae, como arroyos, saltos de agua y cascadas. El agua que fluye se refiere al concepto de «agua que fluye hacia abajo, a lo largo, sobre y a través de varias superficies y formas». El agua que cae se refiere al agua que cae hacia abajo y desde alturas específicas, mientras que los chorros se refieren al agua «creada al empujar el agua hacia el aire a través de una boquilla desafiando la gravedad» (Booth, 1989).

Una piscina o estanque de agua se puede considerar un cuerpo de agua plano y estático. La forma de la piscina utilizada en el diseño de una fuente depende del entorno y otras características como la forma, pero el aspecto más importante del diseño es que la piscina o el estanque tengan una apariencia natural. Las aguas sin movimiento no producen sonidos, pero, en cambio, modifican el entorno sonoro, ya que su superficie es altamente reflectante. Los estanques o lagos de gran superficie pueden actuar como reflectores sonoros entre orillas opuestas. Sin embargo, esta propiedad en general no se considera a la hora de crear un paisaje sonoro urbano, por las reducidas dimensiones.

Tanto en entornos naturales como urbanos, los paisajes acuáticos se consideran más reconstituyentes y agradables que los entornos sin agua (Wilkie & Stavridou, 2013). Incluso se prefieren los entornos urbanos con agua a los entornos naturales (verdes) sin agua. Las vistas del agua natural tienen una repercusión económica de cuánto estamos dispuestos a pagar por nuestro espacio vital. Por ejemplo, los residentes de los Países Bajos están dispuestos a pagar entre un 7% y un 11% más por su vivienda si esta tiene vista del agua (Luttik, 2000).

La incorporación del agua como medio natural en el paisaje se produce para que haya un sonido y una estética visual. El agua en movimiento en una fuente se puede clasificar como caída libre/inclinada y flujo obstruido. El agua de caída libre/inclinada se refiere al agua que cae de una elevación a otra de manera ininterrumpida y su carácter depende del volumen y la velocidad del flujo, la altura de caída, el estado del borde, la superficie de impacto y las características de la piscina de recolección tales como la profundidad del agua y la presencia de superficies duras (Booth, 1989) (Brown & Rutherford, 1994).

Por otro lado, el flujo obstruido se refiere al agua que choca contra varios obstáculos mientras cae entre dos elevaciones. Estas categorías incluyen cascadas para las cuales diferentes condiciones de borde, como un borde liso, un borde de diente de sierra y un borde hecho de pequeños agujeros, pueden permitir generar diversos sonidos.

Las fuentes y los saltos de agua no son solo placeres visuales; el sonido de salpicaduras, gorgoteo y burbujeo es importante, especialmente cuando no se puede escuchar el tráfico. En el diseño de las características del agua, los criterios acústicos no siempre se resuelven *a priori*, presumiblemente debido a la falta de conocimiento sobre cómo predecir y planificar la efectividad del enmascaramiento acústico en un entorno particular (Brown & Rutherford, 1994).

El diseño de las características del agua basado en un punto de vista paisajístico/arquitectónico tiene como objetivo utilizar funciones estéticas para proporcionar disfrute visual (creando una fuente de belleza natural), puntos focales (áreas de especial interés que atraen la atención), hábitat para fauna, oportunidades recreativas (áreas para nadar,

pasear en bote, pescar), estanques de retención de aguas pluviales y reservas de riego (Grau & Dreiseitl, 2005).

Entre los factores que intervienen en el diseño de fuentes o saltos de agua, el sonido que produce el elemento se considera importante. El agua que cae al suelo se describe como un sonido agudo producido por las salpicaduras generadas en la colisión del agua contra la superficie dura. Cuando el agua cae en un estanque lleno de agua, parte del movimiento de la caída es absorbido por el agua presente en el estanque, de modo que la cantidad de energía de alta frecuencia es ligeramente menor que cuando cae sobre una superficie dura. El agua que cae al agua genera un sonido más profundo, con más cuerpo (baja frecuencia), que el agua que cae sobre una superficie dura. El agua al impactar sobre la superficie del estanque genera burbujas de gran tamaño que al explotar generan la baja frecuencia.

Los sonidos originados por chorros de fuente dependen del tipo de boquilla considerada. Un solo chorro produce un sonido con contenido de media y alta frecuencia, con ciertas irregularidades en el nivel, debido a la caída de agua de los chorros que golpean el agua circundante y la generación de movimientos aleatorios. El sonido de un chorro de pulverización produce un sonido similar al de ruido blanco, con unos niveles sonoros más constantes que varían con la presión.

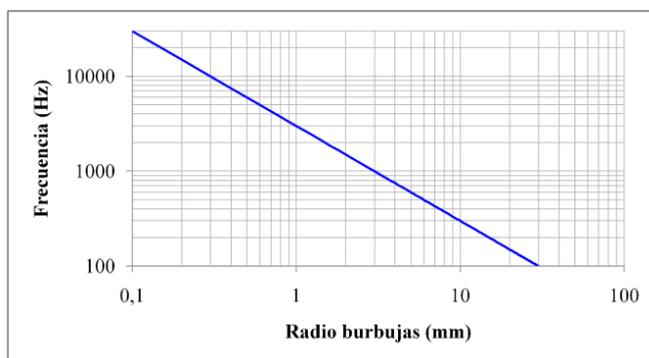
La capacidad de los sonidos generados por el agua para enmascarar parcial o completamente los sonidos no deseados, como el ruido del tráfico, se limita a situaciones en las que las dos fuentes tienen características temporales y espectrales similares (Watts, Pheasant, Horoshenkov, & Ragonesi, 2009) (De Coensel, y otros, 2010) (Nilsson, Alvarsson, Radsten-Ekman, & Bolin, 2010) (Galbrun & Ali, 2013). El ruido del tráfico rodado en zonas urbanas suele contener importantes componentes de baja frecuencia, ya que a bajas velocidades el ruido de los neumáticos es poco influyente. Además, la presencia de regulación con semáforos en los alrededores potencia el contenido de baja frecuencia en el sonido ambiental de la zona.

Las fuentes o los saltos de agua suelen tener mayor contenido energético a medias y altas frecuencias. Esto hace que muchos sonidos generados por el agua no sean adecuados para enmascarar, ya que sus espectros están dominados por sonidos más estridentes. Algunas fuentes de agua con elevados caudales pueden generar sonidos de banda ancha que pueden enmascarar parcial o completamente el ruido del tráfico (Galbrun & Ali, 2013). Sin embargo, en determinadas situaciones, parece que tales elementos acuáticos pueden generar por sí mismos sonidos considerados desagradables por una parte significativa de la población, con lo cual el problema no se soluciona, sino que más bien se agrava, al añadir más ruido al ya existente. Por ejemplo, algunos estudios han sugerido que las estructuras en forma de gran cascada generan sonidos considerablemente menos agradables que los del agua con flujos más bajos (Radsten-Ekman, Axelsson, & Nisson, 2013) (Galbrun & Calarco, 2014).

10.1.13.2.1. Características sonoras de los saltos/fuentes de agua

Es evidente que las cascadas o los saltos de agua producen sonido. El fenómeno físico que produce este sonido está relacionado con la formación de burbujas en el interior del líquido. Las primeras referencias aparecen en 1921, en el libro *The World of Sound* de Bragg. El autor sugiere que el sonido emitido por el fluir del agua se origina por fenómenos de cavitación, que se genera en los impactos de las gotas de agua sobre una superficie dura.

Las primeras investigaciones sobre la relación entre las burbujas en el seno del líquido y la frecuencia del sonido emitido son de Minneart en 1931, quien encontró la relación entre ambos parámetros con el gráfico que se muestra en la figura 10.27.



**Figura 10.27.** Relación entre el radio de las burbujas de agua y la frecuencia radiada según Minneart (1931).

Del gráfico de la figura 10.27 se deduce que las burbujas pequeñas generan frecuencias elevadas, mientras que las burbujas grandes pueden generar frecuencias más bajas. No obstante, la generación de burbujas grandes implica caudales y alturas de caída notables, que difícilmente se pueden reproducir en las fuentes urbanas de las poblaciones.

En el caso de que el agua caiga sobre una superficie de agua, el sonido de impacto es de menor nivel y se genera por la generación de burbujas en el agua. Hay un breve período antes del contacto inicial entre las gotas de agua y la superficie del agua, cuando las regiones de contacto se mueven provocando pequeñas ondas de choque con una velocidad supersónica.

El sonido dominante es generado por las burbujas vibratorias que se forman cuando el aire queda atrapado en el interior del agua, causado por las turbulencias que se generan, o cuando el aire es inyectado por una boquilla o por el conocido efecto de cavitación

producido por la hélice de una embarcación. Las burbujas, al romper, generan fuentes de sonido individuales.

La caída del agua sobre una lámina de agua genera burbujas que quedan hundidas proporcionalmente a la altura del salto de agua. Estas burbujas, a medida que suben a la superficie, posibilitan que la presión en su interior disminuya y la frecuencia emitida aumente. La burbuja oscilante sumergida creará así un sonido que se propagará a la superficie del líquido donde se transmite al aire. Como en el salto de agua se generan diferentes tamaños de burbujas y estas llegan a distintas profundidades, se generan sonidos de banda ancha, sin contenido tonal (Leighton, 1994).

El elemento común en todos los saltos, fuentes y cascadas es el agua. A pesar de que el elemento que origina el sonido es el mismo, el resultado final depende de multitud de variables. El sonido generado por un salto/fuente de agua depende de diferentes factores:

- La caída libre que hace el agua antes de impactar sobre una superficie. Afecta directamente al nivel sonoro. A mayor altura libre, mayor nivel sonoro emitido.
- El tipo de superficie contra la que impacta el agua. A mayor dureza, mayor contenido en alta frecuencia que hace el sonido más estridente y, por tanto, menos agradable.
- El caudal del agua que cae o fluye. Grandes caudales son potencialmente más ruidosos. Sin embargo, este parámetro depende de la presión. A igual altura, sin presión, con caída o movimiento del agua por gravedad, los sonidos son mucho más agradables.
- La presión del agua. Factor determinante en el nivel y el espectro sonoro emitido. A mayor presión, se generan sonidos más desagradables.
- En caso de haberlo, el número de chorros de agua que caen simultáneamente. A mayor número, mayor poder de la fuente sonora y el nivel sonoro puede cubrir áreas mayores.

Las cascadas de agua en la naturaleza suelen presentar dimensiones y caudales importantes que no los hace aptos para reproducirlas en un entorno urbano. A menor escala, en entornos urbanos los saltos/fuentes de agua producen unos sonidos que pueden ayudar a rebajar el estrés acumulado.

Una característica bastante común en las fuentes y saltos de agua urbanos es el poder enmascarador que el sonido del agua tiene sobre su entorno más cercano.

Los resultados coinciden en señalar que los sonidos de baja frecuencia son más difíciles de enmascarar que los sonidos de alta frecuencia debido al enmascaramiento energético. Si el sonido de enmascaramiento hace que un sonido objetivo sea inaudible,

se consigue un enmascaramiento total, y si es menos fuerte, se consigue un enmascaramiento parcial. Las fuentes de agua urbanas no radian bajas frecuencias con suficiente energía para tapar al ruido de tráfico.

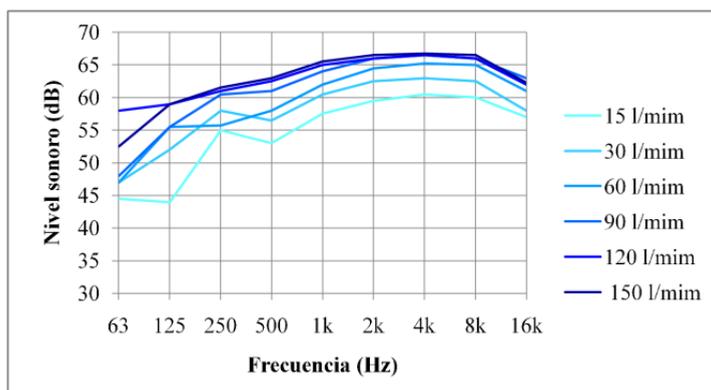
Por esta razón, el efecto positivo para mejorar la percepción del paisaje sonoro alrededor de la fuente podría conseguirse por el enmascaramiento informativo (enmascaramiento perceptivo), lo que significa que diseñar los sonidos deseados representa una estrategia eficiente para distraer a las personas de los sonidos no deseados y atraer su atención hacia los sonidos deseados y valorados positivamente.

Otros resultados obtenidos del análisis de las características espectrales muestran que el ruido del tráfico rodado urbano tiene una gran energía a bajas frecuencias (de 32 Hz a 80 Hz) y los sonidos generados por el agua de un arroyo o del agua en caída libre tienen un poco más de energía a bajas frecuencias respecto de las cascadas y fuentes. En las frecuencias medias, todos los sonidos del agua tienen características espectrales similares. Los experimentos auditivos, basados en escuchar los sonidos del agua y el ruido del tráfico en la carretera fijados entre 55 dBA y 75 dBA (que corresponden a la exposición al ruido de la mayoría de los espacios urbanos) muestran que se prefieren los sonidos del agua con una relación señal/ruido de  $-3$  dB. También se ha comprobado que agregar sonidos de fuentes a los paisajes sonoros puede reducir el nivel sonoro aparente del ruido del tráfico solo si este último tiene una baja variabilidad temporal (por ejemplo, el tráfico desde una autopista o una carretera principal).

Las características acústicas de las fuentes y los saltos de agua son difíciles de determinar partiendo de datos reales, ya que no se pueden variar ciertos aspectos como el caudal de agua, la altura de caída de esta, el tipo de surtidos usado, etc. Para aportar datos sobre este fenómeno, se estudiaron en laboratorio diversas fuentes y saltos de agua con distintas configuraciones. Al ser siempre el mismo escenario acústico, los resultados presentan una menor dispersión. Las pruebas se hicieron usando un tanque para la recogida de agua y para la proyección se usaron bombas impulsoras de bajo ruido.

Las mediciones se hicieron a una altura de la base de 1 m y a 0,5 m del punto central donde caía el agua, que corresponde a una persona que está en campo cercano a la fuente o salto de agua. La figura 10.28 muestra el espectro sonoro producido por una cascada de agua de 1m de anchura y con caída libre de 1 m para diferentes caudales de agua.

Se observa que, a partir de los 90 l/min, los espectros mantienen un perfil característico, con un máximo entre 2 kHz y 8 kHz, y por la parte de baja frecuencia una pendiente suave de unos 2,5 dB/Oct, hasta la banda de 125 Hz. Para la banda de 63 Hz, los niveles son netamente inferiores. Los datos mostrados corroboran que los saltos de agua producen bajas frecuencias, pero que, para cubrir las bandas inferiores a los 100 Hz, es necesario generar burbujas de aire de mayor tamaño y eso requiere de caudales y alturas de caída del agua notables (v. figura 10.27).



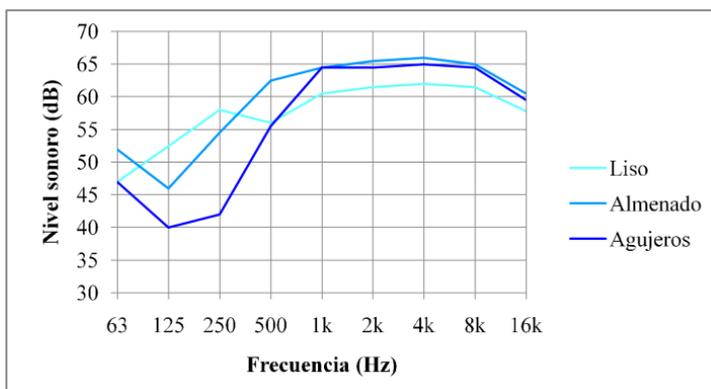
**Figura 10.28.** Espectro de frecuencia para un salto de agua de 1 m de anchura en caída libre de 1 m (Galbrun & Ali, 2013).

Los niveles sonoros obtenidos en todos los casos se resumen en la tabla 10.2.

**Tabla 10.2.** Nivel sonoro equivalente para saltos de agua de 1 m de anchura en caída libre de 1 m con distintos caudales (Galbrun & Ali, 2013)

|         | 15 l/min | 30 l/min | 60 l/min | 90 l/min | 120 l/min | 150 l/min |
|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Leq dBA | 66,2     | 68,9     | 71,0     | 72,5     | 72,7      | 73,1      |

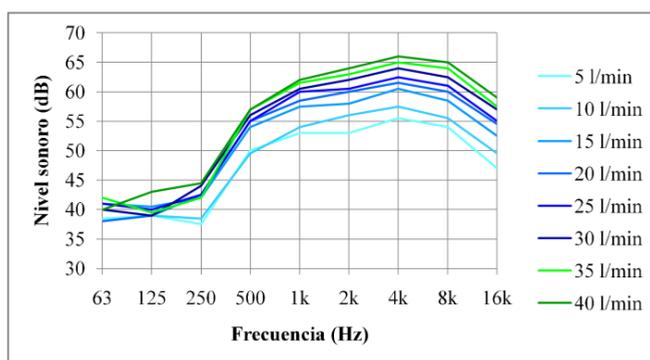
Si se varía la anchura y la arista de la lámina de agua en caída libre, se puede modificar el sonido generado. El espectro sonoro para tres tipologías de salto de agua de 1 m de anchura y 1 m de caída libre, con un caudal de 30 l/min, se muestra en la figura 10.29.



**Figura 10.29.** Influencia de la anchura y arista de la lámina de agua en caída libre (salto de agua) (Galbrun & Ali, 2013).

El espectro más amplio se consigue con láminas de agua más anchas y lisas, mientras que el espectro más reducido y concentrado en las altas frecuencias se produce con un salto de agua a través de agujeros. Los agujeros en este caso eran de 2 mm de diámetro, creando una cortina de agua. En los tres casos, el agua fluye sin presión y esta cae por gravedad al suelo. El borde almenado del salto de agua presenta un espectro intermedio, donde se aprecia igualmente una caída notable de energía a bajas frecuencias.

En contraposición al salto de agua de la figura 10.28, la figura 10.30 muestra el mismo ensayo, pero con un surtidor con 37 agujeros (tipo ducha), proyectando el agua hacia arriba y con una caída libre promedio de 1m.



**Figura 10.30.** Espectro de frecuencia para un surtidor de agua con 37 agujeros, proyectando agua hacia arriba, con caída libre de 1 m (Galbrun & Ali, 2013).

Los niveles sonoros globales obtenidos por los casos mostrados anteriormente se resumen en la tabla 10.3.

**Tabla 10.3.** Nivel sonoro equivalente para saltos de agua de 1 m de anchura en caída libre de 1 m con tres perfiles diferentes (Galbrun & Ali, 2013)

|         | Liso | Almenado | Agujeros |
|---------|------|----------|----------|
| Leq dBA | 68,1 | 72,1     | 71,2     |

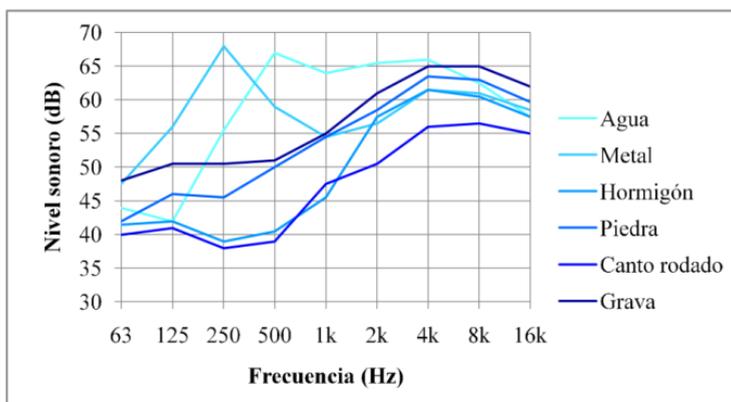
Como se puede comprobar, los surtidores de agua mediante perforaciones tienen una carencia de energía a bajas frecuencias. El caudal de agua que admiten estos dispositivos es finito, no se superan los 40l/min, por la limitación que supone la sección de paso que presentan los agujeros. Por tanto, la capacidad para generar burbujas en el seno del líquido de los surtidores tipo ducha es mucho menor y, por ello, se reduce drásticamente la energía a baja frecuencia. El sonido generado tiene la energía desplazada hacia la alta frecuencia, que lo hace, en principio, más agudo.

La tabla 10.4 resume los niveles sonoros medidos en función del caudal de agua de 5 l/min a 40 l/min mostrados en la figura 10.30.

**Tabla 10.4.** Nivel sonoro para un surtidor con 37 agujeros proyectando agua hacia arriba con caída libre de 1 m (Galbrun & Ali, 2013)

|         | 5 l/min | 10 l/min | 15 l/min | 20 l/min | 25 l/min | 30 l/min | 35 l/min | 40 l/min |
|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Leq dBA | 60,7    | 62,6     | 65,5     | 66,8     | 67,7     | 69,1     | 70,1     | 71,1     |

Otra característica importante de las fuentes y los saltos de agua es el material en el que impacta el agua. En función de su naturaleza, el espectro radiado es diferente. La figura 10.31 muestra el espectro radiado por un salto de agua almenado de 1 m de anchura y con una caída libre de agua de 0,5 m.



**Figura 10.31.** Espectro de frecuencia en función del material en el punto de impacto para un salto de agua almenado de 1 m de anchura y caída del agua de 0,5 m (Galbrun & Ali, 2013).

Se puede observar que el espectro más amplio corresponde al impacto directo con el agua. En este caso, además, se radia más energía a bajas frecuencias. Las burbujas que se generan en el seno del líquido producidas por el salto de agua son las que generan los niveles sonoros de baja frecuencia. Para otras superficies, los impactos del agua no pueden generar burbujas tan grandes y esto merma el contenido en baja frecuencia, quedando un sonido más agudo y estridente. Se observa un pico en la banda de 250 Hz para el metal, probablemente debido a una resonancia de la placa metálica sobre la que impacta el agua. Los niveles globales radiados por el impacto del salto de agua sobre distintas superficies se resumen en la tabla 10.5.

**Tabla 10.5.** Nivel sonoro equivalente en función del tipo de superficie en la que impacta el agua (Galbrun & Ali, 2013)

|         | <b>Agua</b> | <b>Metal</b> | <b>Hormigón</b> | <b>Piedra</b> | <b>Canto rodado</b> | <b>Grava</b> |
|---------|-------------|--------------|-----------------|---------------|---------------------|--------------|
| Leq dBA | 72,1        | 67,0         | 65,5            | 67,7          | 60,5                | 69,5         |

Se puede observar que el mayor nivel sonoro corresponde al impacto directo con el agua, mientras que el menor nivel sonoro se produce con el canto rodado. El resto de materiales estudiados muestran niveles sonoros similares, con ligeras diferencias espectrales.

Para ilustrar la variabilidad de resultados obtenidos en función del diseño de la fuente/salto de agua, se muestran seguidamente una serie de ejemplos reales. Lo destacable en estos casos es la forma espectral del sonido. Los distintos registros sonoros se han llevado a cabo a distintas distancias, buscando captar con nitidez todos los matices del sonido generado y evitar en lo posible sonidos ajenos al salto o a la fuente de agua. Por este motivo, los niveles mostrados pueden variar respecto otros estudios, ya que el nivel sonoro varía con la distancia a la que nos encontremos.

#### 10.1.13.2.2. *Grandes fuentes de agua*

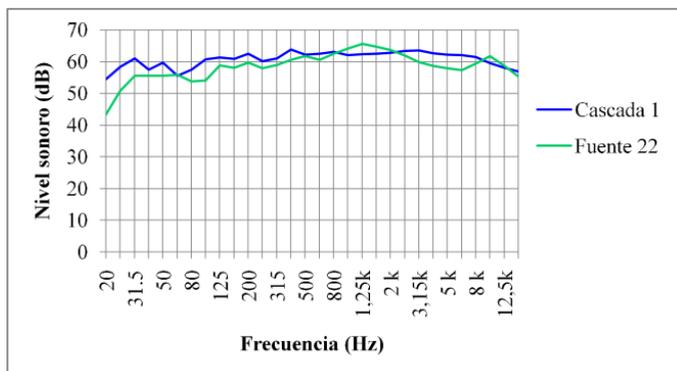
Las llamadas *cascadas naturales* son realmente saltos de agua con caudales importantes y alturas notables que producen sonidos de banda ancha y con niveles sonoros notables. Estos elementos son muy apreciados en entornos naturales no solo por el sonido, sino por la espectacularidad visual. Supone además una experiencia reconfortante, relajante. Estos efectos relajantes no son imputables en ningún caso al sonido de la cascada, sino a la presencia de iones negativos que se generan en todos los procesos naturales y que equilibran o compensan los iones positivos que se generan por la actividad humana y que propician una actitud más agresiva en humanos.

Lo más parecido en reproducciones urbanas son las grandes fuentes ornamentales, con multitud de salidas de agua a presión. Un ejemplo puede ser la fuente de Montjuïc, que dispone de muchos surtidores que pueden regular el caudal y la dirección de los chorros, permitiendo distintas configuraciones variables con la música (figura 10.32). Por su gran tamaño, produce un sonido similar en cuanto a distribución de frecuencias que una cascada natural.

Ambos sonidos son de banda ancha, semejantes al ruido rosa, y el espectro sonoro es bastante plano, entre los 20 Hz y los 16 kHz. Gracias a su elevada energía, estos sonidos son ideales para tapar otros no deseados presentes en la zona. La figura 10.33 muestra el espectro para una cascada natural de agua y se compara con el sonido producido por una fuente grande en un entorno urbano.



**Figura 10.32.** Fuente de Montjuïc (Barcelona) como ejemplo, a escala reducida, del sonido de una gran cascada.



**Figura 10.33.** Espectro sonoro de una cascada, en comparación con una fuente urbana grande (fuente 22: Montjuïc, Barcelona).

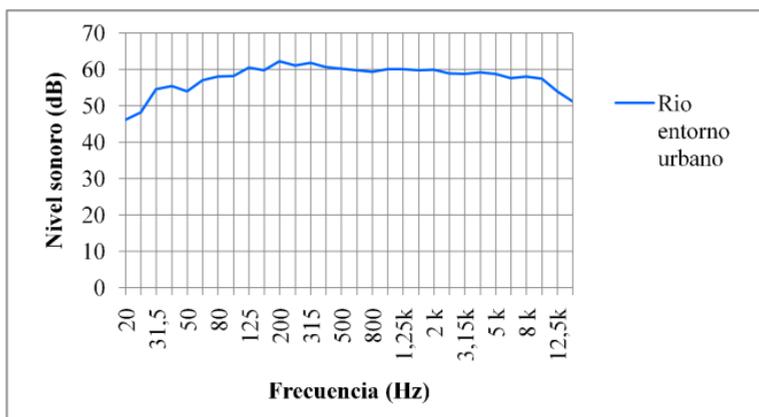
En este ejemplo, lo más destacable es el espectro sonoro radiado, que es bastante amplio. El sonido generado se considera en general poco agradable, ya que tiene un marcado acento estridente que no invita a la relajación. La distancia de medición no fue la misma y los niveles sonoros no se pueden comparar. Con este tipo de fuentes se pueden enmascarar otros sonidos no deseados, pero no se consigue un entorno amigable a nivel sonoro. Para ilustrar la dificultad de relajación de estos sonidos, se hicieron registros con el sonido procedente de un río atravesando un entorno urbano situado en un paraje de montaña. El entorno es bastante silencioso durante todo el día. La prueba consistió en valorar la calidad del sueño con la ventana abierta en una habitación de un hotel que da al río Valira, en la población de Escaldes-Engordany en Andorra. Se hicieron mediciones en el exterior de la ventana.

La figura 10.34 muestra la imagen desde la habitación del hotel. Tras varias noches, se constata que, si bien al principio es fácil conciliar el sueño, las personas se despiertan varias veces durante la noche por el sonido excesivamente «estridente». Esta circunstancia se pudo solventar voluntariamente cerrando la ventana (que, por cierto, ofrecía un grado de aislamiento acústico muy notable, como suelen mostrar en general los alojamientos de montaña).



**Figura 10.34.** Izquierda: vista del río desde la habitación del hotel. Derecha: detalle de los saltos de agua cercanos al punto de medida.

Por otro lado, el sonido procedente del río enmascaró las voces y el sonido de las televisiones con un volumen desmesurado procedentes de las habitaciones contiguas. La figura 10.35 muestra el espectro sonoro, medido a unos 8 m del centro del cauce del río, del sonido procedente del río Valira a su paso por Escaldes-Engordany (Andorra).



**Figura 10.35.** Espectro sonoro del río Valira a su paso por Escaldes-Engordany.

### 10.1.13.2.3. Fuentes con surtidores, flujo turbulento y saltos de agua

Constituyen la mayoría de fuentes que podemos encontrar en entornos urbanos. Suelen ser de medio y pequeño tamaño y tienen diversos surtidores de agua dirigidos hacia arriba o inclinados que impactan sobre estructuras sólidas y sobre el agua que yace en un estanque o piscina en la parte inferior de forma circular, cuadrada o rectangular, donde el agua se hace circular de nuevo con una bomba. También pueden tener saltos de agua, generalmente laminar con arista recta o seccionada.

Hay fuentes en las que el agua está canalizada pasando por pequeños saltos, cascadas o con un recorrido de flujo turbulento producido por el paso de agua por un canal con una superficie irregular en la base. Estas estructuras acuáticas suelen ser de mayor tamaño y, por ello, es menos frecuente encontrarlas en entornos urbanos.

Seguidamente, se muestran tres casos de fuentes que producen espectros de sonido similares. Observamos algunas diferencias en la cantidad y las disposiciones de los surtidores de agua y las alturas de caída de esta. En la mayoría de casos, hay un estanque o balsa inferior que recoge el agua y se vuelve a poner en circulación con una bomba.

En la fuente 18, el agua sale proyectada inclinada hacia arriba mediante seis chorros rectilíneos que forman una cortina de agua que impacta sobre el agua del recipiente inferior de forma circular. En la fuente 20, hay diversos surtidores de agua hacia arriba inclinados donde el agua cae sobre un recipiente circular elevado, lleno de agua. Este recipiente tiene cuatro saltos de agua de canto liso, situados a  $90^\circ$ , por donde el agua cae al depósito inferior también circular. En la fuente 25, se proyectan diversos chorros de agua hacia arriba con distintas inclinaciones y se produce el impacto sobre el agua del estanque. La figura 10.36 muestra las imágenes de las fuentes mostradas de ejemplo.



**Figura 10.36.** Imágenes de las fuentes analizadas. De izquierda a derecha, fuente 18, 20 y 25.

Las tres fuentes presentan un margen de frecuencias emitido similar, que va de los 125 Hz a los 16 kHz, aproximadamente, donde el nivel sonoro oscila unos 10 dB entre los tres casos. La fuente 20 tiene menor energía en frecuencias bajas debido a que el caudal de los surtidores es menor que en las fuentes 18 y 25, y este menor caudal genera burbujas de menor tamaño cuando impacta en el agua situada en la base. La figura 10.37 muestra el espectro sonoro obtenido para los tres casos analizados.

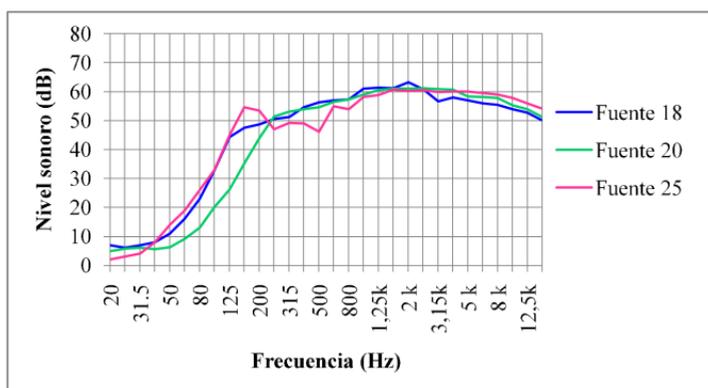


Figura 10.37. Espectro sonoro de las fuentes 18, 20 y 25 analizadas.

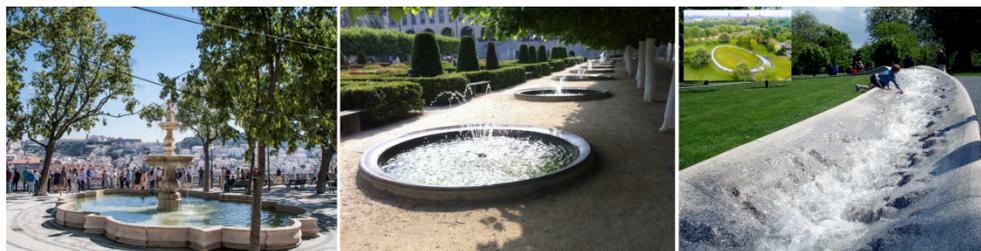
A pesar de las diferencias visibles en los espectros sonoros, las puntuaciones cualitativas son muy parecidas, quedando todas en un intervalo medio de aceptación o agrado del sonido. Los niveles sonoros en las proximidades, son muy parecidos y se resumen en la tabla 10.6.

Tabla. 10.6. Nivel sonoro equivalente radiado por las tres fuentes mostradas

|         | Fuente 18 | Fuente 20 | Fuente 25 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| Leq dBA | 70,5      | 71,3      | 70,8      |

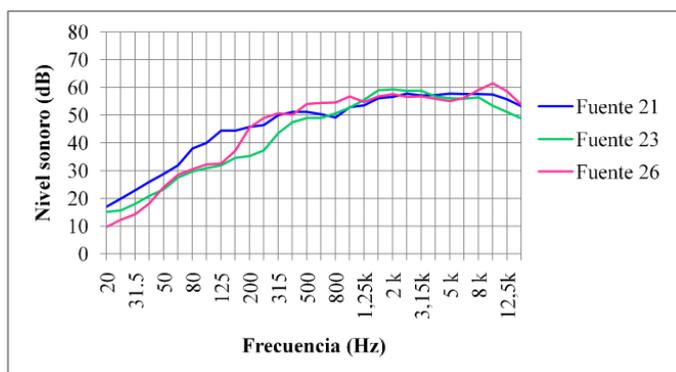
#### 10.1.13.2.4. Saltos de agua y canal con suelo irregular

Las fuentes con salto de agua son muy frecuentes. Se comparan tres que presentan sonidos similares. Por un lado, una fuente que tiene un salto de agua seccionado y con una altura de caída libre del agua superior a 1 m sobre lámina de agua. Por otro lado, diversas fuentes con base circular y un surtidor central con diversas bocas proyectando el agua hacia arriba con una caída inferior a 1 m. Por último, un tipo de fuente distinto a las dos anteriores. Se trata de un canal de agua con pendiente, por donde el líquido puede fluir. A un lado hay pequeñas cascadas y al otro lado hay un suelo con formas irregulares para producir remolinos de agua y generar sonido. La fuente ocupa una superficie bastante mayor que una construcción tradicional, tiene una forma de aro irregular, con dos vertientes a ambos lados del aro. El espectro mostrado corresponde al sector de las aguas que bajan por el canal inclinado con irregularidades en la base, causando sonidos de turbulencias del agua con un burbujeo apreciable. La figura 10.38 muestra las imágenes de las fuentes 21, 23 y 26 analizadas.



**Figura 10.38.** De izquierda a derecha, imágenes de las fuentes 21, 23 y 26.

La figura 10.39 muestra los espectros sonoros para los tres casos descritos y unas imágenes de los casos analizados.



**Figura 10.39.** Espectro sonoro de las fuentes 21, 23 y 26.

Las fuentes mostradas presentan sonidos parecidos, con una distribución energética muy similar. La valoración subjetiva del agrado del sonido obtiene las puntuaciones más elevadas. Los niveles sonoros se resumen en la tabla 10.7.

**Tabla 10.7.** Nivel sonoro radiado por las tres fuentes mostradas

|         | Fuente 21 | Fuente 23 | Fuente 26 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| Leq dBA | 68        | 68,8      | 72,5      |

#### 10.1.13.2.5. Influencia del caudal

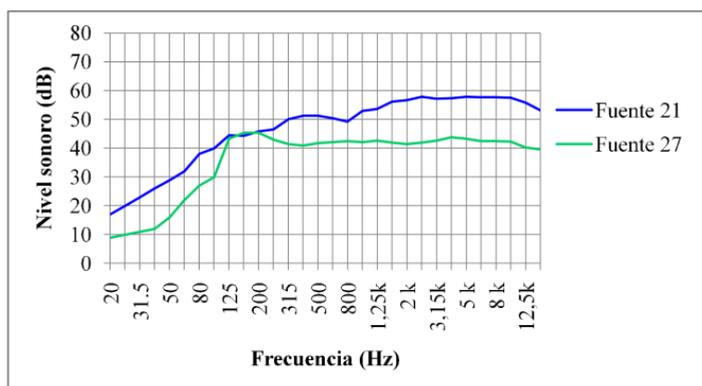
Se muestra el caso de dos fuentes de parecida concepción, con materiales similares, pero con un caudal de agua distinto. La figura 10.40 muestra unas imágenes de ambas

fuentes, donde se puede apreciar la similitud en el diseño. Se trata de un salto de agua sectorizado con una altura de caída superior a 1 m en ambos casos. Lo que cambia notablemente entre ambas fuentes, por un lado, es el entorno acústico donde están ubicadas ambas fuentes. La fuente 21 se encuentra en un patio interior rodeado de construcciones de piedra que presenta una cierta reverberación, mientras que la fuente 27 se encuentra también rodeada de construcciones, pero notablemente más alejadas, quedando un entorno más abierto. Por otro lado, la fuente 21 tiene un mayor caudal de agua.



**Figura 10.40.** Imagen de las fuentes 21 y 27 de similares características físicas.

La figura 10.41 muestra el espectro sonoro radiado por ambas fuentes. Se observa como la fuente 21 con mayor caudal ofrece un espectro más plano, con un nivel sonoro superior. Es destacable que la fuente 27, con menor caudal de agua, presenta un espectro más plano, entre 125 Hz y 16 kHz. Esto propicia una mayor percepción del «burbujeo» del agua al impactar en la base sobre la lámina de agua.



**Figura 10.41.** Espectro sonoro de las fuentes 21 y 27, de similares características, pero con distinto caudal de agua y entorno acústico.

#### 10.1.13.2.6. Pequeño salto de agua en cascada

Esta fuente suele ser de exterior en entornos pequeños, como un jardín privado, y que por sus reducidas dimensiones produce unos niveles sonoros muy moderados. Se trata de un pequeño salto múltiple de agua sin presión, que fluye en caída libre por un tubo o recipiente con una ligera pendiente.

Este tipo de fuente, aunque presenta una potencia radiada pequeña, se analiza porque el sonido que emite genera las calificaciones subjetivas mejor valoradas. Por tanto, se trata de un sonido deseado o esperado en una fuente o salto de agua, como es el caso, y que transmite tranquilidad. El caudal debe ser muy moderado para que el sonido del chorro sea adecuado. La figura 10.42 muestra las imágenes correspondientes a dos tipologías de fuente decorativa para exteriores en jardín privado, correspondientes a las fuentes 14 y 15.



**Figura 10.42.** Imágenes de dos tipologías de fuentes decorativas.

La figura 10.43 muestra el espectro sonoro generado fuentes decorativas. Como se puede observar, hay una banda de frecuencias claramente enfatizada entre 400 Hz y 3,15 kHz, aproximadamente, correspondiente a las turbulencias generadas. Lo más destacable de este sonido es la carencia notable de baja frecuencia por debajo de los 200 Hz, aproximadamente. Respecto las altas frecuencias, se observa que el nivel sonoro generado es bastante similar y decreciente con la frecuencia debido a la poca altura de caída del agua.

Las fuentes 14 y 15 son fuentes con niveles de salto de similar altura. Como se ha dicho anteriormente, el sonido generado se considera muy agradable debido a la poca intrusividad, generando un sonido irregular que no impide una conversación o una lectura, y que alcanzan las máximas puntuaciones en las valoraciones subjetivas de agrado del sonido. El inconveniente es su bajo nivel de potencia acústica radiado.

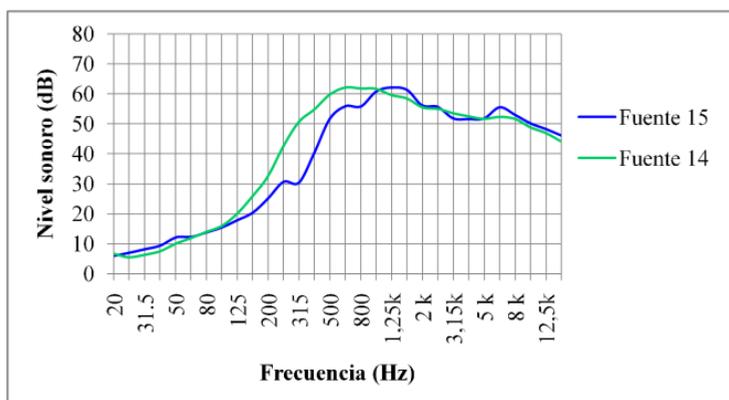
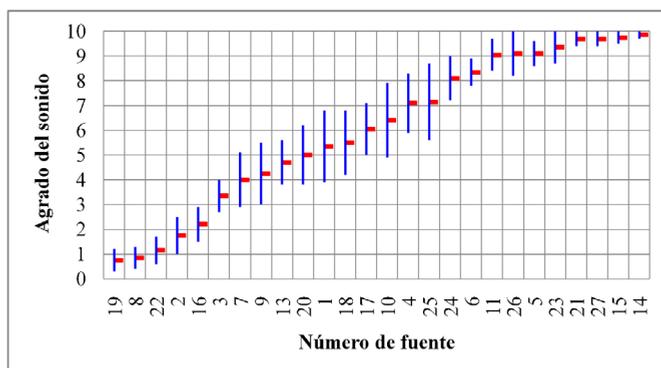


Figura 10.43. Espectro sonoro de fuentes con salto de agua pequeño.

### 10.1.13.3. Valoración subjetiva del sonido de fuentes y saltos de agua

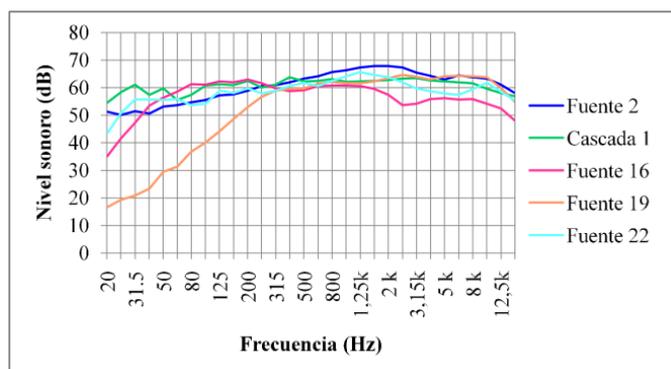
Las fuentes y los saltos de agua que se pueden encontrar en los espacios públicos de las poblaciones suelen tener básicamente una función estética. En muchas ocasiones, sobre todo las grandes fuentes, se encuentran ubicadas en plazas rodeadas de vías de circulación, por lo que su función no contribuye a un efecto sonoro deseado, sino puramente visual. El uso de fuentes y saltos de agua en el diseño de paisajes sonoros es muy habitual, debido a que se considera a estos elementos fuentes sonoras naturales y, por tanto, son sonidos en principio deseados o esperados por las personas y valorados positivamente. No obstante, diversos estudios muestran que no todos los sonidos procedentes de fuentes y saltos de agua se valoran positivamente.

Para tener una referencia práctica en cuanto al agrado del sonido de agua en movimiento, se diseñó un test para valorar la calidad sonora de 26 fuentes y saltos de agua en el que participaron 23 personas con edades de 22 a 56 años. A los participantes se les pidió que clasificaran los sonidos pensando en un entorno saludable y con elementos naturales, con el fin de estar en una zona para relajarse o «desconectar». Las pruebas consistieron en escuchar a través de auriculares el sonido de 26 fuentes y dar una puntuación a cada fuente entre el 1 y el 10, siendo el 1 el peor sonido y 10 el sonido más deseado o agradable. El nivel sonoro se igualó entre los registros para evitar que los resultados fueran sesgados, lo que permitió comparar mejor los aspectos cualitativos del sonido. Los resultados que aparecen en la figura 10.44 muestran con trazo rojo la puntuación obtenida y el orden de preferencia del sonido, desde el más agradable a la derecha hasta el más desagradable a la izquierda. El trazo azul indica la variabilidad de las respuestas para cada fuente.



**Figura 10.44.** Agrado del sonido de las fuentes y los saltos de agua analizados.

Se puede observar como, para los extremos del gráfico (los sonidos más desagradables o los más agradables), las puntuaciones fueron bastante coincidentes y con baja dispersión en la valoración entre los oyentes. En cambio, en la parte central, para puntuaciones entre 3 y 7 aproximadamente, la dispersión de las respuestas fue mayor. En cuanto a las valoraciones mejores, destacan los casos 14, 15 y 27 mostrados anteriormente. Los casos 14 y 15 son muy similares y se corresponden con fuentes de pequeño tamaño donde el sonido predominante es la caída por gravedad de un chorro de agua sin presión y de bajo caudal. Sin embargo, el caso 27 se corresponde con una fuente de mayores dimensiones aunque el foco sonoro es el mismo, caída de agua por gravedad sin presión y un caudal moderado. Los perfiles espectrales entre los casos 14 y 15 respecto al 27 son distintos, pero producen reacciones subjetivas muy parecidas. Respecto a las valoraciones peores, fueron los casos 19, 8, 22 y 2, que corresponden a cascadas naturales y a fuentes de gran tamaño en entorno urbano. La figura 10.45 muestra los espectros sonoros de estos cuatro casos de sonidos peor valorados en cuanto al agrado del sonido.



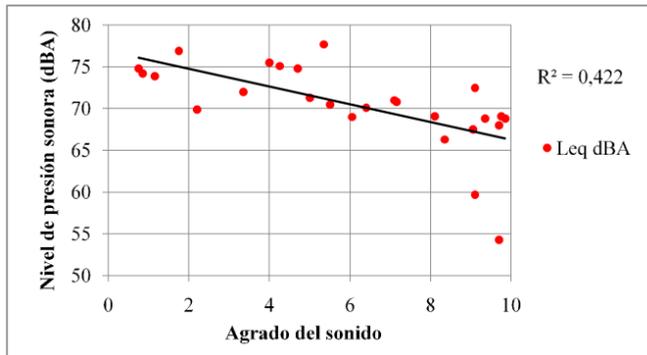
**Figura 10.45.** Espectro sonoro correspondiente a los cinco casos peor puntuados.

Se puede observar que el espectro sonoro de la fuente 19 es bastante distinto al resto, con una carencia notable de baja frecuencia. A pesar de ello, las reacciones subjetivas han sido también muy parecidas en los cinco casos. Esto parece indicar que el perfil espectral de la señal sonora no es suficiente para clasificar la calidad sonora percibida por las personas, procedente de las fuentes y los saltos de agua.

#### 10.1.13.4. Nivel equivalente de presión sonora de fuentes de agua

En las medidas del nivel sonoro, se usa mayoritariamente el indicador de nivel equivalente  $L_{Aeq}$ , ponderado A. En muchos estudios, en los que se valora la calidad acústica de un paisaje sonoro, se recurre de forma errónea a este indicador para clasificar acústicamente el foco sonoro, motivado quizá por su simplicidad de uso. No obstante, los resultados obtenidos son también muy simplistas, y en la mayoría de los casos estos distan mucho de las sensaciones y opiniones subjetivas de las personas.

Los niveles equivalentes ( $L_{Aeq}$ ), obtenidos por las 26 fuentes analizadas mostradas en el apartado anterior, se resumen en el gráfico de la figura 10.46.



**Figura 10.46.** Niveles  $L_{Aeq}$  de los 26 casos de fuentes de agua analizados correlacionados con el agrado del sonido.

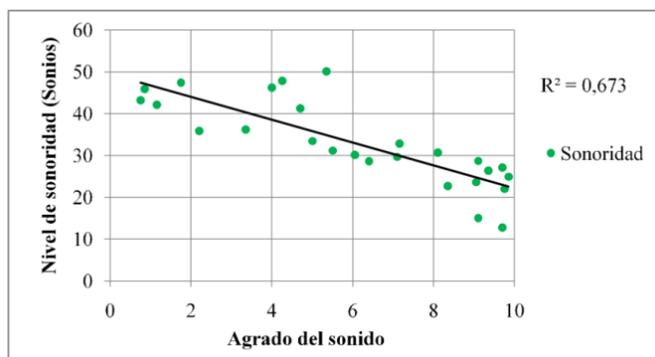
Como se puede apreciar, los niveles sonoros se concentran principalmente entre los 65 y los 75 dBA. Obviamente, el nivel de presión acústica depende de la distancia a la fuente sonora. En todos los casos mostrados, el criterio de distancia se basó en un equilibrio entre tener un registro sonoro fiable y, a la vez, minimizar la influencia de otras fuentes de sonido ajenas. Esto supuso no alejarse excesivamente de la fuente o el salto de agua. El análisis de regresión entre el nivel  $L_{Aeq}$  dBA y el agrado del sonido es bastante bajo. Como se muestra en el gráfico de la figura 10.46, los niveles en dBA más moderados tienen una mejor puntuación.

Sin embargo, no se puede extrapolar este resultado a que con menor nivel de presión acústica el sonido de fuente o salto de agua sea más agradable. Es bien conocido que los niveles sonoros elevados, salvo en determinadas situaciones, producen una mayor sensación de molestia. El caso de las fuentes naturales no es una excepción; por ejemplo, el sonido de las grandes cascadas se considera poco agradable para un entorno tranquilo que invite a la relajación y recuperación del estrés acumulado.

### 10.1.13.5. Nivel de sonoridad de fuentes de agua (sonio)

La sonoridad es un indicador utilizado en los diseños y las mediciones avanzadas y que presenta en general una mayor correlación con las sensaciones percibidas por los humanos.

Aplicando este indicador al análisis de las fuentes y los saltos de agua, se obtienen los resultados que se muestran en el gráfico de la figura 10.47. El análisis de regresión entre la sonoridad y el agrado del sonido es notablemente superior al del  $L_{Aeq}$ . Se puede observar que también hay una dependencia entre el nivel de sonoridad y la puntuación subjetiva de agrado del sonido.



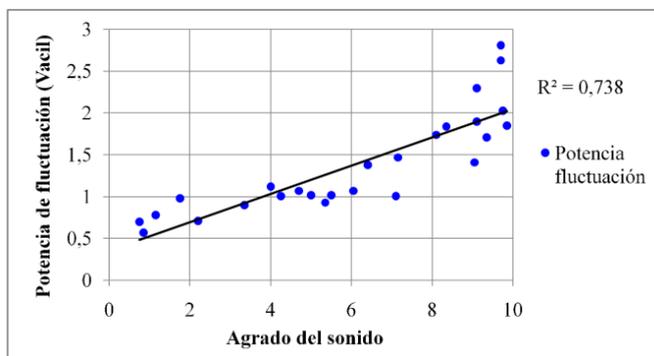
**Figura 10.47.** Niveles de sonoridad obtenidos de 26 fuentes y saltos de agua correlacionados con el agrado del sonido.

### 10.1.13.6. Fluctuación sonora de las fuentes de agua (vacil)

La fluctuación es un indicador psicoacústico, ya explicado anteriormente, que puede tener utilidad para evaluar determinados sonidos. Este indicador valora el grado de modulación alrededor de los 4 Hz de un sonido.

En los sonidos procedentes de los saltos o el fluir del agua, se generan señales que no están presentes todo el tiempo, sino que tienen oscilaciones irregulares de nivel que no quedan reflejadas en los espectros por la integración temporal que comporta.

La figura 10.48 muestra los resultados obtenidos utilizando la fluctuación, para valorar el agrado de los sonidos. Como se muestra, el análisis de regresión entre la fluctuación y el agrado del sonido es mayor que en los casos anteriores.



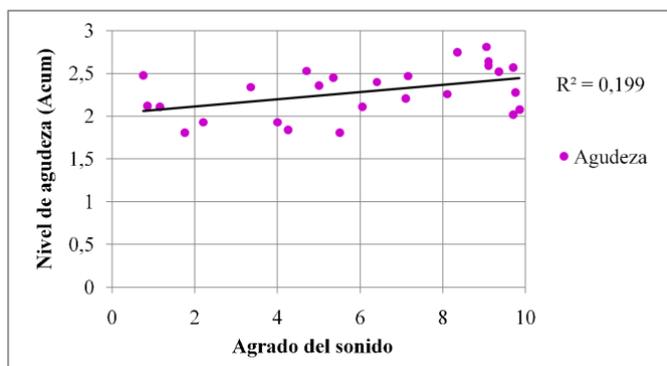
**Figura 10.48.** Fluctuación sonora obtenida de 26 fuentes y saltos de agua correlacionados con el agrado del sonido.

Con este ejemplo del sonido de saltos y fuentes de agua, se pone de manifiesto que la valoración subjetiva del agrado del sonido no se puede valorar con un solo indicador. Por otro lado, hay sonidos que, sin ser muy distintos, ofrecen diferentes puntuaciones o valoraciones. Los detalles que podemos observar de un sonido son difíciles de reflejar en un análisis espectral. Nótese que el análisis clásico se basa esencialmente en el nivel de presión acústica global ponderado A y un análisis de frecuencia, con tiempos de integración notables. En consecuencia, determinados detalles sonoros importantes pueden quedar enmascarados dentro de un espectro y no ser tenidos en cuenta en la valoración cuantitativa del sonido.

#### **10.1.13.7. Agudeza sonora de las fuentes de agua (acum)**

La agudeza de un sonido es un aspecto cualitativo considerado, en general, negativo. Como ya se explicó anteriormente, valora el contenido espectral a altas frecuencias respecto al resto de bandas. Algunos estudios revelan una relación entre las preferencias sonoras en materia de fuentes y saltos de agua y el agrado del sonido generado (Watts, Pheasant, Horoshenkov, & Ragonesi, 2009) (Jeon, Lee, & Kang, 2012) (Galbrun & Ali, 2013).

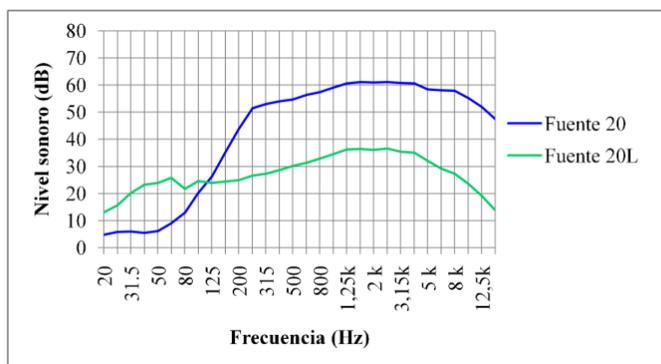
La figura 10.49 muestra los resultados de calcular la agudeza a las 26 fuentes y saltos de agua analizados. Como se puede apreciar, el análisis de regresión muestra una muy pobre correlación entre la agudeza del sonido y su agrado. En general, la agudeza de un sonido suele ser un elemento que va en contra del agrado de este.



**Figura 10.49.** Agudeza sonora obtenida de las 26 fuentes y saltos de agua analizados correlacionados con el agrado del sonido.

#### 10.1.14. Efecto de la distancia

La distancia de separación al foco sonoro produce una disminución del nivel sonoro, con una reducción de 6 dB al doblar la distancia, para fuentes de tamaño pequeño o medio, considerando a la fuente como puntual. Para las grandes fuentes, puede haber una zona inicial a muy corta distancia de la fuente, con una propagación distinta. En la fuente 20 se hizo un registro a unos 30 m del recorrido de agua. Por distancia, supone una atenuación de unos 25 dB respecto de los niveles mostrados anteriormente, medidos a unos 2 m de distancia. La figura 10.50 muestra los espectros sonoros a 2 m y a 30 m de la fuente de agua.



**Figura 10.50.** Espectro en frecuencia del nivel sonoro a 2 m y a 30 m de la fuente 20.

Se puede observar que la atenuación del nivel sonoro por la distancia se mantiene para todas las bandas, salvo para las bandas superiores a 6,3 kHz, que, por efecto de ocul-

tación del foco sonoro, es un poco superior. También se observa la influencia del ruido de tráfico en la medición a 30 m (fuente 20L), con un aumento de la baja frecuencia, al acercarse el punto de medida al ruido de tráfico cercano. En función del ruido ambiente en la zona, el espectro original de la fuente puede ser más o menos modificado. Por este motivo, es fundamental saber cómo es el espectro sonoro del ruido ambiente en los lugares donde van a situarse las personas cuando se desea construir una fuente o salto de agua para mejorar el paisaje sonoro.

En general, la sonoridad percibida es un factor importante, ya que una sonoridad alta se asocia con una baja preferencia por los sonidos generados por el agua (Radsten-Ekman, Axelsson, & Nilsson, 2013) y, en general, con una alta molestia del ruido ambiental. Se ha descubierto que los sonidos generados por el agua con una alta variabilidad temporal son más agradables que los sonidos con un carácter estable. Los resultados mostrados en los ejemplos anteriores corroboran este hecho. El papel de la envolvente espectral es menos claro. Por ejemplo, se han constatado relaciones tanto negativas (Galbrun & Ali, 2013) como positivas (Watts, Pheasant, Horoshenkov, & Ragonesi, 2009) (Jeon, Lee, & Kang, 2012) entre las preferencias de los sonidos generados por el agua y la agudeza o nitidez del sonido, que está relacionada con la energía de alta frecuencia.

Los resultados presentados concuerdan con los de estudios anteriores, que encontraron que las características de las fuentes y los saltos de agua con grandes cantidades de agua tienden a generar sonidos desagradables, por ejemplo, sonidos de cascadas naturales (Radsten-Ekman, Axelsson, & Nilsson, 2013), grandes fuentes en cascada (Galbrun & Ali, 2013) y grandes fuentes de chorro (Axelsson O., Nilsson, Hellström, & Lundén, 2014). Los sonidos de tales estructuras se caracterizan por altos niveles de presión sonora, contenido de frecuencia de banda ancha y niveles sonoros estables. Por el contrario, los sonidos agradables del agua suelen tener niveles bajos de presión sonora y niveles sonoros variables (Watts, Pheasant, Horoshenkov, & Ragonesi, 2009). Los ejemplos incluyen sonidos de arroyos naturales, olas del mar y fuentes con pocos y pequeños surtidores. Por último, se encontró una correlación negativa entre nitidez y tranquilidad (Jeon, Lee, & Kang, 2012) utilizando registros de fuentes en espacios públicos abiertos, mezclados con el ruido del tráfico rodado, en línea con los resultados expuestos anteriormente (Galbrun & Ali, 2013). Sin embargo, también se ha encontrado una correlación positiva entre la agudeza del sonido y las calificaciones de preferencia de los mismos sonidos (Jeon, Lee, & Kang, 2012). Es evidente que es necesario aclarar el papel de los factores espectrales para las calificaciones de preferencia de los sonidos generados por las fuentes y los saltos de agua.

#### **10.1.15. Valoración subjetiva del paisaje sonoro**

Se ha prestado especial atención a los entornos urbanos en la investigación de paisajes sonoros hasta ahora. Las relaciones entre la calidad percibida del paisaje sonoro y

las propiedades acústicas, físicas y visuales de los entornos han sido los aspectos más importantes utilizados para evaluar un paisaje sonoro. Además, la evaluación perceptiva de la preferencia sonora se evalúa mediante el uso de encuestas socio acústicas, pruebas de escucha en laboratorio, mediciones fisiológicas y paseos sonoros.

Escuchar es una de las funciones complejas a través de las cuales las personas perciben el mundo que les rodea, y la evaluación de los efectos de sonido en los humanos depende principalmente de aspectos subjetivos. Hay dos formas de escuchar los sonidos, relacionadas con diferentes formas de procesamiento. Por un lado, la escucha holística, que procesa el paisaje sonoro en su conjunto sin procesamiento semántico y donde solo el sonido ambiente se considera factor principal. Por otro lado, la escucha descriptiva, que tiene como objetivo identificar fuentes de sonido.

En este sentido, la psicoacústica ha contribuido a superar las dificultades de estudiar la percepción subjetiva de los paisajes sonoros y a comprender las limitaciones de los parámetros acústicos clásicos, como el nivel de presión acústica equivalente ponderado A (Lercher & Schulte-Fortkamp, 2003). Además, el estudio de la calidad del paisaje sonoro con la ayuda del procesamiento semántico se ha vuelto muy importante para evaluar la percepción subjetiva. La técnica del diferencial semántico ha demostrado ser un método útil para identificar los factores más importantes en la evaluación de la calidad del sonido mediante el estudio del significado emocional de las palabras (Kang & Zhang, 2010).

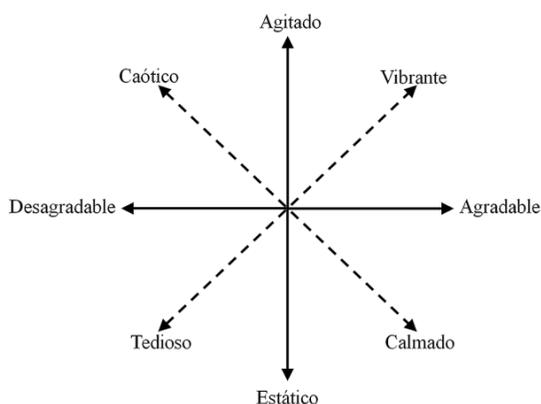
Un paisaje sonoro es complejo y contiene fuentes de sonido tanto deseadas (consideradas positivas) como no deseadas (consideradas negativas). Los estudios de campo en parques urbanos y espacios verdes abiertos sugieren que las propiedades informativas de los entornos acústicos son mejores indicadores de la calidad acústica percibida que las propias mediciones del nivel de presión sonora equivalente (Nisson, Botteldooren, & De Coensel, 2007).

Para cubrir una diversidad de sonidos ambientales, un estudio recopiló 50 grabaciones realizadas en 10 ubicaciones diferentes y se creó un conjunto de 116 escalas de atributos unidireccionales (agradable, excitante, molesto, etc.) con las que medir los paisajes sonoros. Las puntuaciones de los adjetivos se sometieron a un análisis de elementos que identificó tres componentes principales del sonido: agrado, agitado y familiar. *Agrado* y *agitado* fueron las dimensiones más relevantes para las evaluaciones perceptivas, explicando el 50 % y el 19 % de la varianza, respectivamente.

La dimensión *familiaridad* explicó solo el 6 %, lo que indica que la familiaridad de un sonido puede no ser relevante para mapear paisajes sonoros urbanos, probablemente porque los paisajes sonoros seleccionados contenían pocos sonidos desconocidos (Axelsson, Nisson, & Berglund, 2010). La figura 10.51 muestra las dimensiones ortogo-

nales principales, agradable-desagradable y agitado-estático, en los ejes cartesianos y el resto de atributos con vectores a 45°. (Axelsson, Nisson, & Berglund, 2010):

- Eje principal horizontal: concepto agradable (acogedor)-desagradable (molesto).
- Eje principal vertical: concepto agitado (dinámico)-estático (no hay agitación).
- Eje secundario a 45°: concepto vibrante (agrada y hay agitación)-tedioso (desagradable y no hay agitación, estático).
- Eje secundario a 135°: concepto caótico (desagrada y hay agitación)-calmado, tranquilo (agrada y no hay agitación, estático).



**Figura 10.51.** Vectores para cualificar verbalmente los atributos de un paisaje sonoro.

#### 10.1.16. Enmascaramiento de sonidos

El fenómeno de enmascaramiento sucede con mucha frecuencia cuando concurren múltiples fuentes sonoras a distintas distancias y con distintas energías y frecuencias a nuestro sentido auditivo, como es el caso del paisaje sonoro. Este fenómeno ocurre cuando la audibilidad de un sonido deseado (enmascarado) se «tapa» por otro sonido (enmascarador). La audibilidad del sonido objetivo está determinada por procesos tanto periféricos como centrales del sentido auditivo. El enmascaramiento completo, es decir, cuando el enmascarador hace que el sonido deseado sea inaudible, es menos común en situaciones de la vida real. En cambio, el enmascaramiento parcial es más frecuente. En estos casos, tanto el sonido no deseado como el sonido deseado se escuchan simultáneamente, siendo el sonido deseado menos fuerte que si se escucha en ausencia del sonido enmascarador. Existen dos tipos de enmascaramiento: el energético y el informacional.

### ***10.1.16.1. Enmascaramiento energético***

El enmascaramiento energético es un enmascaramiento que ocurre gracias a procesos en el sistema auditivo periférico entre el oído externo y los núcleos cocleares que involucran la membrana basilar y el nervio auditivo (Durlach, Mason, Kidd, Arbogast, Colbum, & Shinn-Cunningham, 2003). Este enmascaramiento puede ser temporal o en frecuencia. El enmascaramiento temporal es el más evidente. Una señal de mayor amplitud puede «tapar» a otra de menor amplitud cuando se produce simultáneamente. La clave, pues, es la simultaneidad de sonidos. Para fuentes sonoras cambiantes, esto es un problema, porque es difícil conseguir este solapamiento temporal.

#### ***10.1.16.1.1. Enmascaramiento energético en frecuencia***

El enmascaramiento en frecuencia es la disminución de la sonoridad de un sonido a una determinada frecuencia en presencia de otro sonido simultáneo a una frecuencia distinta. Es decir, cuando el oído es expuesto a dos o más sonidos simultáneos de diversas frecuencias, existe la posibilidad de que uno de ellos camufle a los demás y, por tanto, que estos no se oigan. Se pueden dar dos casos:

- Sonidos de baja frecuencia enmascaran a los de alta frecuencia.
- Sonido de alta frecuencia enmascaran a los de baja frecuencia.

Es importante señalar que el enmascaramiento en frecuencia será más efectivo en el primer caso, ya que los tonos de alta frecuencia difícilmente enmascaran a los de una frecuencia menor, salvo que la diferencia de nivel sea muy notable, aspecto que en general se produce en pocas ocasiones.

### ***10.1.16.2. Enmascaramiento informativo***

El enmascaramiento informativo es un enmascaramiento debido a mecanismos auditivos en niveles más altos de procesamiento. En contraste con el enmascaramiento energético, el enmascaramiento informativo se define desde el punto de vista del cambio de umbral en la estructura estadística, resultante de la presencia de una señal cercana de similar amplitud (Pollack, 1975). Aunque no hay superposición en el patrón de excitación en la membrana basilar como en el enmascaramiento energético en frecuencia, el enmascaramiento se puede producir (Durlach, Mason, Kidd, Arbogast, Colbum, & Shinn-Cunningham, 2003). El enmascaramiento informativo se relaciona con los mecanismos de atención en los niveles corticales superiores del sistema auditivo, que no logran separar la información deseada y la señal enmascaradora en diferentes corrientes y los agrupan como una sola unidad informativa.

### 10.1.17. Estrategias para enmascarar el ruido de tráfico

El ruido de tráfico es el que actualmente está presente en la mayoría de las calles de las ciudades y está dominado por los vehículos con MCI. Una estrategia propuesta, probada y estudiada por diversos trabajos es utilizar estos sonidos para camuflar el ruido de tráfico. Es sabido que los sonidos generados por las fuentes y los saltos de agua tienen una limitada capacidad enmascarante, como ya se ha descrito. Esta estrategia se basa esencialmente en añadir sonido al ya existente en el medio. Desde el punto de vista acústico, esta técnica puede ser rentable cuando el sonido que se debe tapar tiene un nivel moderado. En el caso del ruido de tráfico, los niveles pueden llegar a ser notables, con el agravante de tener mucha energía en bandas de muy baja de frecuencia, por debajo de los 60 Hz, muy difíciles de camuflar con sonidos de agua.

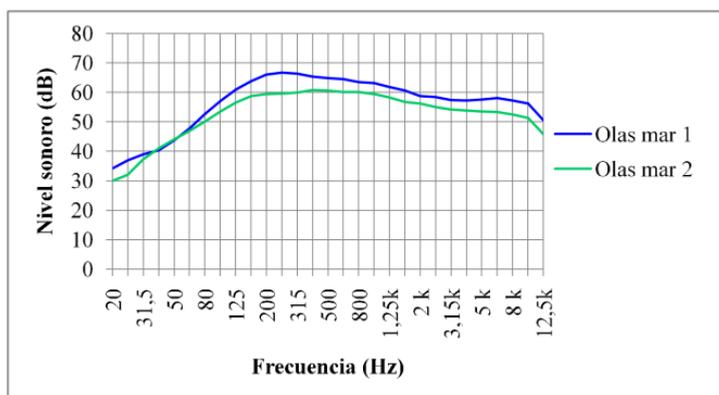
La adición del sonido deseado puede influir en la calidad del entorno acústico de dos maneras. Primero, el sonido agregado puede hacer que el sonido no deseado parezca menos fuerte. En segundo lugar, si el entorno acústico es el resultado de la suma de sonidos procedentes de distintos focos, entonces es factible pensar que un sonido considerado muy agradable aumentaría el placer del entorno acústico (Massaro & Friedman, 1990).

Como los sonidos de la naturaleza se han considerado más agradables que los sonidos creados por el hombre, agregar un sonido de agua muy agradable mejora el agrado del paisaje sonoro (Watts, Pheasant, Horoshenkov, & Ragonesi, 2009).

También se ha encontrado que el sonido rítmico de las olas del mar se considera más agradable que el sonido del fluir del agua, que se calificó como neutral en calidad, mientras que el sonido menos agradable fue el sonido de la cascada. Para el sonido del agua más agradable (el sonido de las olas del mar), el sonido combinado (las olas del mar más el ruido de tráfico) fue más agradable que cualquiera de los sonidos de tráfico, lo que respalda la idea de que agregar un sonido de agua muy agradable mejora el agrado del paisaje sonoro (Radsten-Ekman M. , 2015). La figura 10.52 muestra los espectros sonoros de dos casos de olas de mar rompiendo en la arena.

La estructura rítmica de la cadencia del rompiente de las olas sobre la playa tiene un claro efecto relajante y su variabilidad puede ser el motivo de la preferencia por este sonido. Lo que no reflejan los espectros es la variación rítmica temporal de los niveles sonoros, que resulta muy agradable para las personas.

Se ha comprobado que mejorar el paisaje sonoro con un enmascaramiento energético resulta difícil. Si los espectros del sonido enmascarado y del sonido enmascarador son diferentes, se reduce la efectividad del método (Galbrun & Ali, 2013) (Jeon, Lee, & Kang, 2012) (De Coensel, y otros, 2010). Para poder camuflar el sonido procedente del tráfico rodado, se deben usar fuentes de alto poder enmascarante. Las fuentes capaces de enmascarar los ruidos de tráfico son grandes fuentes con multitud de surtidores y grandes caudales de agua. Estas fuentes grandes pueden generar niveles del orden de los 80 dBA en las cercanías.



**Figura 10.52.** Espectro sonoro de olas de mar rompiendo en una playa de arena.

Un aspecto importante es la localización de estas fuentes. Tradicionalmente, se sitúan alejadas del ruido de tráfico, y se tiende a colocarlas en el centro del parque, aunque esta posición no resulta ventajosa desde el punto de vista acústico. Otra posibilidad es situarlas cerca de la fuente de ruido no deseada; de esta manera, se evita que el ruido de tráfico se perciba en el interior del parque o plaza. Con esta disposición, se puede mejorar la calidad del paisaje sonoro en el centro del parque. Otras soluciones pasan por instalar fuentes con fluctuación en la cantidad de surtidores y de caudal de agua. Estas irregularidades generan sonidos que varían y eso atrae la curiosidad acústica del sentido auditivo, consiguiendo desviar la atención hacia los sonidos de la fuente, dejando en un segundo plano el ruido de tráfico, que quedará siempre «de fondo» (Lutfi, 1993).

Sin embargo, existen ejemplos de fuentes en muchos espacios públicos abiertos. Muchas de ellas son grandes fuentes de chorros y balsa en la base con el carácter sonoro de las cascadas. Diversos estudios han demostrado que los sonidos de tipo cascada se consideran los sonidos de agua más desagradables, y en realidad empeoran el paisaje sonoro cuando se agregan con el objetivo de mitigar el ruido del tráfico (Galbrun & Ali, 2013) (Radsten-Ekman M., 2015). Una forma de solucionar este problema podría ser alterar la morfología del paisaje sonoro agregando otros sonidos usados como captadores de atención. Estos sonidos agregados podrían alterar la amplitud del paisaje sonoro general al modificar algunas frecuencias, dando al sonido un carácter más fluctuante, que es más agradable para el humano.

Se ha comprobado que la fluctuación sonora es un factor importante en la percepción de agrado de los sonidos de las fuentes. Por tanto, es acertado concluir que se deben utilizar sonidos de agua rítmicos o fluctuantes si el objetivo es crear paisajes sonoros agradables dentro de un contexto urbano (Radsten-Ekman M., 2015).

Las características del agua se suman al atractivo visual y la calidad general de los paisajes sonoros. En la sociedad moderna, las casas y los edificios de apartamentos más atractivos son los que están frente al agua. En algunas ciudades, las antiguas áreas portuarias han sido reemplazadas o reconstruidas para crear atractivos frentes de agua (Bilbao, Barcelona). El agua y los paisajes acuáticos tienen atributos visuales y acústicos que promueven la salud y el bienestar, reducen el estrés y promueven la restauración personal.

La presencia de fuentes y saltos de agua crea espacios de bienestar que invitan a poder relajarse del estrés diario. A la estética visual se suman otros efectos que se asocian a una mejor calidad de vida y a un efecto beneficioso para la salud. En este punto, las grandes fuentes producen sonidos que no son agradables, pero que relajan. Esta es la paradoja: las preferencias auditivas no coinciden con las saludables.

En el diseño de paisajes sonoros no solo hay que cuidar la estética audiovisual, sino que es importante que las personas perciban un efecto beneficioso para su salud y estado de ánimo. Hay sonidos, como los saltos de agua, las olas del mar o la lluvia, que se consideran «relajantes». Ciertamente, las personas que escuchan estos sonidos «en directo» experimentan una sensación de relax apreciable. Sin embargo, las que escuchan sonidos grabados, no. Erróneamente, se atribuye a los sonidos del agua estos efectos relajantes cuando, en realidad, el sonido no tiene nada que ver. El único sonido relajante es el silencio. Los sonidos con ambientación oriental, en un ambiente con una luz tenue y unos aromas, pueden invitar a la relajación, pero no relajan.

Los efectos relajantes hay que imputarlos a la ionización del aire. Todos los saltos de agua, cascadas, etc., producen iones negativos en el ambiente. Los efectos de la ionización sobre el humano se estudiaron intensamente a mediados del siglo xx. En esos años, en algunos hospitales del centro de Europa no se hacían intervenciones quirúrgicas, a menos que fuera cuestión de vida o muerte, cuando soplaban el Föhn, porque los postoperatorios presentaban una tasa de complicaciones muy superior a la normal, sin saber la causa concreta. Los investigadores observaron que estos vientos tienen una carga de iones positivos y observaron que eso producía problemas en los postoperatorios. Mediante generadores de iones negativos se compensaron estas cargas y se comprobó que la mejora de los pacientes se aceleraba de forma notable. Por ejemplo, para cicatrizar más rápidamente, se aplica localmente ionización negativa.

Los iones negativos se generan de forma natural en cualquier salto o cascada de agua. Los iones positivos se generan de forma natural por los vientos y la actividad humana, principalmente. Los iones positivos hacen que las personas sean activas, pero con una componente de agresividad manifiesta. Los iones negativos también hacen que las personas sean activas, pero sin la componente de agresividad. Después de una noche de lluvia copiosa, pero no intensa, las personas están más relajadas y la circulación urbana

las primeras horas de la mañana es más tranquila. Aplicando máquinas para la ionización negativa del aire en los ambientes de trabajo, se ha comprobado que se consigue que las personas mejoren el ritmo de trabajo, obteniendo una mayor productividad y un mejor ambiente de trabajo (Barti R. , 1983).

El efecto beneficioso de los saltos y las cascadas de agua no se limita, pues, a lo audiovisual, sino que realmente mejora la salud física y psicológica de las personas que se encuentren cercanas a estos espacios donde pueden recibir iones negativos. La interacción entre la percepción auditiva y visual puede dar a las personas una sensación de participación y generar una sensación de comodidad (Yang & Kang, 2005). Por esa razón, los aspectos visuales y auditivos desempeñan un papel importante en la percepción subjetiva.

Los resultados obtenidos por diversos estudios muestran que, en términos de preferencias, el sonido (y no el componente visual) dominó el patrón de preferencia debido a la naturaleza más variada de los sonidos en comparación con la calidad relativamente homogénea de las escenas visuales mostradas. Los sonidos naturales fueron mucho más preferidos al «sonido de parque» artificial, y los sonidos de los pájaros y el movimiento del agua fueron los predilectos.

En un estudio sobre el efecto del grado visual de urbanización sobre las valoraciones auditivas, se evaluó la interacción entre ocho entornos sonoros urbanos y cinco entornos visuales. Los resultados indicaron que la influencia visual sobre la percepción del sonido variaba con las escenas visuales y el tipo de sonidos en cuestión (Viollon, Lavandier, & Drake, 2002).

Algunos tipos de entornos sonoros se juzgan más negativamente de forma significativa cuando se asocian con escenas visuales más urbanas, como los cantos de pájaros y el ruido del tráfico. En cambio, otros sonidos, como los entornos sonoros que involucran actividades humanas, especialmente el habla, no se vieron afectados por las imágenes urbanas.

La relajación con sonidos originados por humanos puede ser más difícil que con sonidos naturales porque el oyente puede experimentar un mayor grado de implicación hacia el entorno sonoro y la información auditiva. Los sonidos humanos siempre llevan información sea o no deseada y, por tanto, despiertan la «curiosidad acústica» del sentido auditivo, lo que redundará en una mayor dificultad para rebajar el estrés. En estos casos, el sonido se convierte en el principal foco de atención y el entorno visual no tiene tanta importancia. Esto es especialmente significativo para los espacios abiertos tipo plazas o pequeños parques, con cierta aglomeración de gente y donde las distancias de separación no permiten un cierto «aislamiento» del entorno. Las distintas conversaciones que se puedan escuchar a nuestro alrededor van a impedir o dificultar que nuestro sentido audi-

tivo se deje llevar por los sonidos naturales que puedan estar presentes en el ambiente y entremos en una fase de relajación.

Diversos estudios corroboran que el porcentaje de elementos naturales y artificiales en un paisaje determinan el grado de aceptación del entorno. Si predominan los elementos considerados naturales, la calidad del paisaje es superior (Liu, Kang, Behm, & Luo, 2014). Por otro lado, otros trabajos puntualizan que la proximidad a los focos naturales de sonido es importante para una valoración positiva de la calidad paisajística visual. Sin embargo, la calidad sonora no depende tanto de la distancia a la que se encuentra el foco sonoro natural, siempre que sea audible. Esto requiere, *de facto*, unos niveles de ruido de fondo bastante moderados, cosa bastante difícil en entornos urbanos con vías de circulación en las inmediaciones (Ren & Kang, 2015). Algunos trabajos sugieren que, para percibir un elevado grado de tranquilidad en un paisaje sonoro, el nivel producido por los focos sonoros artificiales debe cumplir unos valores de  $L_{A_{\max}} \leq 55$  dBA o  $L_{A_{\text{eq}}} \leq 42$  dBA (Pheasant, Horoshenkov, Watts, & Barrett, 2008).

#### 10.1.18. Semiótica del paisaje sonoro

La semiótica es la ciencia que estudia los diferentes sistemas de signos que permiten la comunicación entre individuos, sus modos de producción, de funcionamiento y de recepción. Woodside señala que cada expresión sonora está ubicada en un contexto socio histórico particular y toma referentes de paisajes sonoros específicos (Woodside, 2008). De esta forma, Michael Southworth, desde el año 1967, acuña el término *soundscape* («paisaje sonoro») para referirse a los sonidos producidos en un espacio determinado, por la presencia de distintas fuentes sonoras y con un sentido otorgado por el entorno social en el que se producen y que, además, indican la evolución de dicho entorno o sociedad.

En los procesos de intercambios sonoros (percepción-producción), el cerebro humano configura y organiza los elementos percibidos, lo cual significa que el conjunto de percepciones llega a agruparse y a organizarse de manera coherente asignando valores de detección, discriminación y estimación, aspectos estudiados principalmente por la psicoacústica (Munar, Rosselló, Mas, Morente, & Quetgles, 2002).

El estudio del campo simbólico requiere de la comprensión de los signos sociales de una comunidad, situación que le atañe a la semiología, en tanto que es una ciencia que se ocupa del estudio de los signos que surgen en la cotidianidad (Sandoval, 2002).

Un paisaje sonoro depende de la relación explícita existente entre el entorno y el humano, dado que este último está rodeado de sonidos. Esta relación permite explicar que el paisaje sonoro no tiene una valoración única o exclusiva, sino que hay diferentes niveles de acuerdo con los matices percibidos, la experiencia, la cultura, etc., de los individuos. Podemos hablar, pues, de una percepción sonora basada en la experiencia,

a lo largo de la vida de un sujeto, desde la infancia hasta la edad adulta. A partir de los denominados *sistemas de comunicación extralingüísticos* y de las formas de definición existentes para los términos *signo*, *símbolo* y *código*, el paisaje sonoro se encuentra relacionado mayormente con este último, el código, debido a que un signo es una representación de un objeto o un fenómeno o una acción material, definición que también podría aplicarse en el caso de una señal.

Pierre Giraud, lingüista francés, definió la semiología como el estudio de los sistemas de signos no lingüísticos, refiriéndose a los sonidos de campanas, sirenas, tambores o toques. Considera que son señales de advertencia convertidos en códigos, cargados con una significación capaz de ser entendida por cualquier individuo.

En términos de sintaxis, la teoría del paisaje sonoro comprendería los siguientes niveles fónicos:

- **Sonido fundamental.** Es el sonido que sirve como referente y alrededor del cual los demás sonidos asumen su cometido. Este sonido no es oído conscientemente la mayor parte del tiempo, ya que existe un hábito auditivo. Son sonidos que se escuchan diariamente y que se considera que forman parte del paisaje sonoro *per se*. En otras palabras, es el sonido de fondo de un paisaje sonoro. Justamente, el confinamiento en 2020 permitió que este sonido fundamental cambiara radicalmente durante unos meses, al reducir al mínimo el volumen de tráfico rodado en las ciudades y poblaciones.
- **Señales sonoras.** Son aquellos sonidos que conscientemente se escuchan, por ser los que resaltan o se destacan, en mayor medida, de un entorno sonoro. Son considerados como figuras por su preponderancia dentro del entorno sonoro y se encuentran en un primer plano de audición. Ejemplo de señales sonoras podría ser el claxon de un vehículo, las señales acústicas de los pasos de peatones para invidentes, las sirenas de los servicios de emergencia, etc.
- **Marca sonora o sonidos importantes.** Existen sonidos que son característicos de un ambiente particular, sea este rural o urbano, y es a estos sonidos a los que se les denomina *marcas sonoras*. En otras palabras, son las que determinan la singularidad sonora de cualquier espacio. Por ejemplo, el sonido de los pasos sobre un suelo arenoso, la reverberación percibida en entornos semicerrados en calles estrechas, etc.
- **Repertorio sonoro.** Son los sonidos característicos de ciertos ambientes o comunidades, semejantes a las marcas sonoras y también denominados *de primer plano (foreground)* (De BlasChías, 2009). Por ejemplo, en espacios con vegetación y árboles, el sonido de los pájaros; en el interior de un centro comercial, el sonido de la música ambiente, etc.

En los paisajes sonoros hay nuevas incorporaciones que siguen las tendencias impuestas por los avances tecnológicos y la evolución de las costumbres y los hábitos sociales. Escuchar la fanfarria o la música procedente de un dispositivo móvil no sorprende a nadie hoy en día. Tampoco escuchar a gente «hablando sola». Aparecen, pues, sonotipos que se van incorporando gradualmente al paisaje sonoro sea o no urbano. Lo mismo ocurrirá con los vehículos propulsados eléctricamente: sus sonidos naturales (no añadidos artificiales) se podrán escuchar cuando el resto de los vehículos que circulen sean en su gran mayoría eléctricos. Cuando esto suceda, podremos afirmar que estamos en entornos sonoros saludables, es decir, con niveles sonoros inferiores a los 45 dBA.

#### **10.1.19. Futuro del paisaje sonoro urbano**

El patinete eléctrico, vehículo de transporte personal, ofrece la ventaja de ser más rápido, económico y eficiente que cualquier otro medio de transporte. Es previsible que su uso se generalice entre toda la población en detrimento de otros medios de transporte. El ambiente sonoro que actualmente hay en las ciudades irá cambiando con la electrificación del transporte. La irrupción del hidrógeno como fuente de energía limpia va a permitir autonomías muy superiores, sin necesidad de cargar baterías. Los vehículos serán mucho más ligeros y eficientes, sus velocidades estarán limitadas, el control del vehículo estará también supervisado y el ambiente sonoro en las ciudades será mucho más silencioso. Surgirán nuevos sonidos, a los que tendremos que acostumbrarnos.

El objetivo del análisis del paisaje sonoro debería estar armonizado con el enfoque clásico del control del ruido. Este enfoque se centra en un tipo de fuente sonora, y todas las herramientas y la experiencia que se utilizan para controlar el ruido están especializadas en un tipo particular de sonido. Esto permite optimizar recursos y aplicar las soluciones adecuadas. Esta técnica, aplicada al paisaje sonoro, implicaría descomponer el paisaje sonoro en sus componentes indeseables y deseables para que cada uno de ellos pueda abordarse con las herramientas y la experiencia adecuadas con vistas a obtener el máximo rendimiento y beneficio.

Tan pronto como grabamos cualquier sonido, este se convierte inevitablemente en un objeto descontextualizado y, cuando lo reproducimos, no pertenece al lugar que rodea al oyente. Sin embargo, son las propias obras o información complementaria de estas grabaciones las que llevan a relacionarlo con las particularidades acústicas y sonoras del período y el lugar representado (Chion M. , 1993).

#### **10.1.20. Electrificación del transporte urbano como catalizador de cambio del paisaje sonoro**

La circulación urbana tiene restringida la velocidad máxima de los vehículos. Por lo general, se establecen los límites de 30 y 50 km/h para las vías urbanas y 80 km/h para las

vías de circunvalación. La situación más frecuente en entornos urbanos es el arranque de los vehículos cuando están parados en un semáforo o un cruce. En este proceso, el ruido del grupo motriz destaca notablemente durante el proceso de inicio de marcha, radiando energía de baja frecuencia que no puede ser absorbida por los elementos constructivos cercanos. Esta energía de baja frecuencia puede entrar con facilidad en las viviendas, generando niveles sonoros que pueden llegar a ser molestos. En las vías más rápidas (80 km/h), o cuando la circulación es fluida a 50 km/h, se tiende a utilizar marchas largas. Esto reduce el régimen de giro del motor, que a su vez reduce el nivel de ruido radiado y, en consecuencia, domina el ruido de neumático. Las componentes de baja frecuencia radiadas por el grupo motor están relacionadas con el tipo de motor y su régimen de giro.

En este sentido, a determinadas velocidades y condiciones de circulación, el ruido de un vehículo eléctrico puede ser muy similar a un vehículo con motor de combustión interna (MCI). Donde se observa mayor diferencia es en el arranque del vehículo. El ruido emitido por un vehículo eléctrico solo es perceptible en entornos relativamente silenciosos, es decir, suficientemente alejado de la presencia de vehículos con MCI. La reducción sonora prevista con el 100% de vehículos eléctricos se estima que sea alrededor de los 3 dBA, aunque la sensación sonora percibida por las personas será notablemente superior gracias a la desaparición de la energía de baja frecuencia.

Sin embargo, la actividad humana puede llegar a enmascarar estos sonidos, creándose situaciones de peligro con las personas invidentes. Por este motivo, y cediendo a las presiones de la National Highway Traffic Safety Administration, la Unión Europea ha adoptado la decisión de que los vehículos eléctricos emitan un sonido que permita detectarlos acústicamente cuando circulan a velocidades inferiores a los 20 km/h, aunque no haya nadie a su alrededor.

#### ***10.1.20.1. Detección sonora de la presencia de un vehículo***

La circulación de vehículos silenciosos en entornos urbanos crea problemas entre las personas que se encuentran en las proximidades y que se guían por el sonido para saber si hay un vehículo cerca. El aumento de colisiones entre peatones y bicicletas o patinetes se produce porque los primeros no se percatan de la presencia de los segundos. Este problema se agrava para las personas sin visión. Para tratar de dar una solución a este problema, se han llevado a cabo muchos estudios tratando de comparar la facilidad de detección sonora entre vehículos con MCI y con motor eléctrico (ME). En estas pruebas intervienen personas con discapacidad visual que tratan de detectar el sonido de un vehículo que se aproxima a su posición. El parámetro que se mide es el tiempo que se tarda en detectar el vehículo antes de que pase por delante del observador, que determina a qué distancia se detecta el vehículo. Este parámetro se evalúa con vehículos de ambas motorizaciones circulando a una velocidad constante en un entorno urbano. Obvia-

te, la distancia a la que un vehículo es detectable acústicamente depende sobre todo del nivel de ruido ambiental presente en los ensayos, ya que los niveles radiados por los vehículos no dependen del nivel de ruido ambiental.

### **10.1.20.2. Origen del sistema AVAS**

En 2003, Deborah Kent Stein, escritora y activista de la Federación Nacional de Ciegos (National Federation of the Blind, NFB), conoce a través de un amigo el Toyota Prius, un vehículo híbrido que, según le dice este: «Es completamente silencioso cuando funciona con su batería, no es broma, no puedes oír nada». Stein describió más tarde este fatídico encuentro con el automóvil eléctrico en un ensayo que publicó en el sitio web de la NFB:

Me paré en la acera y escuché mientras nuestro amigo se subía al asiento del conductor y cerraba la puerta. Esperé a escuchar el sonido del motor del Prius cobrando vida y avanzando. Después de un par de minutos escuchando el canto de los gorriones, el rugido lejano de un soplador de hojas, escuché la apertura de la puerta del coche. Entonces, pregunto: «¿Cuándo vas a arrancar?». «Ya arranqué», respondió el amigo. «Conduje hasta el final de la calle, luego retrocedí y volví a pasar frente a ti». En ese momento, sentí una fría sensación de temor. «Tenemos un verdadero problema», pensé.

La NFB popularizó la necesidad de que los coches hicieran ruido de coches (Frye, 2007). Unos años más tarde, Lawrence D. Rosenblum, profesor de Psicología en la Universidad de California, Riverside, leyó algo sobre el peligro de los vehículos silenciosos. Había llevado a cabo una investigación que mostraba que el cerebro presta especial atención a los sonidos que se mueven hacia el oyente, calculando automáticamente lo que Rosenblum llamó «tiempo hasta la llegada» (Rosenblum, 2011).

La NFB (equivalente a la ONCE) gestó la idea del concepto de «mínimo ruido» que deberían hacer los vehículos eléctricos para ser detectables acústicamente. Esta entidad, que tiene mucho poder, exigió a los fabricantes de vehículos que tuvieran en cuenta los accidentes producidos y adoptaran una solución que los evitase. Pocos años después, en enero de 2011, se aprobó el Pedestrian Safety Enhancement Act, que establecía los medios para alertar a los peatones sin visión y otros peatones de la presencia del vehículo eléctrico. La solución propuesta fue que los vehículos eléctricos emitieran un sonido que permitiera identificarlos acústicamente. Toyota fue pionera en implantar un sistema de alerta llamado Approaching Vehicle Alerting Systems (AVAS) en 2009 en su modelo Prius. Por último, para los vehículos «silenciosos» se adoptó la necesidad de disponer de un sistema de alerta llamado Audible Vehicle Alerting Systems (AVAS). El sistema AVAS genera un ruido artificial en la parte delantera del vehículo, y la trasera en marcha atrás, para alertar de su presencia a las personas cercanas. Unos años más tarde, la Unión Europea adoptó esta solución.

Con la reducción de la velocidad de circulación urbana a un máximo de 30 km/h, los sistemas AVAS estarán en funcionamiento durante largos períodos de tiempo, especialmente en el cruce de calles. El resultado va a ser una cacofonía de sonidos tonales que, sin duda, va a generar todo tipo de comentarios nada favorables entre la población. La sensación de desagrado generalizado que producen los sonidos artificiales del AVAS se agudizará con la reducción de vehículos con MCI que estén en circulación. Con niveles sonoros ambientales más moderados, se hace evidente que el sistema AVAS debería incorporar un sistema automático que active el sonido, en los momentos que sea necesario, en lugar de estar activo siempre cuando el vehículo se desplaza hasta velocidades de 20 km/h.

En este sentido, la tecnología actual permite activar el sonido de un paso de peatones cercano cuando se detecta en las cercanías a personas invidentes, y eso les permita guiarse y saber el estado del paso (luz verde o luz roja) mediante sonidos *ad hoc*. Una vez se aleja la persona, el semáforo deja de sonar. Esto probablemente disminuiría la sensación de molestia o desagrado que estos sonidos van a producir entre la población y no se contaminaría de forma innecesaria el entorno (Barti R. , 2016). La mejor solución para lograr una mayor seguridad debería basarse en un sistema como el indicado en lugar de un sistema de sonido de advertencia indiscriminado como el sistema AVAS que genera habituación y por ende falta de atención. De esta manera, se garantizará la seguridad de las personas invidentes, así como también de las personas mayores, ante la presencia de los vehículos con ME, sin necesidad de añadir más ruido, mediante un sistema de alerta individual *ad hoc*. Los resultados de diferentes estudios muestran que en la transición a la movilidad eléctrica quizá no sea necesario regular por ley las advertencias sonoras para los vehículos eléctricos a velocidades bajas.

La bicicleta, el patinete eléctrico, el monociclo y otros medios de locomoción urbanos pueden alcanzar velocidades superiores a los 20 km/h. El aumento notable de estos vehículos en la circulación urbana, unido al poco o nulo respeto por las normas de circulación de sus usuarios, está causando un número creciente de accidentes e incidencias con los peatones. No es un problema menor, puesto que algunos accidentes han tenido como resultado la muerte del peatón. Todos estos vehículos pasan muy cerca de los peatones, incluso por el mismo camino, y, sin embargo, no se les exige llevar ningún sistema AVAS que alerte de su presencia, lo cual pone en grave peligro a los transeúntes. Tampoco están matriculados, ni precisan de carné para conducirlos, ni pagan impuestos, ni tienen seguro obligatorio, ni control de Inspección Técnica de Vehículos, ni llevan elementos de seguridad, etc. lo que redundará en una mayor impunidad por parte de los usuarios.

#### **10.1.21. Acciones para mejorar el paisaje sonoro**

Haciendo una recopilación de lo expuesto en los apartados anteriores, se resumen los pasos que se deben seguir para mejorar el paisaje sonoro en tres fases. Las acciones

propuestas pueden servir como una hoja de ruta para establecer un procedimiento. Las necesidades de cada espacio pueden modular estas acciones. Es recomendable ser realista en las estimaciones. No se puede obtener un paisaje sonoro de calidad extrema en un entorno muy degradado acústicamente. Se empieza por actuar sobre los focos sonoros más importantes en cuanto a dominancia acústica sobre el paisaje sonoro.

#### **10.1.21.1. Fase 1. Estado actual del paisaje sonoro**

Lo primero que hay que saber es el punto de partida. Para esto, es necesario seguir los siguientes pasos.

##### *10.1.21.1.1. Caracterización acústica del espacio actual*

Se lleva a cabo una toma de muestras de sonido calibrada en nivel para evaluar su calidad sonora. Lo recomendable es usar un equipo binaural, sea con un *headset* o un maniquí binaural, que permite grabar el sonido y tomar muestras de este para su posterior análisis de forma simultánea y en el mismo punto. Como alternativa, se puede usar un equipo de medida (sonómetro) para obtener las métricas del sonido y, simultáneamente y en un punto cercano, grabar el sonido en soporte digital y formato estéreo o multicanal (Ambisonics). En estos registros, las diferencias de las señales de audio estéreo respecto a las binaurales son mínimas y, en todo caso, los matices pueden ser imperceptibles para la gran mayoría de oyentes, ya que no se trata de localizar fuentes sonoras, sino de valorar el ambiente sonoro en un lugar, partiendo de registros sonoros lo más realistas posible.

Es recomendable grabar el tono del calibrador del sonómetro (94 dB) al inicio de cada registro de audio y mantener el mismo nivel de grabación (por ejemplo, -20 dBFS) para que las grabaciones de sonido sean todas comparables en nivel y poder hacer las pruebas de calidad subjetiva correctamente. El nivel de grabación en soporte digital debe ajustarse en función del nivel sonoro del entorno. Las grabaciones deben hacerse en un horario que sea representativo de los eventos sonoros que acontecen habitualmente.

##### *10.1.21.1.2. Análisis de los registros de audio*

Por un lado, se obtienen las métricas para el fragmento sonoro, que definen las características acústicas del sonido. Siguiendo el estándar ISO 12913, partes 1 y 2, se mide el nivel de presión sonora, el espectro en frecuencia y los criterios psicoacústicos. Es aconsejable evitar registros excesivamente largos. La variabilidad temporal de los sonidos presentes marcará el tiempo razonable. Los espacios urbanos, rodeados de calles con circulación, suelen presentar patrones cíclicos de nivel sonoro por la regulación de los semáforos. Promediar diversos ciclos no es beneficioso, obteniendo resultados alejados

de la realidad. En caso de existir un ciclo de nivel sonoro, es aconsejable estudiar por separado el sonido que presenta mayor nivel y el que presenta un menor nivel.

#### *10.1.21.1.3. Descripción detallada de todas las fuentes sonoras detectadas*

Desde el punto de observación deben identificarse por un lado los eventos sonoros dominantes y por otro lado, deben identificarse todas aquellas fuentes sonoras que se consideren presentes en el ruido de fondo, quitando los eventos sonoros dominantes. Preparar una relación de las fuentes sonoras que se pueden escuchar o ver desde el punto de observación. Identificar los eventos sonoros dominantes. Identificar las fuentes sonoras que están presentes en el sonido de fondo, quitando los eventos sonoros dominantes.

#### *10.1.21.1.4. Visual 360 del punto de observación*

En primer lugar debe realizarse una descripción detallada, de las imágenes que se pueden ver desde el punto de observación. Para ello deben considerarse todos los elementos, tanto los que pueden afectar al sonido (reflexiones, absorción), como los elementos estéticos visuales. En segundo lugar hay que diferenciar entre los elementos naturales y los artificiales. Este último aspecto también afecta a las fuentes sonoras consideradas. Valorar las distancias a todos los objetos observados y a las fuentes sonoras consideradas.

Hacer una descripción detallada con imágenes desde el punto de observación de lo que se puede ver. Considerar todos los elementos, tanto los que pueden afectar al sonido (reflexiones, absorción) como los elementos estéticos visuales. Separar los elementos naturales de los artificiales. Valorar distancias a todos los objetos, también a las fuentes sonoras.

#### *10.1.21.2. Fase 2. Reducción de los sonidos no deseados*

El primer paso es hacer una lista con las fuentes sonoras no deseadas en el lugar, estableciendo un orden de prioridades y empezando por las que contribuyen más al nivel sonoro, que suelen ser las que más destacan auditivamente.

En segundo lugar, se identifican las superficies, sobre todo edificios, que pueden reforzar el nivel sonoro con sus reflexiones acústicas. Esto permitirá descartar aquellas superficies que no aportan reflexiones sobre la zona de estudio. Para cada superficie considerada, debe valorarse la distancia hasta el punto de observación, así como las características acústicas de absorción-reflexión (dispersión) del material de la superficie.

En tercer lugar, se establece qué fuentes se van a desplazar o quitar y cuáles se van a modificar, para disminuir el nivel sonoro producido. No solo debe valorarse el nivel

sonoro radiado ( $L_{eq}$ ), sino la percepción sonora de cada fuente (calidad acústica). El campo de acciones puede ser muy diverso. Respecto al ruido de tráfico, la reducción de la velocidad de los vehículos y el uso combinado con asfalto sonorredutor disminuyen apreciablemente los niveles sonoros del tráfico rodado. Las paradas de bus con motores de combustión interna, sean híbridos o no, e independientemente del combustible fósil utilizado, son focos sonoros importantes de baja frecuencia.

En cuarto lugar, respecto a los focos sonoros fijos, las acciones individuales sobre cada foco suelen dar los mejores resultados. Para las fuentes móviles, debe actuarse sobre las estructuras presentes. El ruido procedente de los neumáticos se produce a ras de suelo, por lo que pequeñas estructuras verticales interpuestas entre el paso de los vehículos y el punto de observación pueden actuar fácilmente de barrera acústica y reducir de manera significativa el nivel sonoro percibido.

Nótese que las bandas con más energía del ruido de neumático se sitúan alrededor de 1,2 kHz, por lo que no son necesarias estructuras importantes para atenuar este sonido. Resulta ventajoso hacer movimiento de tierras, levantando pequeños taludes que actúan de barrera acústica y que, además, pueden albergar vegetación y fauna. La parte alta del talud debe estar lo más cerca posible de la calzada. El uso de superficies irregulares para la superficie de la barrera mejora el rendimiento del apantallamiento acústico. Se añade una mejora notable si estas superficies son absorbentes a las bandas de interés.

### **10.1.21.3. Fase 3. Introducción de los sonidos deseados**

En las fases anteriores se «sacan» o minimizan sonidos no deseados, y los resultados serán siempre positivos, al margen del grado de reducción del nivel sonoro. Con menos focos sonoros no deseados, el paisaje sonoro mejora momentáneamente. Sin embargo, en esta fase se añaden fuentes sonoras y, por tanto, se corre el riesgo de empeorar el paisaje sonoro. El uso de fuentes sonoras consideradas «naturales» mejora el paisaje sonoro, pero las actuaciones deben ser muy cuidadosas.

En general, lo que funciona a pequeña escala no lo hace a gran escala. Es el caso de las fuentes o los saltos de agua. Al margen de usar el agua como foco sonoro deseado, también se suelen propiciar la fauna y los suelos sonoros al paso de la gente con grava, grava o similares. Una táctica que funciona muy bien, ya comentada anteriormente, consiste en añadir sonidos que capten la atención de los usuarios. Estos sonidos deben tener una variabilidad temporal adecuada que genere curiosidad acústica, sin excederse. Un ejemplo clásico es la fauna. No obstante, mantener la fauna en un entorno requiere de unas condiciones propicias del hábitat que deben tenerse en cuenta.

La táctica más usada, y no siempre recomendable, es el enmascaramiento de los sonidos no deseados por otros sonidos. El ejemplo más habitual son las grandes fuentes

de agua, que, si bien camuflan focos sonoros no deseados (como el ruido de tráfico), se consideran molestas por su sonido. La parte positiva de este tipo de fuentes es la elevada generación de iones negativos, que ayudan a reducir el estrés de las personas en las inmediaciones.

### **10.1.22. Tipologías de paisajes sonoros**

El paisaje sonoro va a ser utilizado por distintas personas con sensibilidades, cultura, educación y gustos distintos. Es lógico, pues, que las valoraciones de un mismo paisaje sonoro no contenten completamente a toda la población. El diseño del paisaje sonoro debería considerar esta variedad de personas, grupos y culturas para que encontraran su propio y apropiado nivel de complejidad en su vida cotidiana. Hay cuatro tipologías de paisajes sonoros que pueden ayudar a desarrollar dicho diseño (Ipsen D., 2002).

#### ***10.1.22.1. Paisaje sonoro dual***

El más tradicional es el paisaje sonoro dual. El concepto surge de la estructura general de las ciudades europeas históricas. El concurrido mercado y la concurrida calle principal forman una imagen de la ciudad. La tranquila iglesia o el monasterio, la plaza de un barrio, un parque o un jardín forman otra imagen de la ciudad. El paisaje sonoro dual se correlaciona con una organización dual del espacio y el tiempo en general. Entonces, percibimos el espacio como urbano o rural, el tiempo como día o noche, la vida como pública o privada, la estructura social como rica o pobre, la situación demográfica como joven o vieja.

Todos estos patrones duales están asociados con culturas y paisajes sonoros específicos, en su mayoría tradicionales. El paisaje sonoro de un pueblo se ha asociado con canciones tradicionales, el repique de la campana de la iglesia y el ritmo del trabajo en una tienda de artesanías. La ciudad está asociada con el ruido del tráfico, el ruido de la gente caminando, las sirenas de los vehículos de emergencia o el ruido de la recogida de residuos. Esta nube de sonidos no se encuentra en la misma proporción y nivel sonoro en poblaciones más pequeñas. En un patrón de paisaje sonoro dual, uno puede cambiar fácilmente de un nivel de complejidad a otro.

Las zonas tranquilas de la ciudad suelen estar colonizadas por el turismo; el espacio privado es penetrado con el sonido procedente de reproductores audiovisuales, voces y teléfonos. Por otro lado, la esfera de lo público se vuelve más privada con los teléfonos móviles y la organización social altamente fragmentada. Y esto también es cierto para la mayoría de los otros pares duales, en especial para la diferencia entre lo urbano y lo rural. A veces solo se necesitan pequeñas intervenciones para transformar una plaza en un lugar de contemplación o para organizar un diálogo entre un jardín de bolsillo y una calle muy frecuentada.

El sonido del agua corriente constante hace que esta plaza sea tranquila aunque miles de visitantes esperan allí. Se puede intentar desarrollar partes de la ciudad para diferentes culturas y ayudar de esta manera a diferenciar el paisaje sonoro y reducir el nivel de complejidad. Diferenciar el sonido con patrones de tiempo y espacio dotará a las ciudades de un paisaje sonoro más plural.

#### ***10.1.22.2. Paisaje sonoro conversacional***

Se puede definir como un paisaje sonoro que se basa en diálogos. Para percibir un paisaje sonoro como conversacional, el entorno acústico debe entenderse como un proceso. A veces, este diálogo comienza auto organizado. Un ejemplo característico son las cotorras que se pueden encontrar en algunos jardines y parques de Barcelona. Estas aves se comunican entre ellas cacareando, de manera que, tan pronto como una comience a cacarear, el resto responderá y, después de unos minutos, el proceso se habrá extendido entre diversos ejemplares en una zona, y así se creará un paisaje sonoro conversacional. Hay otros ejemplos muy habituales en las calles de algunas ciudades del sureste asiático, donde los conductores hacen sonar el claxon para pedir paso a pesar del colapso circulatorio.

#### ***10.1.22.3. Paisaje sonoro sintético***

El tercer patrón de paisaje sonoro es el sintético, que combina diferentes imágenes y sonidos que normalmente no van de la mano. Con su unión se crea un nuevo paisaje sonoro. Por ejemplo, en el campo de la música, la mezcla de música andaluza y magrebí es un caso de éxito. Sin embargo, la mezcla de los sonidos del ferrocarril y el canto de un ruiseñor presenta un resultado muy distinto. A medida que el mundo se vuelve intercultural, la posibilidad de crear paisajes sonoros sintéticos aumenta. En consecuencia, los paisajes sonoros sintéticos serán más experimentales y pueden encajar mejor en un medio subcultural.

Los tres tipos diferentes de patrones de paisajes sonoros se correlacionan con diferentes niveles de complejidad. El patrón dual es el menos complejo; los patrones sintéticos poseen la mayor complejidad. La situación perceptiva actualmente está muy diferenciada. Diferentes individuos y subculturas necesitan distintos niveles de complejidad. Si el área urbana está diseñada de manera que la gente pueda encontrar los diferentes patrones de paisajes sonoros en distintas partes de la ciudad, entonces obtendrá una situación en la que la gente puede elegir su lugar de sonoridad óptimo. De esta manera, un diseño de paisaje sonoro pluralista puede ser apropiado para una sociedad que se diferencia cada vez más.

### **10.1.23. Clasificación de los elementos de un paisaje sonoro**

El paisaje sonoro está formado por diversos componentes diferenciados, la radiografía acústica del espacio y las fuentes intrínsecas.

#### ***10.1.23.1. Radiografía acústica del espacio***

Se trata de un conjunto de elementos que configuran un lugar de manera fija en el marco temporal de nuestra representación, aportando a los sonidos las cualidades acústicas necesarias para configurar de manera adecuada nuestra representación sonora. La radiografía acústica del espacio permite describir todos los elementos acústicos que intervienen en la propagación, la refracción, la reflexión, la difusión y la absorción del sonido en un lugar. Se trata, en general, de elementos pasivos que pueden modular la calidad sonora del espacio.

La radiografía acústica del espacio no está formada de fuentes de sonido, sino que es el análisis del entorno físico que rodea esas mismas fuentes, a las cuales otorga determinadas cualidades acústicas. Esta radiografía debe ser muy precisa, sin obviar detalles por pequeños que sean, y requiere tener una visión acústica sobre materiales, estructuras y demás elementos que configuran el espacio. Esta información permitirá en las fases posteriores de recreación o diseño del paisaje sonoro un mayor control sobre los resultados obtenidos. Para realizar esta radiografía, hay que seguir un procedimiento adecuado para obtener resultados fiables y correctos, que se describe seguidamente.

##### *10.1.23.1.1. Delimitar el espacio donde se pretende actuar*

El sonido en campo libre y sin obstáculos se propaga en todas direcciones y sin límite. Solo la distancia recorrida va atenuando el nivel sonoro y las condiciones climáticas pueden matizar su distribución espectral en frecuencia. El paisaje sonoro que deseamos mejorar o modificar no está aislado acústicamente del entorno más cercano. En general, se trata de plazas, parques, calles o avenidas que están conectadas a otras vías de comunicación. Sin embargo, este entorno influye en mayor o menor grado sobre nuestro ambiente sonoro. En este punto, se debe elaborar una concepción sobre lo que se desea analizar. La delimitación espacial no solamente nos marca el territorio, sino que lo ubica, pudiendo establecer si es un entorno urbano o natural.

##### *10.1.23.1.2. Delimitación y análisis de las estructuras fijas que configuran el espacio sonoro*

Todos los elementos rígidos pueden alterar la libre propagación del sonido en el espacio. Las construcciones, con sus características arquitectónicas, el mobiliario urbano, el suelo, son ejemplos de estos elementos. No es solo una cuestión de reflexión del

sonido, sino de cambio de contenido en frecuencia que producen los distintos materiales sobre el sonido. En los fenómenos de reflexión intervienen muchas variables, la más conocida es el ángulo de incidencia. No obstante, al margen de la reflexión, pueden coexistir otros fenómenos importantes, como la difusión y la absorción del sonido.

Son importantes las medidas de las distintas superficies de los edificios y también los materiales constructivos utilizados, que pueden alterar sustancialmente la radiografía acústica del espacio. No hay que descartar las pequeñas superficies respecto a las más grandes, puesto que para altas frecuencias se producen reflexiones que dan matices que se debe tener en cuenta.

#### *10.1.23.1.3. Delimitación temporal del espacio para tratar*

Se establece si es necesaria una diferenciación entre día/noche o día laborable/festivo para el paisaje sonoro. Un espacio inmerso en un tejido urbano estará rodeado de sonidos procedentes de las inmediaciones que van a interactuar con el ambiente sonoro que se pretende mejorar. Estos sonidos externos tienen una evidente variabilidad temporal que debe ser tenida en cuenta. Por ejemplo, los parques urbanos entre semana tienen unos sonidos distintos a los fines de semana o festivos, debido en parte a que el volumen del tráfico rodado es diferente y, por ende, el nivel sonoro y su espectro en frecuencia. La delimitación temporal no suele ser frecuente, ya que las plazas o los espacios públicos permanecen abiertos las 24 horas. Obviamente, los sonidos que se perciban a lo largo del día son cambiantes y esto debe ser tenido en cuenta en el diseño o la mejora del paisaje sonoro.

El diseño del paisaje sonoro no debería ser rígido e inalterable, sino que debería tener una variabilidad temporal. Por otro lado, no se puede pretender que un lugar mantenga su calidad sonora de forma perpetua. La vegetación y la fauna, como fuentes sonoras naturales de sonido, están sometidas a una variabilidad temporal y estacional que no puede obviarse.

#### *10.1.23.1.4. Descripción de la ubicación de las fuentes sonoras presentes en el paisaje sonoro*

Cualquier elemento que vibre es una fuente sonora. Si no hay elementos vibrantes, no se produce ningún sonido. La dificultad recae en que, salvo casos puntuales, las vibraciones son tan pequeñas que no se pueden percibir con el tacto. Las superficies pequeñas radian menos energía que las superficies mayores, siendo las segundas las que emiten energía a baja frecuencia. Para que una superficie radie energía sonora, debe tener un elemento que la haga vibrar (puede ser un elemento mecánico o natural).

Respecto a las fuentes sonoras, hay que distinguir entre fuentes fijas y móviles. Las fijas suelen estar asociadas a fuentes artificiales, por lo que su ubicación no se

altera con el paso del tiempo, salvo que se cambien de sitio voluntariamente. Para las fuentes móviles, es necesario describir las trayectorias más probables y las velocidades de estas. Debe hacerse una descripción de las distancias hasta el punto o los puntos de observación y el origen preciso del sonido. Nótese que la ubicación de las fuentes sonoras en el espacio 3D es lo que da realismo a nuestro sentido auditivo en la percepción sonora.

Por ejemplo, la ubicación de fuentes sonoras en el caso de vehículos no es todo el vehículo, sino las partes que originan el sonido. El ruido de neumático procede del contacto entre los neumáticos y la calzada; por tanto, la fuente sonora se encuentra sobre la vía de circulación. El ruido del motor MCI en un vehículo automóvil se produce debajo del capó. El compartimento del motor rodea a este por todas las caras excepto la cara inferior, parcialmente la frontal y los pasos de rueda delanteros. Las altas frecuencias quedan bastante atenuadas por la chapa de acero, pero las bajas frecuencias, sobre todo el ruido de admisión, sufren una ligera atenuación. Esta fuente sonora, simplificando el modelo, tiene dos contribuciones: *a)* la baja frecuencia situada a unos 0,5 m de altura del suelo y *b)* las altas frecuencias (ruido mecánico, cambio marchas, embrague) que salen por las aberturas de ventilación y que pueden situarse en promedio a 0,2 m del suelo. Como en la mayoría de fuentes sonoras, la temporalidad o variabilidad será un dato importante que se debe tener en cuenta.

#### *10.1.23.1.5. Influencia de la climatología del lugar*

La temperatura, la humedad y el viento son factores que afectan a la propagación del sonido. Si bien a cortas distancias, la climatología apenas influye, el factor más importante que se debe tener en cuenta siempre es el viento. El sonido se desplazará siempre a favor del viento, incrementando los niveles sonoros en esa dirección. Para distancias mayores, centenares de metros, la humedad y, sobre todo, el gradiente de temperatura pueden alterar apreciablemente la propagación del sonido y los niveles sonoros. Sin embargo, dentro del lugar (plaza, parque urbano, etc.), las variaciones que puede sufrir el nivel de sonido quizá sean medibles, pero no perceptibles.

La climatología altera otros aspectos. Por ejemplo, el viento produce a su paso por el follaje de los árboles un sonido característico que se considera natural. La lluvia al caer sobre el suelo produce sonidos esencialmente de medias y altas frecuencias, ya que los impactos de las gotas de agua son sobre superficies duras. La lluvia hace que el suelo sea mucho más reflectante del sonido y el andar produce sonidos distintos, que probablemente no se perciban porque otros sonidos (caída de la lluvia) los camuflan. Respecto a la influencia de la temperatura, es sabido que la velocidad del sonido aumenta con ella. Sin embargo, esto no altera ni la forma de propagación ni la atenuación del sonido por la distancia recorrida.

### 10.1.23.2. Fuentes sonoras intrínsecas

La suma de las distintas fuentes sonoras configuran el ambiente sonoro de un determinado lugar. Son sonidos de origen muy diverso. El que prevalece en los entornos urbanos es el de origen humano, tanto de máquinas como de las personas. También encontramos otros de origen natural, como el procedente de la fauna o el del agua. Es la unión de estas distintas fuentes sonoras superpuestas a las cualidades de la radiografía acústica del espacio la que conforma nuestro paisaje sonoro.

Podemos subdividir esta tipología de fuentes sonoras en dos partes. Por un lado, las fuentes sonoras generales ligadas al lugar. Estas fuentes sonoras no tienen por qué ser permanentes las 24 horas los 365 días del año, sino que son propias del paisaje sonoro donde se ubica el lugar. Por ejemplo, el sonido de tráfico rodado, el sonido del agua, etc., todos ellos matizados por las correcciones sonoras introducidas por el entorno más cercano (edificios, calles, etc.). Los sonidos originales pueden ser muy similares en otros lugares, es decir, no son exclusivos de un lugar concreto.

Por otro lado, tenemos las fuentes sonoras idiosincráticas, que corresponden a determinados elementos sonoros característicos del lugar y que se podría llamar la *firma acústica*. Por ejemplo, el sonido de las cotorras se puede reconocer en determinados espacios en algunas ciudades como Barcelona.

Por último, tenemos las fuentes eventuales o extraordinarias, que corresponden a sonidos que se producen puntualmente. Hay un amplio abanico de estas fuentes sonoras, desde las señales acústicas de los vehículos y servicios de emergencia hasta los sonidos de aglomeraciones de gente en una manifestación, etc.

### 10.1.24. Ejemplo de paseo sonoro

El paseo sonoro que se muestra como ejemplo pretende ilustrar resumidamente y de forma simplificada cómo se lleva a cabo el proceso. Este ejemplo sigue el itinerario y las mediciones que se realizaron en la ciudad de Granada el 13 de abril de 2018, de 12:00 a 14:30, por el Dr. Jerónimo Vida y su equipo de trabajo, del Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada. La figura 10.53 muestra en color rojo el trazado de dicho paseo sonoro. Se muestran también las paradas donde se realizan las audiciones sonoras, marcadas en verde y numeradas del 1 al 8.

Durante las audiciones, que tienen una duración de 10 minutos, y mediante un sonómetro tipo 1 montado sobre un trípode, se graban de forma simultánea los datos acústicos relativos a los niveles sonoros, los percentiles y los niveles por bandas de tercio de octava, cada segundo. En este itinerario participan un total de catorce personas adultas, de edades comprendidas entre los 20 y los 55 años. Diez de ellas tienen menos de 30 años

y solo cuatro superan esta edad. Por tanto, tenemos una muestra de población mayoritariamente joven. Todos los participantes manifiestan no presentar defectos auditivos.



**Figura 10.53.** Itinerario del paseo sonoro, con ocho puntos de atención, llevado a cabo en Granada en 2018.

#### 10.1.24.1. Encuestas efectuadas

Para cada punto, los participantes rellenaron un cuestionario con diez preguntas. No obstante, para este manual se utilizan solo una parte de las preguntas relativas a la apreciación cualitativa del sonido. La figura 10.54 muestra estas preguntas.

De las preguntas mostradas, pareció inicialmente más interesante la pregunta 5, que contrapone diferentes aspectos del sonido en cuatro vectores de valoración:

- *Acogedor* (me agrada) frente a *molesto* (me desagrada).
- *Caótico* (me desagrada y hay agitación) frente a *calmado* (me agrada y no hay agitación).
- *Vibrante* (me agrada y hay agitación) frente a *tedioso* (me desagrada y no hay agitación).
- *Estático* (no hay agitación) frente a *dinámico* (hay agitación).

En este ejemplo, se muestran los datos de los puntos 2, 5 y 8. Los resultados mostrados en adelante se refieren a estos puntos. Los participantes rellenan una encuesta para valorar sus impresiones.

| 5. El AMBIENTE SONORO de este lugar ES                                       |   |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|--|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| (ESCALA: 1 - "desacuerdo total" → 10 - "totalmente de acuerdo")              |   |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| 5-1  | ACOGEDOR (me agrada)                      |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-2  | CAÓTICO (me desagrada y hay agitación)    |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-3  | VIBRANTE (me agrada y hay agitación)      |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-4  | ESTÁTICO (no hay agitación)               |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-5  | CALMADO (me agrada y no hay agitación)    |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-6  | MOLESTO (me desagrada)                    |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-7  | DINÁMICO (hay agitación)                  |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 5-8  | TEDIOSO (me desagrada y no hay agitación) |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|  | 1 <input type="checkbox"/>                | 2 <input type="checkbox"/> | 3 <input type="checkbox"/> | 4 <input type="checkbox"/> | 5 <input type="checkbox"/> | 6 <input type="checkbox"/> | 7 <input type="checkbox"/> | 8 <input type="checkbox"/> | 9 <input type="checkbox"/> |
| 7. Valore la TRANQUILIDAD del ambiente sonoro de este lugar                  |   |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| 7-1  | no es tranquilo                           | ligeramente                | un poco                    | tranquilo                  | muy tranquilo              |                            |                            |                            |                            |
|  | <input type="checkbox"/>                  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |                            |                            |                            |                            |
| 8. Valore si es AGRADABLE el ambiente sonoro de este lugar                   |   |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| 8-1  | nada agradable                            | ligeramente                | un poco                    | agradable                  | muy agradable              |                            |                            |                            |                            |
|  | <input type="checkbox"/>                  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |                            |                            |                            |                            |
| 9. Valore el RUIDO del ambiente sonoro (su volumen, magnitud, no su calidad) |   |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| 9-1  | nada ruidoso                              | ligeramente                | un poco                    | ruidoso                    | muy ruidoso                |                            |                            |                            |                            |
|  | <input type="checkbox"/>                  | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>   |                            |                            |                            |                            |

Figura 10.54. Muestra de los formularios de respuesta que rellenan los participantes en un paseo sonoro.

### 10.1.24.2. Descripción de los puntos escogidos para el estudio

#### Punto 2

Es un punto situado en una plaza con espacios muy abiertos. Por el oeste hay un edificio de planta baja más 6 plantas (PB+6) situado a unos 50 m de distancia. La forma del edificio más cercano no permite la presencia de fuertes reflexiones de sonido sobre la zona de prueba. Por el sur, se encuentra otro edificio de PB+6, pero está a unos 175 m de distancia, por lo que su influencia se considera despreciable respecto a las fuentes sonoras más próximas. Al este, hay un estadio de atletismo sin construcciones elevadas. Y, por último, por el norte, hay un edificio de PB+3, situado a unos 165 m de distancia con influencia también despreciable.

La figura 10.55 muestra la vista aérea del punto 2 del recorrido. El punto de observación se encuentra rodeado de vías importantes de circulación, incluyendo una amplia rotonda. También se observa un tranvía que pasa por el este.



**Figura 10.55.** Ubicación del punto 2 del paseo sonoro.

### **Punto 5**

El punto 5 también se encuentra en una zona amplia con edificios no muy cercanos. Al norte hay edificios de PB+3 situados a unos 60 m. Al sureste, un edificio de PB+4 situado a unos 155 m. Al sur, un edificio de PB+7 situado a unos 70 m. Y, por último, al oeste, unas construcciones de PB+1 situadas a unos 60 m.

La figura 10.56 muestra una vista aérea con la ubicación del punto 5. El punto de observación se encuentra en una zona bastante despejada de edificios y da a una avenida importante con paso de tranvía.



**Figura 10.56.** Ubicación del punto 5 del paseo sonoro.

### **Punto 8**

Este punto se encuentra en una zona bastante despejada. Al noreste, hay unos edificios de PB+11 que, por la forma cóncava de las fachadas, pueden focalizar el sonido sobre el

punto de observación, situados a unos 68 m. Al sureste, se encuentra un centro hospitalario con diferentes edificios de PB+7 situados a unos 120 m con escasa influencia acústica. Por el oeste, hay un edificio de PB+3 situado a unos 110 m con escasa influencia acústica. El punto de observación se encuentra cercano a una vía de circulación importante. También se encuentra en las cercanías el paso del tranvía. La autovía A-44 pasa a unos 340 m de distancia del punto de observación. La figura 10.57 muestra el punto 8 del recorrido.



Figura 10.57. Ubicación del punto 8 del paseo sonoro.

### 10.1.24.3. Resultados del punto 2

A la izquierda de la figura 10.58 se muestran los resultados de las respuestas. Como se puede observar, hay respuestas marcadas en color rojo que se apartan de la tendencia general y pueden desvirtuar los resultados. Estas respuestas son descartadas, obteniendo el gráfico de la derecha. Concretamente para el punto 2, se descartan las respuestas 1, 2, 3 y 9 marcadas en color rojo.

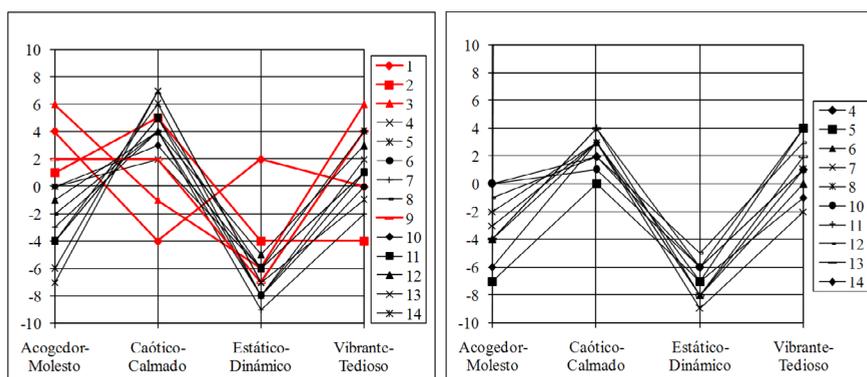
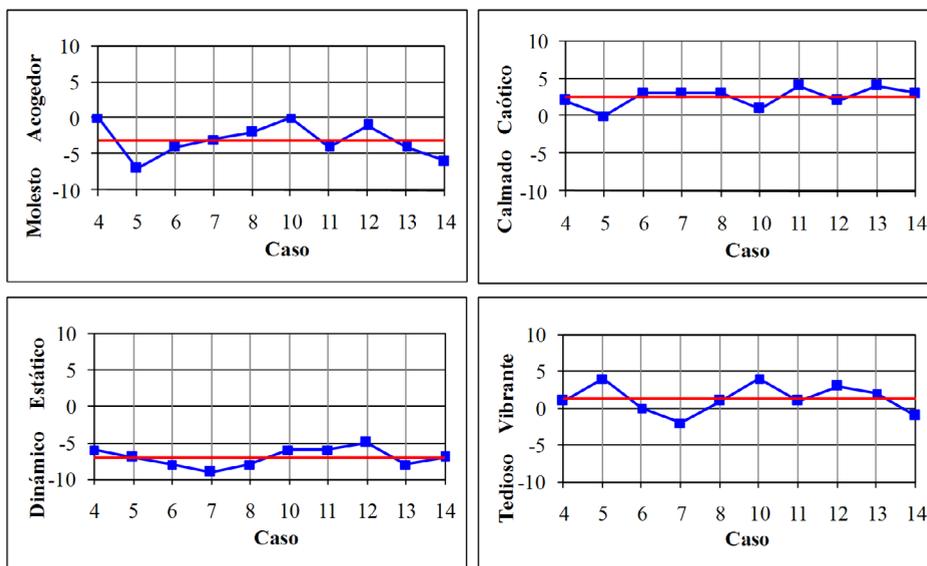


Figura 10.58. Descarte de respuestas que se apartan de la tendencia en el punto 2.

La figura 10.59 muestra el resultado para el punto 2, con las puntuaciones de los participantes para los cuatro pares de vectores.



**Figura 10.59.** Puntuaciones de los cuatro pares de vectores obtenidas para el punto 2 de observación.

Los resultados promediados obtenidos para cada par de vectores se resumen en la tabla 10.8.

**Tabla 10.8.** Resultados de las encuestas sobre el punto 2

| Punto | Acogedor-Molesto | Caótico-Calmado | Estático-Dinámico | Vibrante-Tedioso |
|-------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 2     | -3,10            | 2,50            | -7,00             | 1,30             |

El valor de  $-3,1$  significa que el punto 2 se considera mayoritariamente como acogedor. El valor de  $2,5$  significa que el punto 2 se considera calmado. El valor de  $-7$  significa que el punto 2 se considera estático. Por último, el valor de  $1,3$  significa que el punto 2 se considera tedioso. En cada caso, la puntuación entre 0 y 10 gradúa el grado de intensidad de cada parámetro evaluado.

#### 10.1.24.4. Resultados del punto 5

A la izquierda de la figura 10.60 se muestran los resultados de las encuestas. Se descartan las respuestas que se apartan de la media. Concretamente para el punto 5, se descartan las respuestas 1, 5, 8, 10 y 12.

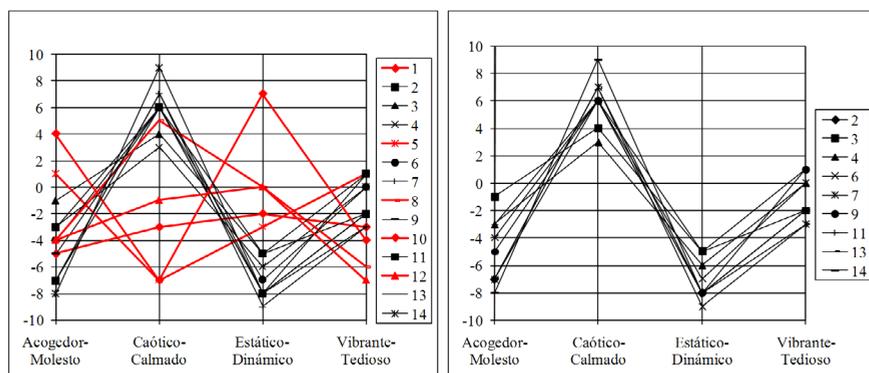


Figura 10.60. Descarte de respuestas que se apartan de la tendencia en el punto 5.

A partir del gráfico anterior con las respuestas seleccionadas, se obtiene el resultado promedio para cada par de vectores. La figura 10.61 muestra el resultado para el punto 5, con las puntuaciones de los participantes para los cuatro pares de vectores.

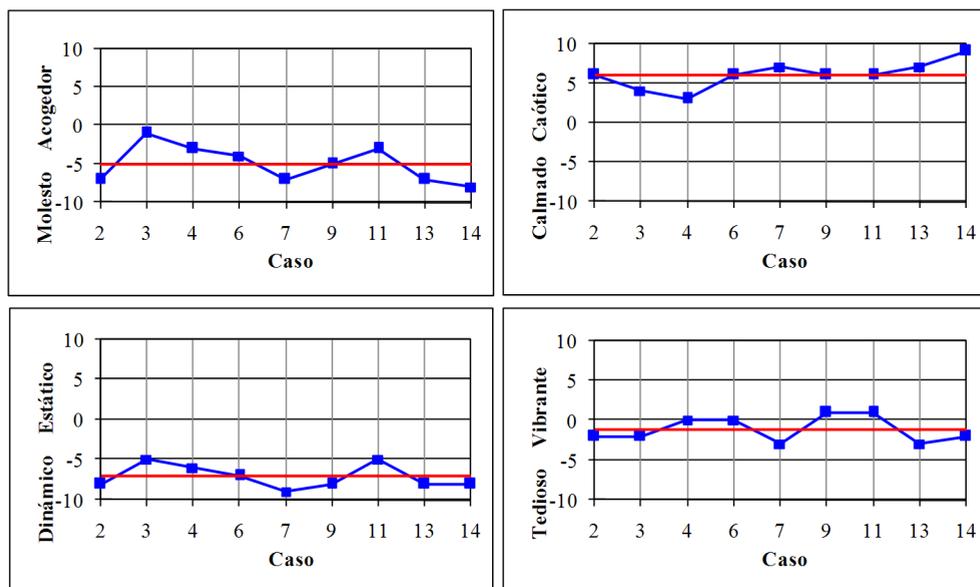


Figura 10.61. Puntuaciones de los cuatro pares de vectores obtenidas para el punto 5 de observación.

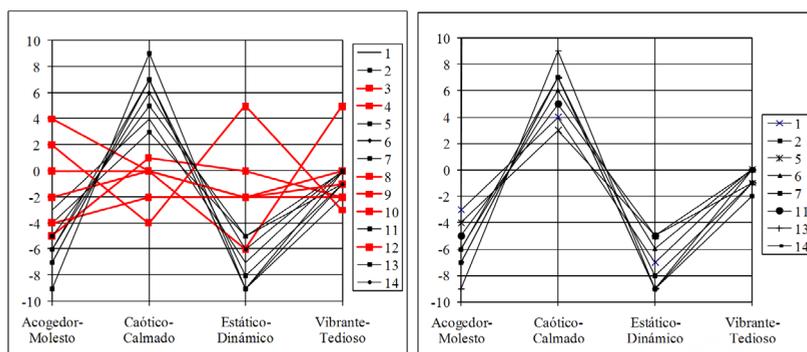
Los resultados promediados obtenidos para par de vectores se resumen en la tabla 10.9.

**Tabla 10.9.** Resultados de las encuestas sobre el punto 5

| Punto | Acogedor-Molesto | Caótico-Calmado | Estático-Dinámico | Vibrante-Tedioso |
|-------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 5     | -5,00            | 6,00            | -7,11             | -1,11            |

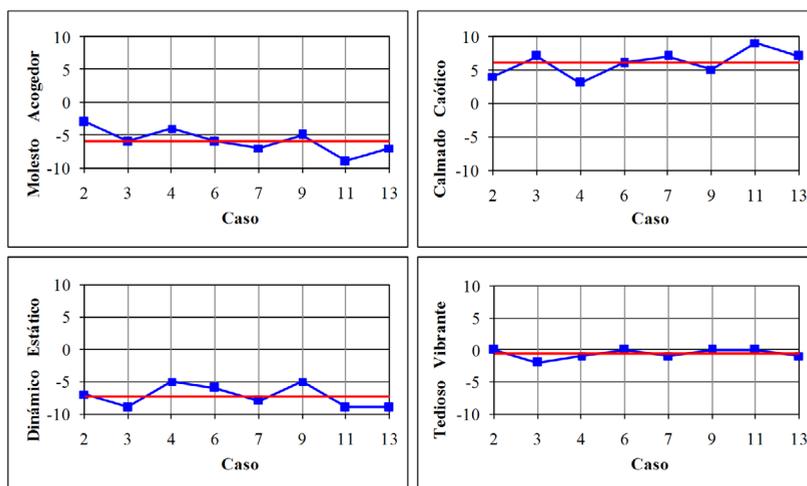
**10.1.24.5. Resultados del punto 8**

A la izquierda de la figura 10.62 se muestran los resultados de las encuestas. Concretamente, para el punto 8, se descartan las respuestas 3, 4, 8, 9, 10 y 12.



**Figura 10.62.** Descarte de respuestas que se apartan de la tendencia en el punto 8.

A partir del gráfico anterior con las respuestas seleccionadas, se obtiene el resultado promedio para cada par de vectores. La figura 10.63 muestra el resultado para el punto 8, con las puntuaciones de los participantes para los cuatro pares de vectores.



**Figura 10.63.** Puntuaciones de los cuatro pares de vectores obtenidas para el punto 8.

La tabla 10.10 recoge los resultados de la valoración del punto 8.

**Tabla 10.10.** Resultados de las encuestas sobre el punto 8

| Punto | Acogedor-Molesto | Caótico-Calmado | Estático-Dinámico | Vibrante-Tedioso |
|-------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 8     | -5,88            | 6,00            | -7,25             | -0,63            |

#### 10.1.24.6. Mediciones efectuadas durante el paseo sonoro

En los puntos del recorrido antes indicados, se hace una medición sonométrica con un sonómetro de tipo 1. Este equipo se programa para que tome muestras cada segundo y obtenga los niveles sonoros con diferentes ponderaciones, los valores percentiles y también los espectros en tercio de octava entre 20 Hz y 20 kHz.

El sonómetro se coloca suficientemente alejado del grupo de personas que participan en el paseo sonoro, para que no haya influencia de posibles ruidos producidos por los participantes. Como ejemplo, en la figura 10.64 se muestra la ubicación del punto 2, donde se destaca con un círculo rojo la posición del sonómetro, que permanece fijo en el punto indicado durante los diez minutos que dura la medición del nivel sonoro y demás parámetros de medida.



**Figura 10.64.** Posición del sonómetro de medida en el punto 2.

Los niveles sonoros medidos en los puntos 2, 5 y 8 se resumen en las tablas 10.11, 10.12 y 10.13. En ellas podemos ver distintos indicadores: en la parte superior, el nivel equivalente  $L_{Aeq}$  cada minuto; también se muestran distintos percentiles, y en la parte inferior, el nivel de pico y el impulso.

Respecto al nivel  $L_{Aeq}$  obtenido para cada punto, encontramos el máximo valor con 66,3 dBA para el punto 2. El ruido de fondo, valorado con el indicador  $L_{90}$ , es muy similar en los tres casos analizados, alrededor de 58 dBA.

**Tabla. 10.11.** Niveles sonoros medidos en el punto 2.

| Minuto | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | TOTAL | Minuto |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| Leq    | 59,8 | 60,6 | 62,3 | 59,9 | 64,7 | 66,7 | 62,3 | 74,2 | 58,8 | 60,9 | 66,3  | Leq    |
| LE     | 77,6 | 78,4 | 80,1 | 77,7 | 82,5 | 84,5 | 80,1 | 92,0 | 76,6 | 78,7 | 94,1  | LE     |
| Lmax   | 63,4 | 65,1 | 71,0 | 63,5 | 72,4 | 72,4 | 68,5 | 83,3 | 63,1 | 66,5 | 74,5  | Lmax   |
| Lmin   | 55,7 | 56,8 | 54,7 | 57,7 | 58,3 | 60,8 | 59,4 | 60,0 | 54,7 | 54,8 | 57,8  | Lmin   |
| L5     | 63,6 | 64,3 | 70,0 | 61,9 | 71,4 | 71,7 | 65,8 | 82,3 | 62,4 | 65,4 | 73,5  | L5     |
| L10    | 62,7 | 63,0 | 65,3 | 61,2 | 68,4 | 70,1 | 64,5 | 79,3 | 61,2 | 64,6 | 70,7  | L10    |
| L50    | 58,8 | 60,0 | 60,3 | 59,8 | 61,2 | 65,2 | 61,7 | 66,5 | 58,3 | 59,7 | 62,0  | L50    |
| L90    | 56,3 | 57,7 | 56,3 | 58,1 | 59,0 | 62,3 | 59,9 | 61,3 | 55,7 | 56,0 | 58,9  | L90    |
| L95    | 56,1 | 57,1 | 55,5 | 57,6 | 58,8 | 61,6 | 59,6 | 60,5 | 55,1 | 55,4 | 58,3  | L95    |
| LCpeak | 84,7 | 91,5 | 88,4 | 86,6 | 90,0 | 90,0 | 91,2 | 96,5 | 85,9 | 89,2 | 90,7  | Lpeak  |
| LALeq  | 60,9 | 62,2 | 66,8 | 61,9 | 69,8 | 69,4 | 64,3 | 76,6 | 62,1 | 63,7 | 69,0  | LALeq  |

**Tabla. 10.12.** Niveles sonoros medidos en el punto 5.

| Minuto | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | TOTAL | Minuto |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|
| Leq    | 65,9 | 65,4 | 62,5 | 63,8 | 62,8 | 65,9 | 63,8 | 63,3 | 66,6 | 64,6  | 64,6  | Leq    |
| LE     | 83,7 | 83,2 | 80,3 | 81,6 | 80,6 | 83,7 | 81,6 | 81,1 | 81,1 | 84,4  | 92,3  | LE     |
| Lmax   | 73,0 | 74,1 | 71,4 | 71,2 | 70,5 | 75,4 | 74,2 | 70,8 | 72,7 | 77,0  | 73,5  | Lmax   |
| Lmin   | 57,3 | 54,5 | 53,9 | 57,1 | 54,6 | 54,0 | 55,8 | 57,9 | 56,7 | 59,1  | 56,4  | Lmin   |
| L5     | 70,9 | 73,0 | 69,3 | 69,7 | 69,4 | 74,4 | 71,3 | 67,6 | 68,6 | 72,4  | 71,1  | L5     |
| L10    | 70,1 | 69,3 | 66,7 | 66,8 | 68,2 | 71,0 | 68,5 | 66,9 | 66,9 | 69,7  | 68,7  | L10    |
| L50    | 63,1 | 60,9 | 59,6 | 62,0 | 59,3 | 60,1 | 59,4 | 60,8 | 60,8 | 62,7  | 61,2  | L50    |
| L90    | 58,6 | 56,8 | 56,0 | 58,0 | 55,8 | 55,4 | 56,2 | 58,4 | 57,4 | 59,4  | 57,4  | L90    |
| L95    | 58,0 | 56,0 | 55,1 | 57,6 | 55,2 | 54,9 | 56,0 | 58,1 | 57,0 | 59,0  | 56,9  | L95    |
| LCpeak | 96,7 | 99,1 | 92,8 | 93,5 | 92,4 | 97,8 | 97,9 | 88,9 | 96,5 | 100,9 | 96,9  | Lpeak  |
| LALeq  | 70,6 | 69,6 | 66,1 | 66,9 | 66,2 | 69,7 | 69,4 | 64,5 | 67,0 | 71,3  | 68,6  | LALeq  |

**Tabla. 10.13.** Niveles sonoros medidos en el punto 8.

| Minuto | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | TOTAL | Minuto |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| Leq    | 57,0 | 60,9 | 60,0 | 61,1 | 61,5 | 60,6 | 61,0 | 61,0 | 62,9 | 62,2 | 61,0  | Leq    |
| LE     | 74,8 | 78,7 | 77,8 | 78,9 | 79,3 | 78,4 | 78,8 | 78,8 | 80,7 | 80,0 | 88,8  | LE     |
| Lmax   | 62,6 | 67,6 | 65,1 | 65,3 | 67,5 | 64,6 | 64,8 | 64,6 | 68,5 | 68,1 | 66,2  | Lmax   |
| Lmin   | 55,5 | 55,7 | 57,3 | 57,2 | 56,8 | 56,8 | 57,1 | 57,3 | 58,6 | 58,0 | 57,1  | Lmin   |
| L5     | 58,5 | 66,5 | 63,3 | 63,7 | 66,5 | 63,1 | 64,4 | 64,6 | 67,5 | 67,3 | 65,2  | L5     |
| L10    | 57,8 | 65,3 | 62,6 | 63,4 | 64,4 | 62,4 | 63,9 | 63,7 | 66,3 | 66,2 | 64,1  | L10    |
| L50    | 56,8 | 59,1 | 59,0 | 60,2 | 60,5 | 60,2 | 60,4 | 60,1 | 61,7 | 60,6 | 60,0  | L50    |
| L90    | 55,7 | 56,4 | 57,5 | 58,0 | 57,5 | 58,4 | 58,0 | 58,0 | 59,3 | 58,5 | 57,8  | L90    |
| L95    | 55,6 | 55,9 | 57,2 | 57,7 | 57,2 | 57,7 | 57,6 | 57,8 | 59,0 | 58,0 | 57,5  | L95    |
| LCpeak | 88,9 | 96,7 | 91,0 | 95,3 | 87,9 | 93,0 | 87,2 | 88,7 | 88,9 | 87,1 | 91,8  | Lpeak  |
| LALeq  | 59,4 | 63,4 | 62,5 | 63,1 | 63,3 | 63,7 | 62,7 | 62,9 | 67,3 | 65,9 | 63,9  | LALeq  |

Los sucesivos espectros sonoros a lo largo de los diez minutos de grabación nos permiten visualizar los niveles y las frecuencias implicadas en el fenómeno sonoro. Partiendo de los datos espectrales en tercio de octava obtenidos por el sonómetro cada segundo, se confeccionan las evoluciones temporales de los espectros sonoros *waterfall* para los puntos 2, 5 y 8, que se muestran en las figuras siguientes. La definición temporal es de

1 s y se representan los tercios de octava de 20 Hz a 20 kHz. La escala del nivel sonoro (dB) se iguala en las tres gráficas para poder compararse cómodamente los resultados. La figura 10.65 muestra las tres evoluciones temporales de los espectros sonoros.

Los tonos de color rojizo muestran los niveles más elevados. En tonos azulados, se muestran los niveles sonoros más bajos. Las distintas secuencias o planos muestran los espectros con una cadencia de 1 s.

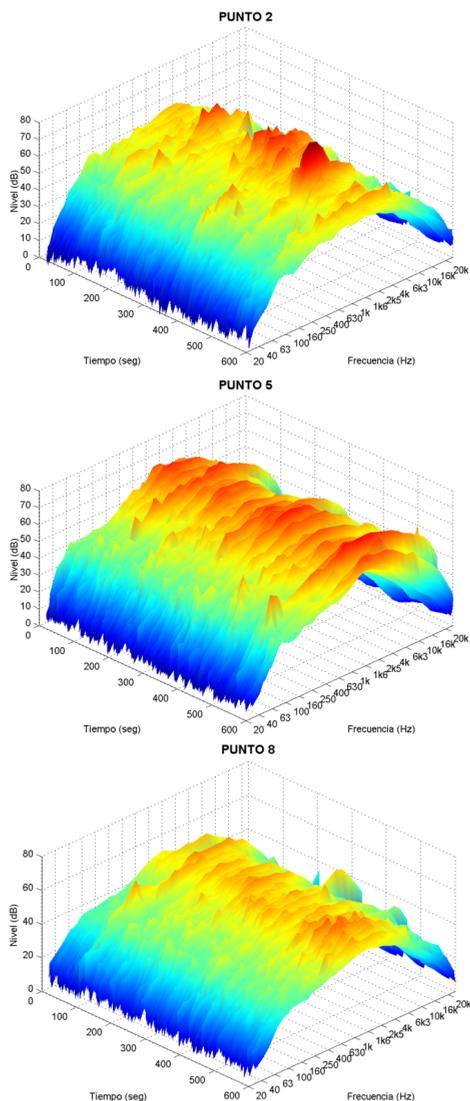


Figura 10.65. Evolución temporal del espectro sonoro para los puntos 2, 5 y 8.

#### **10.1.23.7. Análisis de los resultados obtenidos**

Los niveles del punto 2 presentan irregularidades notables tanto de nivel sonoro como de sucesos temporales. Aun considerando el pico de señal que aparece en el punto 2 (450 s) como un suceso atípico, los niveles del punto 2 muestran un contenido en frecuencia limitado e irregular en el tiempo. Este suceso suele ser tratado de distinta forma por los participantes. Al suceder hacia el final del registro, es probable que algunos penalicen la calificación de este punto al retener en su memoria los eventos más recientes.

Por la forma espectral, se deduce que hay vehículos que pasan a cierta distancia, lo que se traduce en un espectro de menor amplitud y más plano, ya que el sonido del neumático que se produce justo en la calzada puede quedar parcialmente «tapado» por algún elemento interpuesto entre el contacto de los neumáticos y el punto de medida.

El punto 5 es el que presenta unos niveles espectrales más elevados durante todo el período de registro y, además, es un sonido con mayor ancho de banda durante todo el registro. Por la forma espectral, donde se observa mayor nivel sonoro a las bandas alrededor de 1 kHz, la principal contribución sonora procede del tráfico rodado que pasa a velocidad constante, del orden de los 50 km/h, donde el ruido del neumático es dominante. Por eso, en principio se podría considerar que el punto 5 sería el más molesto.

Por último, el punto 8 es el que presenta unos niveles sonoros más bajos durante todo el período. En esta muestra no hay sucesos que destaquen. Los márgenes de frecuencia se mantienen moderados durante todo el registro. Tampoco se aprecian estridencias en frecuencia *a priori*, pues el sonido del punto 8 podría ser considerado como el menos molesto.

El nivel equivalente  $L_{Aeq}$  del punto 2 es más elevado (66,3 dBA) respecto al punto 5 (64,6 dBA) y al punto 8 (61 dBA). Según el indicador  $L_{Aeq}$ , el punto 2 sería el más molesto. Si el pico que aparece en el segundo 450 del registro se considera por los encuestados como un suceso «atípico» y no se computa, esta valoración podría cambiar, pero esto es solo una suposición. Por otro lado, los espectros mostrados indican que el punto 5 podría ser considerado como el más molesto, ya que presenta mayores niveles sonoros durante más tiempo y eso entra en contradicción con el resultado de la medición con  $L_{Aeq}$ .

#### **10.1.24.8. Aspectos cualitativos del sonido en la encuesta**

En la encuesta respondida por todos los participantes, hay tres preguntas en las que se pide explícitamente que se valore la calidad sonora percibida. En concreto, la pregunta 7 pide que se valore la tranquilidad del ambiente sonoro en el punto de observación. La pregunta 8 pide que se valore el agrado del ambiente sonoro en el punto de medida. Y, por último, la pregunta 9 pide que se valore el ruido ambiente sonoro (su volumen, magnitud, no su calidad). La figura 10.66 muestra estas tres preguntas y la escala de puntuación de 1 a 5.

| 7. Valore la TRANQUILIDAD del ambiente sonoro de este lugar |                          |                          |                          |                          |                          |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 7-1   | no es tranquilo          | ligeramente              | un poco                  | tranquilo                | muy tranquilo            |
|   | <input type="checkbox"/> |

| 8. Valore si es AGRADABLE el ambiente sonoro de este lugar |                          |                          |                          |                          |                          |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 8-1  | nada agradable           | ligeramente              | un poco                  | agradable                | muy agradable            |
|  | <input type="checkbox"/> |

| 9. Valore el RUIDO del ambiente sonoro (su volumen, magnitud, no su calidad) |                          |                          |                          |                          |                          |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 9-1  | nada ruidoso             | ligeramente              | un poco                  | ruidoso                  | muy ruidoso              |
|  | <input type="checkbox"/> |

Figura 10.66. Preguntas de la encuesta para valorar los aspectos cualitativos del sonido percibido (salvo la última, que valora su intensidad).

La pregunta 9 valora la intensidad sonora, pero esta valoración lleva implícitos algunos aspectos cualitativos, ya que ciertos sonidos pueden tener niveles sonoros elevados y, sin embargo, no considerarse ruidosos.

Además, la pregunta 9 pide explícitamente la valoración del ruido como aspecto negativo del sonido escuchado, en contraposición generalmente al concepto de *tranquilidad*. Nótese que el concepto *ambiente sonoro agradable* no siempre se contrapone al concepto de ruido. Cabe recordar que el término *ruido* se usa con frecuencia como sinónimo de *molesto* y este aspecto es muy subjetivo. Por ejemplo, el sonido de una carrera de F1 puede ser considerado agradable o detestable en función de las preferencias personales. Se hace un análisis de las respuestas a las preguntas indicadas anteriormente y se muestran los resultados en la figura 10.67.

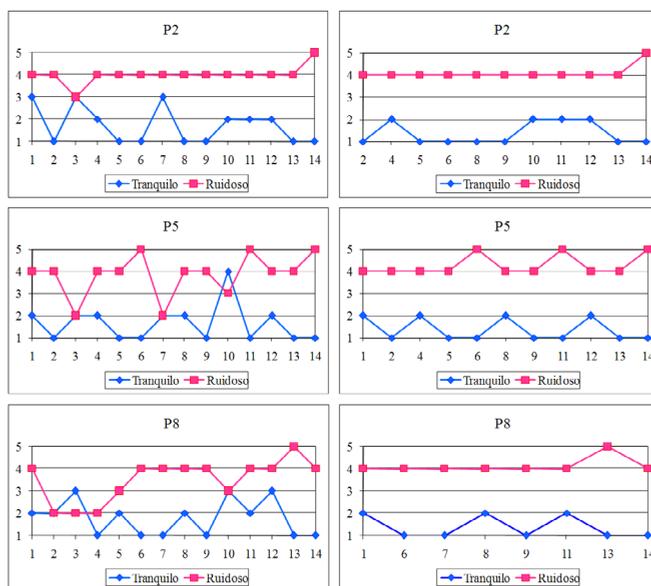


Figura 10.67. Selección de respuestas coherentes de las preguntas 7, 8 y 9.

A la derecha se muestran los resultados obtenidos. Teniendo en cuenta que un mismo punto a nivel sonoro no se puede considerar que sea tranquilo y a la vez ruidoso, se descartan esas respuestas. A la izquierda se muestran las respuestas válidas y sus puntuaciones de cada participante. Las preguntas 7, 8 y 9 piden marcar una casilla escogiendo una de las cinco opciones. Por este motivo, los gráficos tienen un escalado de cinco niveles. Por último, los resultados de las encuestas a las preguntas 7, 8 y 9, descartando las respuestas incoherentes, se muestran en la figura 10.68.

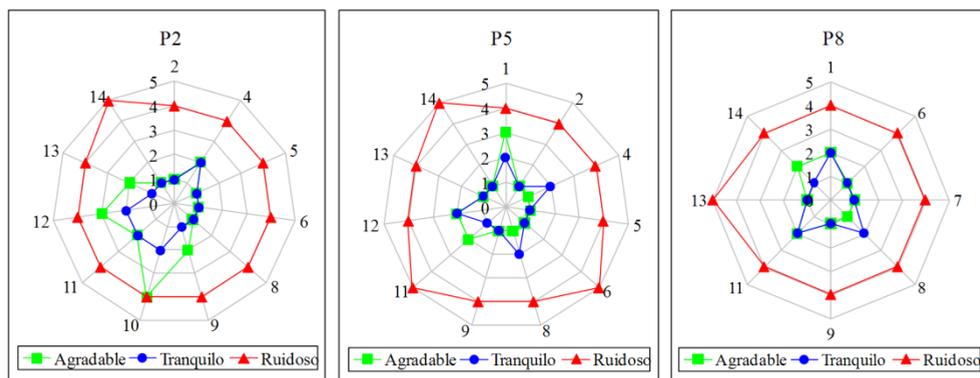


Figura 10.68. Resultados de las preguntas 7, 8 y 9.

Se observa como el concepto *ruidoso* es puntuado de forma clara (valores cercanos al máximo), en contraposición al concepto *tranquilo*. Se puede destacar que el participante 10 valora el punto 2 como ruidoso (4/5) y también agradable (4/5), lo cual parece incoherente, pero no lo es. Para el punto 8 encontramos que una parte significativa de los encuestados puntúa de forma similar el concepto ruidoso y tranquilo, produciendo respuestas poco definidas o ambiguas y que han sido descartadas. Esta circunstancia probablemente sea debida a que, en realidad, en punto 8 no es tan ruidoso como los otros.

También es posible que la causa sea que algún ruido puntual fue considerado como ruidoso y eso se extrapoló a todo el fragmento, penalizando el resultado final. Notemos que es imposible que la escala de valoración de los puntos sea comparable. Es decir, si un punto concreto del recorrido se calificó con un 4 o un 5 como ruidoso, y un punto posterior se considera mucho más ruidoso, aunque se puntúe con un 5, no estará escalado o referenciado con el primero.

Surge, entonces, la duda razonable de la coherencia de los resultados de las encuestas *in situ*. Este problema se puede eliminar en las pruebas en laboratorio, dando la posibilidad a los participantes de escuchar los distintos fragmentos sonoros antes de realizar puntuaciones.

Debido a la elevada subjetividad en la percepción sonora, el objetivo del paseo sonoro no es obtener resultados precisos, sino determinar tendencias. Los resultados de las valoraciones subjetivas de los distintos puntos, que realizan los participantes de un paseo sonoro, no se pueden comparar con otros realizados en los mismos puntos pero con otras personas, y ello conlleva a conclusiones a veces poco definidas.

Las pruebas subjetivas en laboratorio permiten reducir notablemente este problema, porque los mismos sonidos pueden ser escuchados por mucha más gente. Sin embargo, la falta de realismo en el momento de escuchar los sonidos conlleva también respuestas alejadas de la realidad. La incorporación de imágenes 360 y sonido inmersivo, con apoyo en grabaciones *ambisonics* o binaurales con *head tracking*, pueden mejorar notablemente la experiencia de los participantes y reflejar estos unos resultados más cercanos a la realidad. Obviamente, se pueden conseguir niveles de realismo mejores incorporando aspectos como el viento, la temperatura, la humedad y hasta los olores en las pruebas de laboratorio. La tecnología permite hacer todo esto, aunque otra cosa es si el coste-beneficio es asumible.

Entre ambas técnicas, la que puede dar resultados más cercanos a la realidad es el paseo sonoro, pero, para que los participantes, lejos de ser influidos, puedan tener una referencia objetiva sobre la cual basar sus respuestas, sería muy útil disponer de un indicador del nivel sonoro no numérico, con un indicador basado en el color, que pudiera «visualizar» aquello que no vemos: el nivel sonoro. Obviamente, este indicador no puede ser el  $L_{Aeq}$ .

Disponer de este equipo visible a unos metros de distancia para los participantes sería de ayuda y es quizá más simple y efectivo que tratar de reproducir las condiciones del exterior (imágenes, luz, viento, olores, temperatura, humedad, etc.) dentro de un laboratorio. No obstante, la sensación de realismo y la influencia de factores externos al sonido *per se* no va a ser la misma que *in situ*. Esto genera partidarios y detractores de ambas técnicas. Los resultados finales de estas preguntas se resumen en la tabla 10.14.

**Tabla. 10.14.** Puntuación obtenida de las preguntas 7, 8 y 9, para los tres puntos expuestos anteriormente

|         | <b>Tranquilo</b> | <b>Agradable</b> | <b>Ruidoso</b> |
|---------|------------------|------------------|----------------|
| Punto 2 | 1,4              | 1,8              | 4,1            |
| Punto 5 | 1,4              | 1,4              | 4,3            |
| Punto 8 | 1,4              | 1,4              | 4,1            |

Se observa claramente que el punto 5 es el que se considera más ruidoso. Esta respuesta coincide plenamente con el resultado del contraste acumulado, mostrado en el apartado 16.1. Pero estas respuestas no coinciden con los resultados que se extraen

de la pregunta 5, donde se valora el concepto *acogedor-molesto* que se muestran en la tabla 10.15.

**Tabla. 10.15.** Puntuación obtenida por el vector *acogedor-molesto*

| Punto | Acogedor-Molesto |
|-------|------------------|
| 2     | -3,10            |
| 5     | -5,00            |
| 8     | -5,88            |

A partir de estos resultados, cabe preguntarse si el concepto *molesto* es equivalente a *ruidoso*. Algunos sinónimos de *ruidoso* son: escandaloso, bullicioso, estruendoso, atornador, estrepitoso, estridente, etc. Algunos sinónimos de *molesto* (que produce molestia) son: irritante, enervante, inoportuno, insoportable, desagradable, inaguantable, etc. Los conceptos estrictamente no coinciden; sin embargo, por el contexto, se entiende que se valora el ambiente sonoro, si este es ruidoso o molesto, y es altamente probable que ambas acepciones coincidan para la mayoría de encuestados.

Por otro lado, ¿un ambiente sonoro molesto puede no ser ruidoso? O al revés, ¿un ambiente ruidoso puede no ser molesto? El uso del vocablo *ruido* para describir un ambiente sonoro es peyorativo. El abuso del uso de este vocablo para describir casi cualquier escenario sonoro introduce ciertas limitaciones en el lenguaje.

La acepción *silencio* queda relegada a la descripción de la «ausencia del sonido», cuando realmente podríamos hablar de un ambiente silencioso, o poco silencioso, en lugar poco ruidoso o ruidoso. Sería recomendable introducir y usar más el vocablo *silencio*. Por ejemplo, en un espacio con niveles sonoros moderados o bajos, podemos describir el ambiente sonoro como silencioso y agradable, que son acepciones positivas del sonido.

En este caso, usar los términos *poco ruidoso* y *agradable* no es coherente. Estamos mezclando una acepción negativa (ruido) con una positiva (agradable) y eso debería entenderse como un contrasentido que, en todo caso, lejos de clarificar, embarulla los conceptos. Por tanto, con vistas a obtener mejores respuestas en las encuestas, sería conveniente un cambio lingüístico importante, usando más la palabra *silencio*.

La valoración del ambiente sonoro mediante las encuestas de los puntos 2, 5 y 8 mostrados anteriormente revela diferentes resultados que pueden interpretarse como contradictorios. La pregunta 5 valora el concepto de *acogedor-molesto*, mientras que la pregunta 9 valora el concepto *ruidoso*. El concepto *ruidoso* se usa con frecuencia como sinónimo del concepto *molesto*. Sin embargo, los resultados de las respuestas de las preguntas 5 y 9 no son coincidentes, lo cual supondría que el concepto *ruidoso* no se considera equivalente al de *molesto*, aspecto muy cuestionable.

# Capítulo 11.

## Uso de aplicaciones para medir el sonido

### 11.1. Introducción

Los dispositivos móviles tienen un uso muy extendido entre la población. En la red se pueden encontrar multitud de aplicaciones (*app*) para realizar distintas tareas. Estas aplicaciones tienen la ventaja de que se pueden utilizar en cualquier lugar y en cualquier momento, lo que las hace sumamente atractivas para los usuarios. En función de la tipología de la aplicación, se utilizan algunos de los sensores de que disponen los dispositivos móviles, de manera que se pueden llevar a cabo mediciones del nivel sonoro, en el punto donde se encuentra el dispositivo. Gracias a la conectividad permanente, se pueden compartir estos datos en la red, aspecto muy atractivo y que encaja a la perfección con las generaciones más jóvenes (y no tan jóvenes) y con la llamada *ciencia ciudadana*.

Medir el sonido presente en un lugar y poder comentar las impresiones que genera en la persona tiene un valor destacable, ya que refleja una situación concreta percibida por una persona y establece una correspondencia entre el valor objetivo medido y la sensación subjetiva percibida.

Compartir esta información en la red tiene un doble cometido. Por un lado, las aportaciones siempre son altruistas y desinteresadas, y están hechas por personas con motivación y sensibilidad hacia la contaminación acústica. Por otro lado, el uso de estas aplicaciones incrementa el grado de sensibilización entre la población, incluso de aquellas personas que quizá no consideren importante los problemas de la contaminación acústica. Sin embargo, el uso de la aplicación despierta su curiosidad y, por qué no, su sensibilidad respecto a la contaminación acústica.

La mayoría de aplicaciones que podemos descargar de la red, permiten medir del nivel  $L_{Aeq}$  y muestran la evolución del nivel sonoro detectado. Algunas también muestran el nivel sonoro instantáneo, el mínimo y el máximo medido con un indicador ya sea digital o «de aguja», y, además, una gráfica muestra la evolución del nivel sonoro

de las últimas decenas de segundos. Hay otras aplicaciones en las que, además del nivel sonoro, se analiza la distribución en frecuencia, en banda fina o en tercios de octava. Por último, podemos encontrar aplicaciones más específicas para evaluar el paisaje sonoro, mediante una medida del nivel sonoro, que suele durar 30 segundos, y una encuesta que rellena el usuario. Estas aplicaciones permiten medir y registrar gráficamente el nivel sonoro, añadir fotos del lugar y la encuesta en la que se valora la sensación que ese ambiente sonoro produce sobre la persona que hace la aportación. Los resultados, que pueden ser posteriormente consultados en abierto, quedan georreferenciados a través de los sensores de posición del dispositivo y quedan almacenados, en general, en la nube. Todas las aplicaciones utilizan el micrófono del dispositivo móvil.

Para evaluar la calidad de los paisajes sonoros, existen diversas aplicaciones, tanto para iOS como para Android, que permiten medir y valorar la opinión de la persona que ha llevado a cabo el registro.

## **11.2. Micrófono de un dispositivo móvil (smartphone)**

El elemento fundamental para que las aplicaciones que miden el nivel sonoro den unos valores correctos es el micrófono. Las generaciones más recientes de dispositivos móviles tienen hasta tres micrófonos distintos y, en función de la aplicación, se utilizan unos u otros. Por ejemplo, para la función «teléfono», se usa el micrófono situado en la base del dispositivo, que se distingue por un pequeño agujero, aunque realmente el dispositivo utiliza un segundo micrófono, situado en la parte superior, que permite captar el nivel de ruido ambiente y a través de un procesado de señal, mejorar la calidad de la comunicación verbal mediante cancelación activa del ruido ambiente.

Para las aplicaciones que miden el nivel sonoro, en general se usa únicamente el micrófono situado en la parte superior del dispositivo, lo que permite orientarlo hacia la fuente sonora y ver la pantalla de la aplicación correctamente, y no se utiliza ningún tipo de cancelación de ruido, lo que alteraría los resultados obtenidos. En las aplicaciones que permiten grabar sonido o bien vídeo y sonido con modo estéreo, se utilizan los micrófonos situados en la base y en la parte superior simultáneamente, por lo que el dispositivo móvil debe colocarse de forma apaisada (en horizontal) y orientado a la fuente sonora, para que los micrófonos queden a izquierda y derecha de ésta.

El micrófono de un dispositivo móvil no es como el de los equipos de medida. Salta a la vista que el micrófono es mucho más pequeño y, por tanto, es probable que no tenga las mismas prestaciones que el micrófono de precisión que conocemos en acústica, normalmente de  $\frac{1}{2}$ ". El tamaño del micrófono limita la sensibilidad de éste. La tecnología utilizada puede hacer que su respuesta en frecuencia no sea tan perfecta como en los micrófonos de condensador. Nótese que la función principal del micrófono de un dispo-

sitivo móvil (smartphone), es captar la voz del usuario, o de los sonidos que se escuchan en ese punto, y eso conlleva a efectos prácticos unos intervalos de nivel sonoro y de frecuencia concretos.

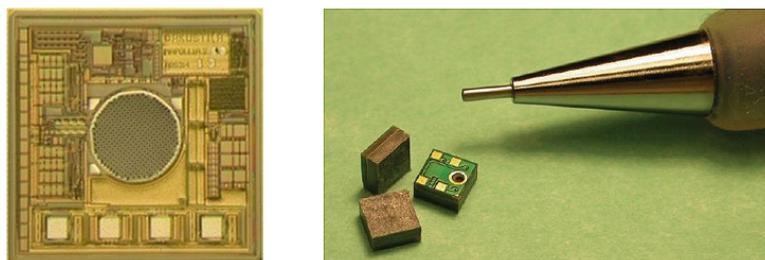
Los dispositivos móviles precisan de sistemas más pequeños, más inmunes al ruido y, sobre todo, integrables en los procesos de automatización. A mediados de los años noventa, aparecen los primeros micrófonos comerciales basados en el uso de tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) y MEMS (Micro-Electromechanical Systems), que aportan múltiples ventajas respecto de los micrófonos electret o de condensador. La principal ventaja de los micrófonos de estado sólido es su inmunidad a la radiofrecuencia (RF) y otras señales eléctricas. Esto lo hace particularmente interesante en aplicaciones en comunicaciones móviles, donde no se requiere una gran precisión.

Desde la invención del transistor en los laboratorios Bell en el año 1947, la evolución de la microelectrónica ha sido muy rápida. En el año 1982, el concepto de micro mecánica empieza a usarse para la fabricación de componentes electrónicos que disponían de partes en movimiento. Los primeros trabajos de Nathanson y Wickstrom en el año 1965 desarrollaron las bases para la micro mecánica sobre silicio. En el año 1987 nace el término MEMS refiriéndose a los micro sistemas en Europa, aunque en Japón se relaciona el mismo término con las micro máquinas. Esencialmente, se trata de poder hacer un dispositivo integrado que disponga de un elemento (membrana del micrófono) que pueda desplazarse.

La razón principal para el uso de la micro mecánica es la reducción de costes. Disponer de diversos sensores en un solo Circuito Integrado (CI) permite procesarlos simultáneamente. Además, se pueden integrar otros componentes electrónicos en el propio dispositivo creando sensores «inteligentes». Los micrófonos elaborados con la tecnología MEMS son más inmunes a las vibraciones y al viento que los micrófonos convencionales y eso los hace especialmente atractivos en algunas aplicaciones, como la telefonía móvil.

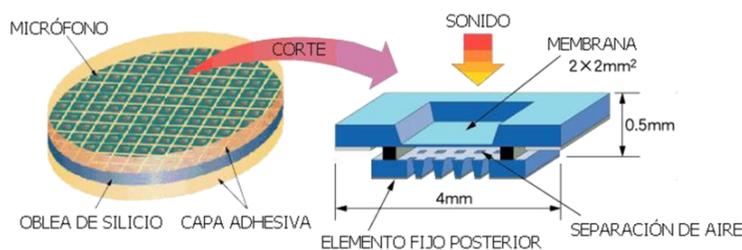
### **11.2.1. Tecnología MEMS**

La integración del micrófono y otros dispositivos electrónicos en el mismo Circuito integrado (CI) utilizando tecnología MEMS permite la creación de los micrófonos digitales. Estos dispositivos incorporan un convertidor A/D mono bit, de manera que la señal de salida es digital. La figura 11.1 muestra el dispositivo más pequeño actualmente en el mercado que incorpora un modulador delta-sigma de cuarto orden. La señal de salida es en formato PDM (Pulse Density Modulation) mono bit que puede ser leída directamente por un sistema digital, dando la máxima flexibilidad en el diseño. No precisa de cables apantallados para la señal de salida del dispositivo.



**Figura 11.1.** Izquierda: el micrófono digital más pequeño del mundo, mide  $1 \text{ mm}^2$  y lleva incorporado el preamplificador y el convertidor A/D con tecnología mono bit. Derecha: micrófonos MEMS digitales comerciales.

La figura 11.2 ilustra el proceso de obtención del micrófono individual a partir de la oblea donde se «fabrican» multitud de micrófonos, siguiendo un proceso paralelo al de la creación de CI semiconductores. En la ilustración, la membrana es cuadrada para simplificar el dibujo, aunque, obviamente, todas son circulares.

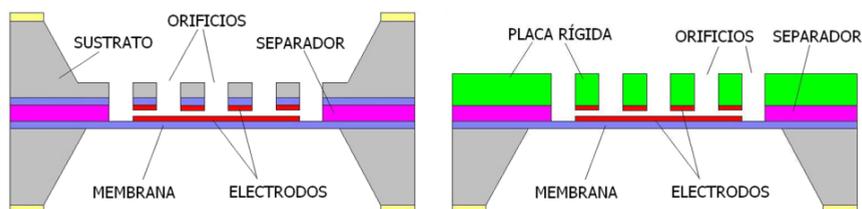


**Figura 11.2.** Detalle de obtención de un micrófono con tecnología MEMS.

La tecnología MEMS de micrófono capacitivo ofrece una buena calidad. La figura 11.3 muestra dos tipologías similares en las que se aprecia que, esencialmente, se trata de un micrófono de condensador. Un electrodo está formado por una membrana que es la que capta los sonidos y se desplaza ligeramente, y el otro es un elemento fijo. El nivel sonoro acerca y aleja los dos electrodos, esto varía la capacidad y, gracias a la carga eléctrica constante aplicada, aparece una tensión en sus extremos que será proporcional a la señal sonora tanto en amplitud como en frecuencia. El sustrato del CI es el cuerpo del micrófono y, mediante un proceso anisotrópico, se elimina la parte del sustrato no deseada, conformando el dispositivo.

A la izquierda de la figura 11.3, se muestra la formación de un micrófono capacitivo mediante la unión de dos estructuras básicas invertidas. La parte superior tiene una perforación de su membrana para permitir que el aire entre entre ambas membranas pueda

desplazarse. Sobre las membranas se depositan los electrodos mediante vaporización de metal (color rojo). Este método requiere juntar dos estructuras básicas y esto permite optimizar por separado ambas partes. Sin embargo, es un proceso caro porque requiere juntar dos CI.

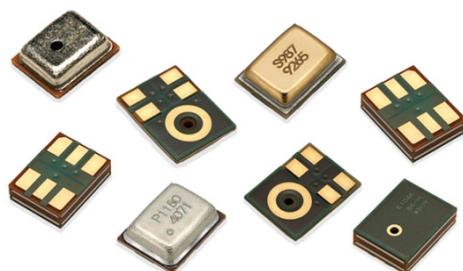


**Figura 11.3.** Micrófono capacitivo con tecnología MEMS.

A la derecha de la figura 11.3, se muestra una alternativa que consiste en añadir a la estructura básica una placa rígida perforada, que se separa de la membrana. Este método no permite optimizar las partes por separado y, si bien resulta más económico, su mecanización es más complicada.

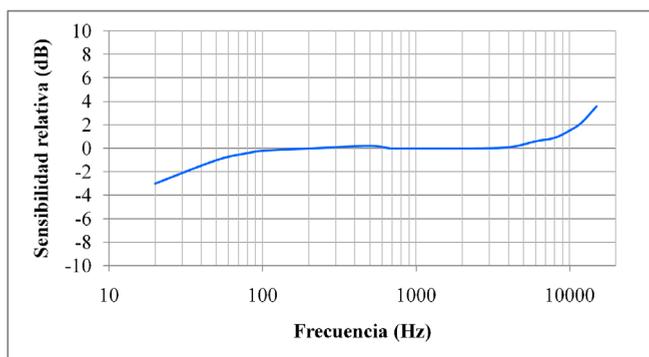
Los micrófonos MEMS son omnidireccionales y bastante lineales, dentro del margen de utilización. Las características pueden variar un poco de un fabricante a otro, pero en general, suelen tener una sensibilidad de  $-38$  dBV ( $0,63$  mV/Pa) con una distorsión armónica inferior al 1% a 1 kHz/110 dB, y la relación señal ruido es de unos 65 dBA.

Estos dispositivos son muy estables con el tiempo, presentan muy pocas variaciones con la temperatura y son bastante inmunes a las vibraciones. Los micrófonos MEMS tienen una resonancia situada generalmente entre 10 kHz y 20 kHz. Esta resonancia puede variar de un micrófono a otro, por lo que se precisa de un ajuste específico para cada dispositivo. La figura 11.4 muestra distintos micrófonos con tecnología MEMS comerciales.



**Figura 11.4.** Micrófonos capacitivos comerciales con tecnología MEMS.

El coste de fabricación de los micrófonos MEMS es muy bajo, y lo más importante es que, por sus dimensiones y el encapsulado, se pueden montar superficialmente sobre la placa base, lo que los hace especialmente atractivos en montajes masivos robotizados, como es el caso de la telefonía móvil. La figura 11.5 muestra la respuesta en frecuencia típica de un micrófono con tecnología MEMS, que se usa principalmente para *smartphone*.



**Figura 11.5.** Respuesta en frecuencia de un micrófono con tecnología MEMS.

Como se puede apreciar, el margen de frecuencia va de 50 Hz a 8 kHz ( $\pm 1$  dB). Esta respuesta se puede linealizar con electrónica, de manera que los dispositivos móviles pueden llegar a cubrir el margen de 30 Hz a 15 kHz, aproximadamente. Debe tenerse en cuenta que el procesado electrónico no es un proceso transparente; siempre añade ruido, especialmente con niveles sonoros bajos, y eso limita el margen dinámico de medida, sobre todo a bajos niveles.

Sin duda, la mejora de esta tecnología permitirá en un futuro cercano disponer de micrófonos de precisión y de bajo coste para incorporarlos en los sistemas de monitorizado de sonido de forma masiva, permitiendo la creación de grandes redes de medida a costes contenidos.

### 11.2.2. Micrófono MEMS de un dispositivo móvil

Los micrófonos utilizados por los dispositivos móviles no son de precisión y, por tanto, tienen unas prestaciones que cumplen con su función básica, que es transmitir la voz humana. Un dispositivo móvil no es un equipo de medida, y debe tenerse en cuenta que los resultados obtenidos por las distintas aplicaciones no han de considerarse como valores absolutos verdaderos, sino como una aproximación más o menos cercana al valor real. La ubicación del micrófono suele ser fácil de encontrar, porque cada micrófono tiene un pequeño agujero en la carcasa del dispositivo, de alrededor de 1 mm de diámetro,

por donde entra el sonido hasta el micrófono situado justo detrás. Todos los micrófonos del dispositivo son iguales. El tercer micrófono que llevan algunos dispositivos, suele utilizarse para mejorar la direccionalidad del conjunto de micrófonos mientras se graba un vídeo o se hace un *selfie*.

### 11.3. Medida del nivel sonoro con aplicaciones

Para la medida del sonido se utilizan los equipos profesionales de medida (sonómetros), que deben cumplir unas estrictas normas de calidad y de precisión recogidas en la norma IEC 61672, partes 1, 2 y 3. Estas normas describen las tolerancias máximas admitidas, los niveles de incertidumbre, los márgenes de error, etc., que garantizan que los equipos de medida sean precisos y fiables. Estos dispositivos están sometidos a control metrológico, es decir, deben tener un estricto control en su uso y deben estar verificados/calibrados anualmente para demostrar que se encuentran en perfecto estado de funcionamiento. Además, todos los registros obtenidos deben ser trazables, así como las sucesivas verificaciones/calibraciones del equipo.

La ubicuidad de los dispositivos móviles con el concepto bien conocido por las generaciones más jóvenes como *triple A* (*always on, anywhere, anytime*), así como el disponer de sensores de georeferencia y cámaras, presentan una clara ventaja frente a los dispositivos más tradicionales de medida del sonido. Las funciones de los teléfonos inteligentes ofrecen a los usuarios e investigadores una oportunidad de revolucionar la forma en que se recopilan y comparten los datos sobre los niveles sonoros.

#### 11.3.1. Encauzar el sonido al dispositivo móvil

La señal digital procedente del micrófono, puede tener una serie de procesados para mejorar las prestaciones del sistema. Estas suelen ser un control automático de volumen (muy útil en conversaciones telefónicas para que el interlocutor nos entienda perfectamente), un ecualizador (que permite corregir las deficiencias del micrófono y personalizar y optimizar la respuesta en frecuencia del dispositivo), un compresor (que mejora la inteligibilidad de la locución) y un procesador de señal para modificar el patrón de recepción (direccionalidad) del micrófono. Debido a la electrónica y el procesado de señal, los micrófonos del dispositivo móvil no tienen una respuesta lineal ni omnidireccional. Sin embargo, el micrófono para mediciones acústicas debe ser totalmente lineal y omnidireccional.

Las mejoras en la usabilidad de los equipos electrónicos portátiles, y el hecho de que tengan muchas funciones, no es beneficioso para la precisión de una medición acústica. No todas las mejoras electrónicas interesan para hacer una medición acústica correcta. Una medición acústica debe recoger fielmente el nivel sonoro a cada frecuencia,

por eso los equipos profesionales de medida del sonido utilizan micrófonos de precisión. Las aplicaciones no deben utilizar estos ajustes electrónicos del dispositivo móvil, que el usuario, en general, no puede alterar. Los dispositivos móviles no tienen una entrada específica de micrófono externo como tal, aunque existe el auricular con micrófono incorporado para conversaciones discretas o en entornos ruidosos. Los micrófonos externos de calidad para dispositivos móviles utilizan la entrada a través del USB-C o Lightning.

El procesado interno del dispositivo no siempre ha estado disponible. Por ejemplo, los iPhone con versiones anteriores al iOS6 disponían de un control automático de volumen para los micrófonos, que no se podía eliminar, por lo que no era posible realizar ninguna medición de nivel sonoro sin alterar el nivel de la señal sonora medida. En 2012, con el iOS6 se resolvió el problema, permitiendo a los desarrolladores de *software* el modo «de medición» que inhabilitaba el control automático de volumen.

Se han hecho diversos estudios que tratan de valorar el grado de precisión de las aplicaciones para medir el nivel sonoro. Estos trabajos muestran que determinadas aplicaciones ofrecen una precisión de  $\pm 2$  dBA. Sin embargo, de las 130 aplicaciones para iOS y las 62 aplicaciones para Android analizadas, solo 10 de iOS y 4 para Android se seleccionaron para realizar unas pruebas de precisión en el laboratorio. Estos trabajos encontraron tres aplicaciones iOS con precisiones inferiores a 2 dBA, NoiSee, Sound Meter, Noise Hunter y SPLnFFT. Para el sistema Android, al disponer únicamente de cuatro aplicaciones, los resultados presentaban importantes desviaciones y no obtuvieron ningún resultado concluyente (Kardous & Shaw, 2014).

El uso de micrófonos externos a través del *jack* de 2,5 mm fueron analizados en otro trabajo de investigación. Los resultados mostraron que con micrófonos externos se mejoraba la precisión de las mediciones del nivel sonoro. Las desviaciones respecto de un equipo de medida tipo 1 no superaron los 0,53 dB, mientras que con los micrófonos internos del dispositivo las desviaciones alcanzaron los 3,79 dB (Kardous & Shaw, 2016).

### **11.3.2. Grado de exactitud de una aplicación para dispositivo móvil**

Para ilustrar este aspecto, se muestran los resultados del análisis de un dispositivo móvil OPPO RENO 2 (diciembre 2020) de gama media, para valorar su grado de precisión. Para efectuar el análisis, se mide simultáneamente una señal estable de ruido rosa, reproducida con un equipo «home», en un entorno semianecoico, con distintos niveles de presión sonora, entre 40 y 100 dBA, con saltos de 10 dB. La señal de audio se ecualiza antes de amplificar para obtener una respuesta lo más plana posible en el punto de medida. El micrófono del dispositivo móvil se coloca en el mismo punto que el micrófono del sonómetro. Las mediciones se realizan por separado para no interferir la señal que llega al micrófono. La persona que maneja los equipos permanece alejada, estática y en silencio durante las mediciones.

Se selecciona la aplicación Sound Level Meter destinada a la medida del sonido tanto en nivel sonoro como en frecuencia, mostrando el espectro tanto en banda fina como en tercio de octava. Se selecciona la función *slow* en la presentación de los espectros de la aplicación, que tiene una integración de un segundo. Esta aplicación no permite hacer un promediado de los niveles medidos, por lo que se congela la pantalla para obtener diversos niveles  $L_{eq}$  por bandas de tercio de octava que se promedian. Al reproducir una señal estable, en un entorno controlado, las variaciones de nivel en el punto de medida son pequeñas.

Con la aplicación recién descargada y sin haberla utilizado antes, se comprueba que la diferencia de nivel global respecto el sonómetro es de  $-3,8$  dBA, es decir, la aplicación mide 3,8 dBA menos que el sonómetro. Este valor puede variar en función de la marca y el modelo del dispositivo móvil. Lo que resulta evidente es que, antes de usar cualquier aplicación, esta debe ser calibrada, función que la mayoría de aplicaciones suelen tener.

Previamente a las mediciones, se calibra la aplicación comparando el nivel sonoro medido con el sonómetro. El no poder utilizar un calibrador acústico para el dispositivo móvil supone un hándicap notable, sobre todo si la calibración se hace como se indica en algunas aplicaciones, comparando visualmente los resultados en tiempo real. Este procedimiento no es aconsejable por la elevada inexactitud de los resultados obtenidos. Lo aconsejable es hacer siempre esta calibración en un entorno acústico adecuado (cámara sorda o muy absorbente), con un bajo nivel de ruido de fondo y con señales sonoras estables como el ruido rosa, a una distancia fija, valorando siempre fragmentos de señal de algunos segundos de duración y nunca valores instantáneos.

Para determinar el grado de precisión de la aplicación (*app*), se parte de una señal de ruido rosa convenientemente ecualizada para obtener una respuesta acústica lo más plana posible. Las figuras 11.6 y 11.7 muestran el espectro sonoro de las siete pruebas efectuadas, donde se realiza un escalado de nivel sonoro de 10 dB, entre los 40 dB y los 100 dB, para el sonómetro y para la *app*, respectivamente.

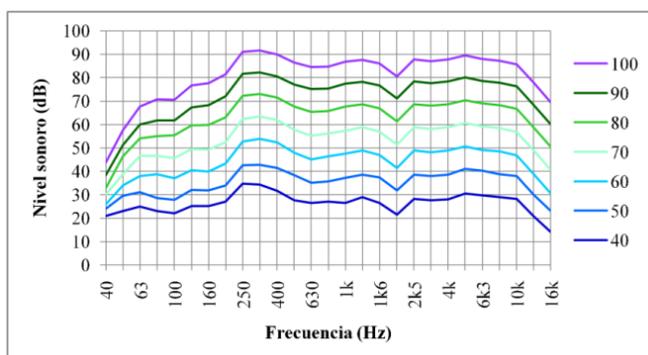
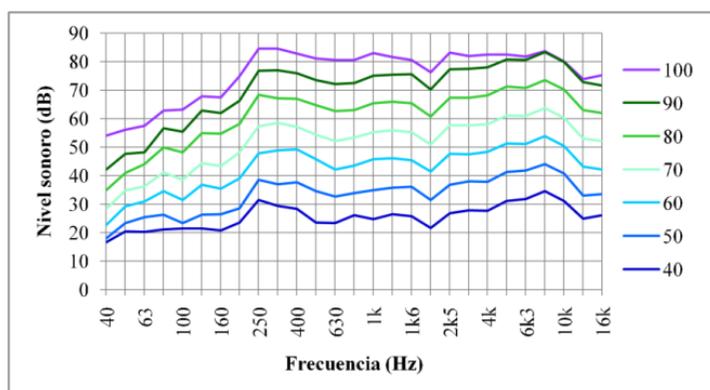


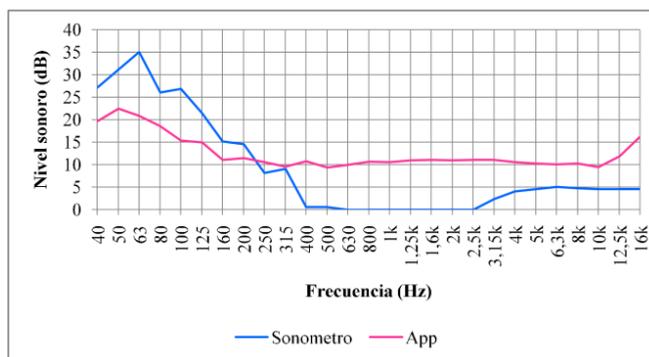
Figura 11.6. Espectro en frecuencia medido por el sonómetro.



**Figura 11.7.** Espectro en frecuencia medido por un smartphone con una app.

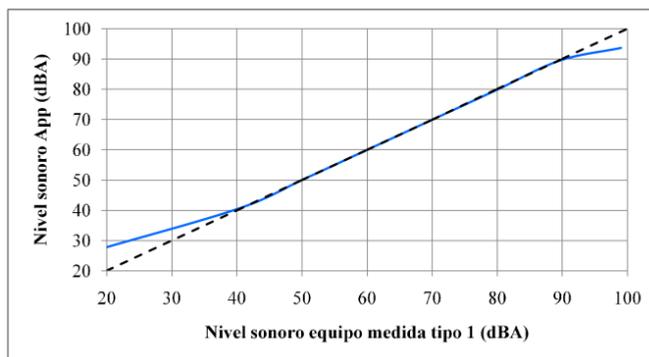
Comparando ambas familias de curvas, apreciamos una similitud, si bien el espectro medido por la aplicación tiene una carencia de baja frecuencia y una enfatización de las altas frecuencias. El ajuste interno del micrófono del dispositivo realizado en fábrica suple parcialmente la no linealidad en frecuencia del micrófono, obteniendo resultados muy similares a los del sonómetro de precisión. También se observa que en el registro con la aplicación, para un nivel de 30 dBA, se aparta del valor real, debido al ruido de fondo del micrófono y su falta de sensibilidad. Se observa que, a pesar de la ausencia de baja frecuencia por debajo de los 63 Hz, el dispositivo móvil detecta niveles sonoros. Estos errores ponen en evidencia que el dispositivo móvil está modificando la respuesta de audio del equipo, en función de la señal entrante, aplicando técnicas de procesado digital. En este caso, aunque el micrófono pierde sensibilidad a las bajas frecuencias, aparece señal a la salida del sistema cuando la señal supera el umbral de ruido interno.

Un dato importante para valorar la calidad de un equipo de medida es el límite inferior de medida. Para obtener este dato, se pone el equipo de medida tipo 1 y el dispositivo móvil en el interior de una sala sorda, con un nivel sonoro muy bajo y se hace una medición. Los resultados muestran que el sonómetro mide un nivel de 17,3 dBA, que es el límite de capacidad de medida del equipo, es decir, el nivel sonoro es realmente inferior a este valor. La *app* muestra un valor de 26,1 dBA, un valor notablemente mayor al real. La figura 11.8 muestra el espectro obtenido por ambos dispositivos. El resultado mostrado por la *app* se aleja de la realidad. Nótese que las *app* gestionan mediante procesado digital, los resultados obtenidos y tratan de sustituir con técnicas digitales la falta de calidad del micrófono. En este caso, el ruido de fondo del sistema del *smartphone* no se puede «ocultar» y queda patente esta deficiencia.



**Figura 11.8.** Comparación de espectros en frecuencia, obtenidos en un entorno muy silencioso por un equipo tipo 1 y una app.

La figura 11.9 muestra la linealidad de nivel del conjunto aplicación seleccionada y dispositivo móvil. Por la parte superior, se observa una pérdida de linealidad, aunque en este caso es la electrónica del dispositivo la que establece un límite máximo mediante una compresión a partir de los 90 dBA, aproximadamente, para evitar la saturación del sistema de audio. Este control electrónico no es accesible por el usuario.



**Figura 11.9.** Linealidad de la medida del nivel sonoro de una app con un dispositivo móvil respecto de un sonómetro tipo 1.

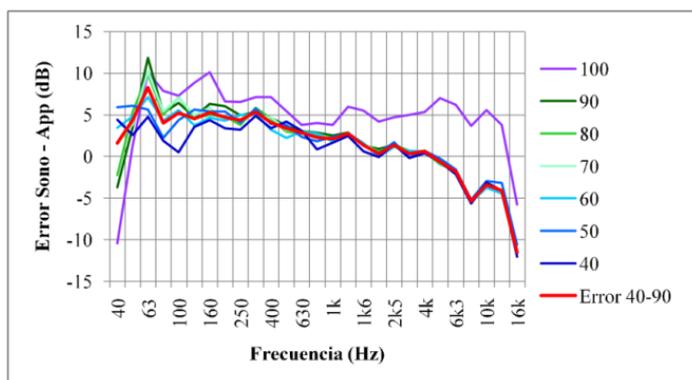
La tabla 11.1 resume los niveles sonoros medidos en las siete pruebas realizadas anteriormente más la del límite inferior de medida. Se puede observar que el margen de medida se situaría entre 40 dBA y 90 dBA; se podría considerar que la linealidad obtenida es correcta, tratándose de una aplicación no sometida a metrología legal. Los niveles sonoros inferiores a los 40 dBA o superiores a los 90 dBA producen errores notables en los resultados reflejados por la *app*.

**Tabla. 11.1.** Niveles sonoros medidos en las ocho pruebas

| Sonómetro | App  |
|-----------|------|
| 17,3      | 26,1 |
| 40,1      | 40,4 |
| 50,1      | 50,1 |
| 60,1      | 60,1 |
| 70,0      | 69,9 |
| 79,9      | 79,8 |
| 89,6      | 89,5 |
| 99,0      | 93,6 |

Es obvio que la precisión del resultado no depende de la *app* en sí, sino del procesado del dispositivo y, muy especialmente, del micrófono que equipa a este. Las mejoras que se van produciendo de la tecnología MEMS hacen prever que es probable que dispositivos móviles más avanzados puedan ofrecer en un futuro cercano prestaciones superiores, aunque hay que tener presente que un dispositivo móvil no es un sonómetro.

La figura 11.10 muestra el error cometido por la *app* respecto a los valores obtenidos por el equipo de medida tipo 1. Se observa como la *app* introduce un error muy elevado para un nivel de 100 dBA (curva color lila). Por otro lado, la *app* infravalora las bajas frecuencias y realza las altas frecuencias, creando un desequilibrio que llega a los  $\pm 5$  dB en algunas bandas.



**Figura 11.10.** Error cometido por la app respecto el equipo de medida tipo 1. La gráfica de color rojo muestra el error promedio descartando la prueba para nivel sonoro de 100 dBA (color lila).

### 11.3.3. Uso con señales reales de una aplicación para dispositivo móvil

Una vez caracterizadas las prestaciones del dispositivo móvil, es posible valorar los resultados que se obtendrían midiendo señales de distintos ambientes sonoros. Para esta segunda serie de pruebas se utilizan tres escenarios distintos en entornos urbanos. El primero corresponde al ambiente sonoro en una plaza pequeña abierta, con un parque infantil, que está rodeada de vías de circulación. El segundo escenario corresponde a una plazuela semiabierta con dos calles adyacentes con tráfico muy moderado. El tercer caso es de unas terrazas en una calle ancha (16 m) con poca gente y en día festivo, con una circulación de vehículos muy moderada. Los niveles medidos por el sonómetro y la aplicación se resumen en la tabla 11.2. Se observan unas variaciones mayores que las obtenidas con señales estacionarias de ruido rosa. Esto se debe a que el espectro que llega al micrófono se aleja bastante del ruido rosa, hay más variabilidad y la corrección electrónica y el procesado «pinchan». Los resultados mostrados en la tabla 11.2 se consideran por ello más cercanos a la realidad que las pruebas controladas con ruido rosa, donde el procesado de señal es más previsible.

**Tabla 11.2.** Niveles sonoros medidos por el sonómetro y la aplicación seleccionada en tres escenarios urbanos distintos

| Leq dBA   | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Sonómetro | 50,6        | 60,1        | 52,7        |
| App       | 49,4        | 59,2        | 51,6        |

En conclusión, se puede afirmar que el *smartphone* se puede usar para medir el nivel sonoro con una exactitud aceptable entre 40 dBA y 90 dBA. Sin embargo, es muy importante que la aplicación se calibre de forma precisa y fiable antes de ser utilizada utilizando equipos electrónicos, entornos acústicamente neutros y procedimientos adecuados de ingeniería que no están disponibles para el público en general.

Disponer de un calibrador específico para dispositivos móviles sería de gran utilidad y permitiría obtener datos más fiables. Debe tenerse cuidado con el uso de aplicaciones que quedan siempre en segundo plano, introduciendo procesos no controlados por el operador y que pueden alterar tanto la respuesta y la linealidad en frecuencia como en amplitud. Por ejemplo, cuando se graban sonidos con un dispositivo móvil, la mayoría de sistemas disponen de un control automático del nivel de grabación que puede desactivarse por el usuario. Este control altera totalmente el margen dinámico del sonido y los valores reales de nivel sonoro, sin que el usuario sea consciente de ello.

Al margen del error de la medición del nivel sonoro, la ubicación del equipo es fundamental a la hora de captar con fidelidad el ambiente sonoro. Acercarse excesivamente a una fuente sonora altera el nivel acústico que puede haber en un paisaje sonoro y,

aunque se escuchen en parte otras fuentes, estos valores no quedan reflejados. Si durante el registro hay un evento sonoro no deseado, el resultado puede quedar alterado por esta circunstancia. El mismo usuario puede tapar parcialmente el micrófono activo sin darse cuenta. Recordemos que los *smartphones* actuales disponen de dos o tres micrófonos.

Los errores involuntarios a la hora de realizar una medición pueden ser devastadores para obtener unos resultados mínimamente fiables. Un error bastante común es hablar en voz baja mientras se realiza una medición acústica de nivel sonoro, pensando que eso «no afecta». Otro error bastante frecuente es mover el móvil o sujetarlo con una mano llevando ropa de abrigo que frota sobre la superficie del dispositivo, generando ruido que capta el micrófono, pero que no escucha el usuario. Por último, el estado físico del dispositivo puede afectar al micrófono. Las personas neófitas en acústica no son conscientes de que cualquier sonido cercano al dispositivo, aunque sea de «baja intensidad», puede alterar el resultado de la medición.

Los resultados de las mediciones de ambientes sonoros efectuadas con dispositivos móviles deben ser considerados como una aproximación simplista al valor real y nunca deben tomarse como valores exactos. El uso generalizado de estas aplicaciones tiene la parte positiva de concienciar a las personas sobre la contaminación acústica, animando a participar con aportaciones que pueden ser consultadas y compartidas a través de la red. Sin embargo, el uso masivo entre la población puede hacer creer a los usuarios que los resultados que se pueden consultar en internet son exactos, cuando estos pueden estar muy lejos de la realidad, generando confusión y falsas expectativas. Sería aconsejable encontrar un equilibrio entre ambos extremos.

#### **11.3.4. Uso de micrófonos externos para dispositivo móvil**

Los resultados mostrados anteriormente se han obtenido con el micrófono interno del dispositivo móvil. No obstante, existe la posibilidad de mejorar el micrófono interno incorporando un micrófono externo de calidad que permita obtener unos resultados más precisos y fiables. Hay básicamente dos tipos de micrófonos que podemos utilizar. Por un lado, un micrófono estéreo compatible con el registro monoaural, que permitiría escuchar los registros en estéreo y, además, obtener niveles y espectros sonoros, pero sin la capacidad de verificar/calibrar los registros con un calibrador tipo 1. Por otro lado, se puede utilizar un micrófono monoaural de precisión tipo 1, que permite obtener resultados calibrados de tipo 1, pero no permite obtener registros estéreo para escuchar posteriormente.

##### ***11.3.4.1. Micrófono externo estéreo de calidad***

Para el primer caso, lo más aconsejable y versátil es usar un micrófono Mid-Side. Es la única configuración que garantiza la compatibilidad total con un registro mono, que

puede servir para obtener valores objetivos de nivel y espectro sonoro. Los micrófonos exteriores de más calidad en el mercado actualmente solo pueden funcionar con sistema iOS, ya sea dispositivo móvil o tableta. La figura 11.11 muestra un ejemplo de este tipo de micrófono.



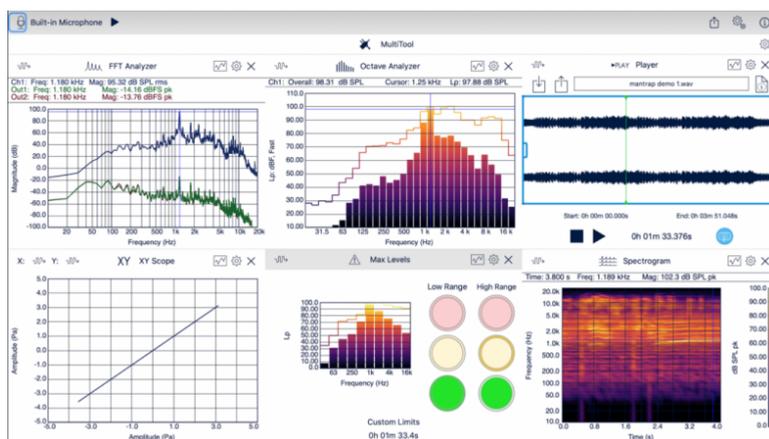
**Figura 11.11.** Izquierda: micrófono estéreo Mid-Side, para la grabación de sonido de calidad. Derecha: ejemplo de uso con aplicación en un dispositivo móvil iOS.

Con la configuración Mid-Side, el micrófono cardiode queda «orientado» hacia la fuente, que sería el canal monoaural para obtener resultados numéricos, y la señal resultante de la composición con el micrófono en forma de ocho sirve para la escucha en estéreo del sonido. El inconveniente de este tipo de micrófonos es que no se pueden calibrar usando un calibrador tipo 1. No obstante, se puede llegar a calibrar el sistema, por comparación con un equipo de medida tipo 1 en un mismo punto y con una señal sonora suficientemente estable.

Por otro lado, el micrófono cardiode tiene un patrón de recepción distinto al omnidireccional, que, si bien en algunos es probable que no influya, va a alterar los niveles sonoros, ya que las fuentes sonoras situadas en la parte posterior del cardiode son atenuadas notablemente.

Por este motivo, este micrófono Mid-Side, o los micrófonos usados en grabación de sonido, no ofrecen resultados equiparables a un micrófono de precisión tipo 1, como los que llevan los equipos de medida. Los resultados obtenidos cubren el propósito de la medida y evaluación del nivel sonoro en general y siempre que el micrófono esté orientado hacia las fuentes principales. Para el análisis de las mediciones o registros efectuados, existen diversas aplicaciones que se pueden utilizar.

La figura 11.12 muestra un ejemplo de aplicación avanzada para la medida y el análisis del sonido sobre dispositivo móvil o tableta, si bien la tableta es más cómoda para manejar diferentes ventanas de forma simultánea al tener una pantalla mayor.



**Figura 11.12.** Ejemplo de una aplicación multitarea que permite grabar, visualizar y analizar de forma simultánea una señal sonora utilizando un dispositivo móvil o tableta y un micrófono de calidad.

### 11.3.4.2. Micrófono externo de precisión

Cuando no se desea el registro estéreo, pero sí una total precisión de los niveles sonoros, se requiere de un micrófono de precisión de tipo 1 para realizar las mediciones. En el mercado podemos encontrar este tipo de micrófono que, según el fabricante, cumple las especificaciones de tipo 1 y que se puede conectar a un dispositivo móvil o tableta mediante USB-C o Lightning. Las dimensiones de la cápsula (1/2") permiten acoplar directamente un calibrador acústico de precisión para verificar/calibrar los resultados de la aplicación. La figura 11.13 muestra un micrófono comercial que cumple estas características.



**Figura 11.13.** Micrófono de precisión tipo 1 para conectar a dispositivos móviles o tabletas compatibles con Android (USB-C) o iOS (Lightning).

Este micrófono cumple los estándares de clase 1 según la norma IEC 61672. Con un límite inferior de medida de 18 dBA y un nivel sonoro máximo de 125 dBA, permite efectuar mediciones acústicas a partir de 24 dBA, lo que iguala a los micrófonos de tipo

1 que equipan algunos sonómetros tipo 1 del mercado. El límite máximo de 125 dBA puede ser un inconveniente en mediciones exteriores, ya sea en la industria o en eventos musicales. La calibración del micrófono, que se hace mediante un calibrador acústico de precisión, queda almacenada en el interior del micrófono en una memoria no volátil, lo que permite usarlo en cualquier dispositivo móvil sin necesidad de repetir la calibración. Al conectar el micrófono al dispositivo móvil, este ajusta automáticamente su sensibilidad de entrada, a través del conector Lightning o USB-C, con los datos del micrófono, asegurando siempre unas mediciones calibradas.

Mediante el uso de una aplicación para dispositivo móvil o tableta, se puede tener un equipo de medida completo que cumple las especificaciones de tipo 1, con algunas limitaciones, pero con una mayor versatilidad, mejor usabilidad, mayor facilidad de uso y menor coste. Hacer una grabación estéreo con este tipo de micrófono no es posible, ya que se precisaría de una *interface* específica no disponible en este momento.

#### **11.4. Evolución de los sistemas de medida de sonido portátiles**

Los llamados sonómetros de tipo 1 o clase 1 que podemos encontrar en el mercado ofrecen unas prestaciones y una elevada precisión y fiabilidad de funcionamiento, aspecto que redundaría en la obtención de resultados muy precisos de los niveles sonoros medidos. Sin embargo, los equipos no funcionan solos y deben ser controlados por profesionales con sólidos conocimientos en acústica para evitar situaciones como las que se producen frecuentemente, con mediciones acústicas que no son correctas y con dictámenes erróneos. Hay dos puntos que se deben tener en cuenta.

Por un lado, el elevado intrusismo profesional en el sector de la acústica no es un problema actual, lleva décadas produciéndose. Es difícil no encontrar a alguien que no sepa de acústica; todo el mundo opina, hace sugerencias, incluso hace mediciones sin tener unos conocimientos avalados por unos estudios universitarios, que es la única institución que capacita profesionalmente para ejercer en un área de conocimiento, en este caso la acústica.

Por otro lado, la creciente sofisticación y facilidad de uso de los equipos de medida del sonido ha agravado esta situación, donde el neófito piensa que puede coger el equipo como si de una cinta métrica se tratara, sin importar el entorno donde se hace la medida ni la procedencia de los sonidos que se producen durante la medición. Intrusismo en el sector de la acústica siempre ha habido, si bien unas décadas atrás había mucho menos. Cuando los equipos de medida eran analógicos y no tenían memoria, hacer una medición acústica era bastante más complicado. Estos equipos solo medían valores instantáneos. Ni siquiera podían medir el nivel equivalente y, por supuesto, era impensable obtener el espectro en frecuencia. Eran los tiempos heroicos de la acústica, cuando el profesional

tenía que interpretar los resultados del indicador de aguja según su grado de experiencia y los conocimientos adquiridos, y muchas veces suplir las carencias y limitaciones tecnológicas con la imaginación y el ingenio.

Los equipos actuales prácticamente funcionan solos, no hay que realizar ningún ajuste ni interpretar resultados, el equipo registra toda la información acústica, pero no registra cómo se hace la medición y, por muy sofisticado que sea el equipo de medida, tampoco este sabe lo que queremos medir. Con solo unos clics se hace el informe de resultados a todo color. Una mala praxis y las consecuencias de la ignorancia en acústica son difíciles de detectar para el neófito, pero resultan muy evidentes para el profesional experimentado.

Medir en un baño (donde suele haber más nivel sonoro) diciendo que era el dormitorio, medir con la ventana entreabierta para que el nivel de inmisión sea más elevado o no tener en cuenta el nivel del ruido de fondo en la valoración de inmisión acústica, son situaciones que lamentablemente se producen con demasiada frecuencia y con las que hay que acabar, por el bien de la sociedad. Se han probado diversas iniciativas para solucionar esta circunstancia, que no han dado los resultados esperados. Sigue habiendo un intrusismo creciente en el sector y aparecen informes, algunos amparados por acreditaciones, con mediciones incorrectas o evaluaciones deficientes, que lejos de solucionar los problemas, los eternizan. El intrusismo y el desconocimiento son las principales causas de que los problemas originados por la contaminación acústica no se solucionen, sino que se eternicen. Las personas que sufren las consecuencias de la contaminación acústica son en muchas ocasiones ninguneadas entre informes y contrainformes que no llevan a ninguna parte y que, en ocasiones, dividen a los profesionales del sector.

La tecnología tiende a integrar sistemas más que a dividir. Los dispositivos multifunción, como el teléfono móvil inteligente (*smartphone*) o las tabletas digitales, son un ejemplo de ello y ofrecen muchas posibilidades, ya que unen un procesado cada vez más potente con unas prestaciones gráficas impresionantes en un reducido espacio. Con el perfeccionamiento de los micrófonos de precisión para dispositivos móviles, estos podrán ofrecer prestaciones iguales o superiores a los actuales sonómetros. Estos dispositivos igualarán en prestaciones a la precisión, sensibilidad y fiabilidad de los equipos de medida actuales. Pero superarán a estos en calidad y cantidad de información gracias a sus pantallas de alta resolución, una mejor «usabilidad» con total conectividad a la red y a la incorporación de una serie de elementos que impedirán el intrusismo que padece actualmente el sector, al menos en el uso de los equipos de medida portátiles.

Los nuevos equipos de medida estarán basados en los dispositivos portátiles que conocemos actualmente, el *smartphone* y la tableta, con aplicaciones específicas, con conectividad total, gran pantalla gráfica 4 K totalmente configurable por el usuario, control sin cables, acceso a internet, diversos sensores externos como el micrófono de precisión

y una cámara 360. Con estos elementos, además del sistema GPS, los acelerómetros internos, los micrófonos internos del equipo, los sensores de temperatura y humedad, el profesional dispondrá por un lado de toda la información que le permita realizar una medición óptima, y por otro permitirá detectar las mediciones fraudulentas o incorrectas, aspecto que supondrá un gran avance en la lucha contra el fraude y el intrusismo profesional. El uso de los micrófonos LN permitirá acabar con las discusiones redundantes que se producen cuando el nivel sonoro está por debajo de los 30 dBA.

La cámara 360 permitirá hacer una toma en *slow-video* de todo el entorno del equipo de medida, para ver exactamente dónde estaba y qué acontece a su alrededor durante la medición. Los acelerómetros permitirán valorar si el equipo se mueve o está estático, y los sistemas de posicionamiento indicarán dónde se encuentra realmente el equipo. Las mediciones acústicas se podrán hacer con diversos micrófonos simultáneamente, conectados de forma inalámbrica, lo que permitirá detectar con facilidad puntos acústicos «conflictivos» y corregir su posición, un aspecto que será muy apreciado por los profesionales. Además, las mediciones multicanal permitirán correlacionar datos de inmisión y emisión sonora, facilitando la identificación de fuentes sonoras ajenas a la actividad controlada. Todas estas funciones que se pueden implementar con la tecnología actual servirán para conocer cómo se han obtenido los resultados de un equipo de medida y en qué condiciones, compartiendo estos en la nube para garantizar la máxima transparencia. El uso de la codificación de cadenas de datos, como el Blockchain, garantizan su procedencia, veracidad e inviolabilidad. La red 5G podría permitir, además, realizar mediciones de precisión en tiempo real por un experto sin estar este presente en el lugar concreto, solucionando los problemas y las situaciones particulares de forma eficiente y al instante.

Se espera que con estos avances tecnológicos se pueda atender a las demandas de la sociedad, que precisa de soluciones reales a los problemas de contaminación acústica que llevan décadas sufriendo y que en demasiadas ocasiones se eternizan hasta límites inasumibles. Por otro lado, el sector de la acústica se beneficiaría de la reducción del intrusismo profesional, aflorando más trabajos que ahora quedan desatendidos y consiguiendo un mayor número de casos resueltos satisfactoriamente, lo cual mejoraría de forma extraordinaria la pobre imagen que el sector transmite actualmente a la sociedad. Por último, el concepto (un poco arcaico) que conocemos de «equipo de medida» dará paso a una tecnología más transversal, totalmente interconectada, configurable 100% por el usuario y que ofrecerá todas las garantías de precisión y calidad en las mediciones, permitiendo al ingeniero disponer de una herramienta potente que facilitará el trabajo.

# Capítulo 12.

## El sonido de las ciudades inteligentes

### 12.1. Introducción

Las llamadas «ciudades inteligentes» o *smart cities* son tendencia desde hace varios años, y sus perspectivas de crecimiento siguen siendo enormes. Un total de 240 ciudades de los 28 países de la Unión Europea tienen el calificativo de *smart city* basado en sus actividades. Desde que grandes empresas tecnológicas como Cisco o IBM registraron la expresión *smart city* en noviembre de 2011, el foco principal de las acciones que se llevan a cabo actualmente en las ciudades inteligentes ha evolucionado. En los inicios de las *smart* la ventaja favorecía a las empresas tecnológicas líderes en ese momento, donde el término *smart* giraba en torno al concepto de la ciudad conectada digitalmente. Desde entonces, los dirigentes de las ciudades han visto en el concepto *smart* una oportunidad para acercarse a la ciudadanía, prometiendo una mejora de su calidad de vida a través de la aplicación de la tecnología digital.

El concepto de ciudad inteligente se suele aplicar para promover la idea de que la implantación masiva de la tecnología es la solución a los desafíos de sostenibilidad que generan graves problemas a las grandes ciudades a nivel global. Se pretende que con la aplicación de la tecnología se dé respuesta a la masificación, la calidad de vida, la contaminación ambiental, etc. Estos nuevos enfoques precisan de una comprensión más holística de cómo la tecnología puede dar forma a los cambios sociales y poner a las personas en el centro del proceso de planificación.

El concepto de *ciudad inteligente* establece tres principios básicos que se deben respetar. En primer lugar, cambios en la organización administrativa de los Ayuntamientos basada más en el conocimiento de los profesionales de las distintas áreas en lugar de políticos o gestores carentes de dichos conocimientos. En segundo lugar, garantizar la soberanía, evitar la privatización de los activos de la ciudad y preservar el dominio de los datos, aplicaciones, *smartphone*, etc. Y, por último, garantizar una ciudad inclusiva que proporcione un lugar a cada ciudadano, sin fractura social o digital, que permita pasar del

diseño de proyectos orientados al usuario a los proyectos orientados hacia el ciudadano. En este último apartado se especifica claramente que «la palabra del ciudadano debe, por ejemplo, prevalecer en las decisiones que le afectan...» (Beloc L., 2017).

Sin embargo, tras esas declaraciones de buenas intenciones sobre la mejora de la calidad de vida que traerán las ciudades inteligentes, la sensación percibida por el ciudadano «de a pie» parece que es muy distinta. En ocasiones, se observa que se asocia el término *inteligente* a costosas inversiones con un dudoso beneficio para el ciudadano, pero con una gran notoriedad para quien toma la decisión. Obviamente, se han hecho algunos progresos, pero no hay duda de que, cuando se habla de ciudades inteligentes, existe una gran brecha entre el relato oficial y las percepciones de los habitantes. Un claro ejemplo lo podemos encontrar con un estudio realizado en Francia por Chronos y ObSoCo publicado en noviembre de 2017 que concluye, sorprendentemente, que los ciudadanos no desean vivir en una ciudad inteligente.

La figura 12.1 muestra un resumen de los resultados de este estudio, basado en una encuesta *online* realizada en julio de 2017 a 4.000 franceses, 1.000 alemanes, 1.000 italianos y 1.000 británicos (OsBoCo, 2017) y en la que estos manifiestan el concepto de ciudad donde realmente les gustaría vivir. El concepto de *ciudad conectada*, asociado a la *ciudad inteligente*, figura en sexta posición, por detrás de conceptos como *naturaleza* o *autosuficiencia*.



**Figura 12.1.** Encuesta «¿Hasta qué punto le gustaría vivir en una ciudad inteligente?» publicada por Chronos y ObSoCo en 2017.

Como se muestra en la figura 12.2, el resultado más destacable de esta encuesta es que el ciudadano prefiere vivir en un entorno natural (7,7) en lugar del aspecto que supuso el inicio del concepto inteligente de *ciudad conectada* (5,0). El rechazo al concepto de ciudad inteligente y su deseo de vivir «fuera de» tiene su punto álgido (56%) entre los ciudadanos de las grandes aglomeraciones.



**Figura 12.2.** Resultados de la encuesta  
(Chronos y ObSoCo, 2017).

Estos resultados no significan que los habitantes no deseen que sus ciudades sean verdes, que la Administración sea eficiente, que la economía local prospere, etc. La expresión *ciudad inteligente* no refleja la visión del ciudadano para un futuro urbano habitable. Esto puede suponer una dificultad añadida, que deberá tenerse en cuenta para construir una ciudad donde todos deseen vivir.

### 12.1.1. Soluciones acústicas inteligentes

Los deseos y las necesidades del ciudadano a menudo se pasan por alto cuando se trata de incorporar, utilizar y disfrutar de nuevas tecnologías aplicadas a la ciudad inteligente. Esto es especialmente cierto en las tecnologías relacionadas con la acústica, que permiten abordar el tema recurrente de la contaminación acústica y la falta de calidad sonora en las ciudades europeas.

Desde el punto de vista acústico, las propuestas en el ámbito de las *smart cities* se centran esencialmente en las redes de micrófonos distribuidos por diferentes puntos de una ciudad que permiten monitorizar en tiempo real los niveles sonoros en cada punto. Estos datos, debidamente tratados y con un número de puntos de muestreo suficiente, podrían utilizarse, entre otras cosas, para confeccionar un mapa de ruido dinámico. La incorporación de las tecnologías de información y comunicación TIC permite nuevos retos, y el tratamiento masivo de datos y las redes de micrófonos con el soporte de IoT ofrecen posibilidades realmente interesantes para los ingenieros, responsables o gestores del área de medioambiente de las Administraciones, fabricantes, etc.

Dejando a un lado que con una red de micrófonos distribuida por una población se podría obtener información mucho más útil que el nivel  $L_{Aeq}$  o el espectro en frecuencia con elevadas integraciones temporales, hay muchas otras cuestiones en el ámbito

«acústico» que los habitantes de una población perciben como problemas no resueltos, algunos de los cuales llevan enquistados durante décadas, sin solución efectiva por parte de las autoridades. La expresión *smart* nunca se debería utilizar como un *hat trick* que soluciona los problemas por arte de magia. La tecnología permite hacer muchas cosas, pero la resolución de los problemas acústicos requiere la intervención de profesionales debidamente cualificados que analicen y dictaminen qué hay que hacer y cómo hacerlo.

Los problemas acústicos percibidos por los habitantes de una población afectan a su calidad de vida y se pueden dividir en dos grandes bloques. El primero afecta a los niveles de ruido ambiental a que está sometida la población, ya sea en la calle, en lugares públicos o en el interior de su vivienda. El segundo, relacionado con el primero, son las condiciones acústicas de la construcción, ya sea pública o privada, que garanticen un cierto grado de intimidad sonora respecto de otras personas, desconocidas o no, cercanas.

A nivel normativo, la Directiva Europea sobre ruido ambiental 2002/49/EC se publicó en 2002 con el fin de establecer un enfoque común entre los Estados miembros de la Unión Europea, basada en mediciones cuantitativas con tres bloques: indicadores de ruido, mapas de ruido y planes de acción.

El lenguaje tradicional usado para describir la contaminación acústica utiliza exclusivamente el término *ruido*, independientemente del nivel sonoro. Si bien es correcto emplear este término cuando estamos en una calle transitada con un nivel sonoro elevado, no lo es cuando nos encontramos dentro de un dormitorio con un nivel sonoro apenas perceptible. Hay matices que se podrían incluir en el lenguaje, cambiando por acepciones más cercanas a la realidad percibida por las personas. Aunque se escuche un sonido dentro del dormitorio, y lo llamamos ruido, el ambiente es silencioso. En este sentido, deberían usarse expresiones que definan las sensaciones percibidas por las personas que lo escuchan. Por ejemplo, por un lado: silencio, tranquilidad, sosiego, calma, etc., para referirse a los ambientes sonoros con niveles bajos o moderados; por otro lado: ruido, escándalo, bullicio, estruendo, etc., para niveles sonoros más elevados.

### **12.1.2. Ruido de vehículos en las ciudades inteligentes**

Respecto al ruido de los vehículos, realmente hay poco margen de maniobra. Como es bien sabido por los especialistas, la solución más efectiva para reducir el nivel sonoro es actuar siempre sobre la fuente de ruido, en este caso, los vehículos. No obstante, es la Unión Europea quien tiene todas las competencias en materia de emisiones de ruido, lo que no permite establecer nuevos requisitos a dichas fuentes que sean «adecuados» a las necesidades de nuestras poblaciones. La solución está, pues, en actuar sobre otros elementos y no sobre la fuente.

El uso de asfalto poroso reduce en promedio el nivel sonoro unos 4 dBA, aunque la sensación sonora es apreciablemente superior. La absorción acústica de estos asfaltos se centra sobre los 1,2 kHz. En esta banda de frecuencias es donde el ruido de los neumáticos presenta mayor nivel sonoro. Como es sabido, la sensibilidad auditiva tiene su máximo en la zona entre los 1 kHz y los 2 kHz, por lo que el asfalto poroso produce unas sensaciones de reducción sonora apreciables. Esta coincidencia en las bandas de frecuencia ha sido una casualidad no buscada y que beneficia a los resultados obtenidos. El asfalto poroso reduce los niveles sonoros en estas bandas principalmente. El sonido resultante no tiene estas componentes de media frecuencia, donde el oído humano es más sensible, lo que se traduce en que el nivel sonoro parece que se ha reducido apreciablemente más de 4 dBA. Esta reducción de sonoridad se aprecia más en los tramos alejados de las intersecciones, donde los vehículos van a cierta velocidad y el ruido de neumático es más notable.

Este tipo de asfalto, además de reducir el nivel sonoro, mejora las condiciones de conducción y de seguridad. Su porosidad permite que el agua no se quede en la superficie, evacuando por los poros hacia los laterales y dejando el asfalto más «seco», y con visión clara de las líneas e indicaciones pintadas sobre el asfalto y sin reflejos, especialmente molestos en circulación nocturna. Por otro lado, los neumáticos de los vehículos no «levantan» tanta agua como en un asfalto convencional.

#### ***12.1.2.1. Vehículos con motor de combustión interna (MCI)***

Los vehículos automóviles tienen multitud de fuentes de ruido. Las principales son: el motor (incluyendo escape y admisión), los neumáticos, el ruido aerodinámico y la transmisión. La fuente de ruido dominante depende de la velocidad del vehículo y de su funcionamiento. Con una circulación respetuosa, evitando aceleraciones y frenadas excesivas, para velocidades inferiores a los 30 km/h aproximadamente, domina el grupo motor, mientras que para velocidades superiores domina el ruido de neumático y por encima de los 90 km/h empieza a dominar el ruido aerodinámico, aunque esto depende mucho del diseño del vehículo.

La circulación urbana tiene restringida la velocidad máxima de los vehículos, estableciendo en general los límites de 30 y 50 km/h para las vías urbanas y 80 km/h para las vías de circunvalación. La situación más frecuente en entornos urbanos es la arrancada de los vehículos cuando están parados en un semáforo. En este proceso, el ruido del grupo motriz destaca notablemente, radiando energía de baja frecuencia que no puede ser absorbida por los objetos y elementos más cercanos. En las vías más rápidas (80 km/h), o cuando la circulación es fluida a partir de los 20 km/h, domina el ruido de neumático. El aumento de las potencias de los vehículos en los últimos años ha hecho que la sección de los neumáticos se incremente apreciablemente, para poder transmitir esa potencia a la calzada y controlar el vehículo, generando más ruido.

Los componentes de baja frecuencia radiados por el MCI están relacionados con el tipo de motor y su régimen de giro. El nivel de ruido no depende del combustible, es decir, el gas no es más silencioso que la gasolina, por ejemplo, aunque puede haber ligeras diferencias entre el sonido de un diesel y uno de gasolina. En los propulsores de 4 cilindros y 4 tiempos, que son los más usuales en el parque automovilístico, domina el segundo orden motor. El margen de frecuencias radiado en ciudad en general va desde los 30 Hz al ralentí hasta los 100 Hz, aproximadamente (este último corresponde a las 3.000 rpm). Esta energía de baja frecuencia es la que entra con facilidad a través de las ventanas de los domicilios que dan a la calle, tengan o no doble cristal, generando molestias en la vida cotidiana. Un cierre hermético de las ventanas, inclusive la persiana, mejora el aislamiento acústico. A pie de calle, los componentes de baja frecuencia dificultan la comunicación verbal, entre otros efectos.

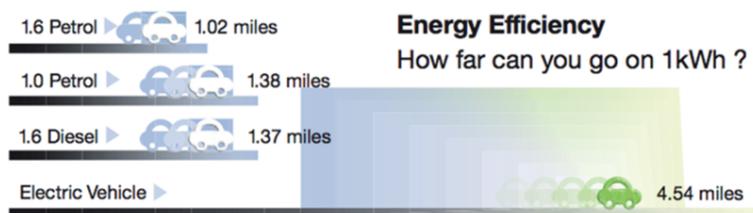
#### ***12.1.2.2. Vehículos con propulsor eléctrico (ME)***

La incorporación de los vehículos con propulsión eléctrica en la circulación urbana abre las esperanzas a que el ruido ambiental que se ha mantenido casi constante durante las dos últimas décadas en Europa, por fin, se reduzca. Cabe recordar que los niveles máximos de ruido permitidos por los vehículos automóviles en la Unión Europea se definieron en la Directiva 96/20/CE, que ha permanecido inalterada en 74 dBA para los vehículos automóviles desde el año 1995. El reglamento 540/2014 modifica la Directiva 2007/46/CE estableciendo unos nuevos límites máximos de ruido, que pasan de 74 dBA a 69 dBA, cambio previsto en tres fases que terminan en 2024. Los vehículos con propulsión eléctrica aportan muchas ventajas: menor ruido, cero emisiones (del vehículo), rendimiento superior, menor coste de mantenimiento, y, además, se consideran en general más respetuosos con el medioambiente. Distintos trabajos muestran que la reducción de ruido por debajo de los 50 km/h será apreciable. En todas estas informaciones, se muestran previsiones de acuerdo con valores globales de ruido  $L_{eq}$  en dBA, y en algunos casos con el  $L_{Amáx}$ .

El propulsor eléctrico ofrece una serie de ventajas interesantes: es totalmente silencioso, tiene un funcionamiento equilibrado y carente de vibraciones, un rendimiento superior al motor de combustión interna (MCI), un par motor muy superior a igualdad de potencia que un MCI, no emite gases y su mantenimiento es nulo. Mecánicamente, las ventajas son muy interesantes. Los vehículos con ME tienen una mecánica mucho más simple, aligerando el peso del vehículo. En todo caso, su elevado par motor permite evitar el uso de cajas de cambio tradicionales. La figura 12.3 muestra la eficiencia comparativa entre distintos vehículos (OLEV, 2013).

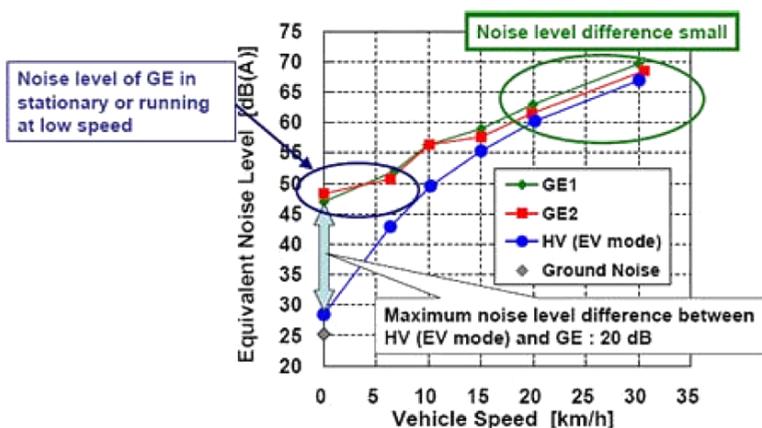
Pero no todo son ventajas; los inconvenientes del vehículo eléctrico son el almacenamiento de la energía eléctrica, la autonomía y la recarga. La llegada de las energías

limpias basadas en hidrógeno puede ser una solución. Desde el punto de vista acústico, la ausencia de vibraciones y de ruido lo hacen especialmente atractivo. Los vehículos eléctricos son muy silenciosos en circulación urbana y solo radian ruido los neumáticos. En general, los vehículos eléctricos tienen una sección de neumático similar a los vehículos equivalentes con MCI.



**Figura 12.3.** Eficiencia del ME frente a los MCI diesel o gasolina.

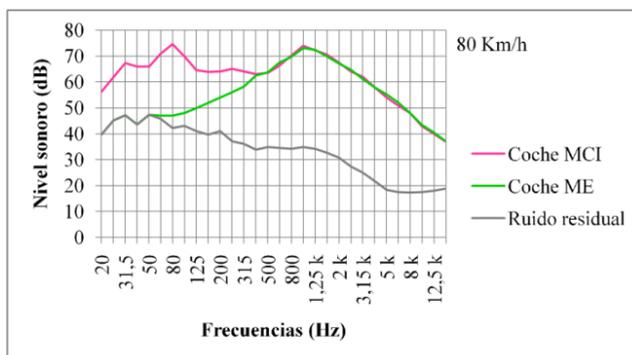
La figura 12.4 muestra el resultado de un estudio en el que se compara el ruido emitido por unos vehículos con MCI y un vehículo con ME para velocidades de 0 a 30 km/h. La mejora es de 10 dB a 5 km/h. Los vehículos eléctricos no emiten sonidos a bajas frecuencias, y esta es la principal diferencia respecto a los vehículos con MCI (Sandberg U., 2012) (Barti R., 2016).



**Figura 12.4.** Comparación entre el ruido emitido por vehículos con MCI y con ME.

A efectos prácticos, el sonido emitido por un vehículo eléctrico es el que haría un vehículo con MCI, pero con el motor parado y en punto muerto. Seguidamente, se muestran los resultados de un trabajo de investigación (Barti R., 2016) para predecir las

reducciones de nivel sonoro del ruido de tráfico por la incorporación del vehículo eléctrico. En primer lugar, en la figura 12.5 se muestran los resultados de las mediciones con vehículos MCI y ME a velocidad constante de 80 km/h.



**Figura 12.5.** Espectro sonoro de vehículos con MCI y con ME a 80 km/h.

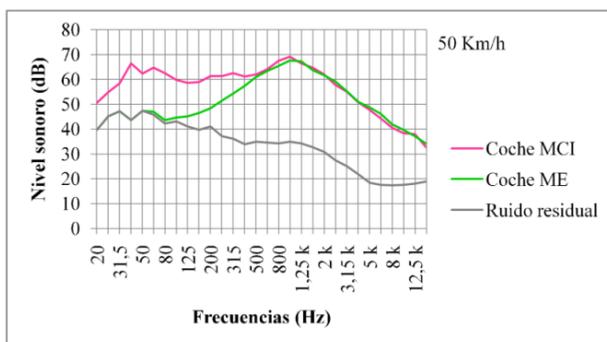
Como se puede observar, el pico sobre la banda de 1 kHz debido al ruido de los neumáticos es muy similar en las dos tecnologías de vehículos. Los vehículos con MCI presentan un segundo pico alrededor de los 80 Hz que corresponde a unas 2.400 rpm del motor y que los vehículos eléctricos no tienen.

Como era previsible, los niveles de ruido de ambas tecnologías, es muy similar, ya que la principal fuente de ruido procede de los neumáticos. Inicialmente, sorprende que las diferencias de contenido de baja frecuencia no incremente el valor de ruido global en los vehículos con MCI. Sin embargo, debe advertirse que la ponderación A no tiene en cuenta las bajas frecuencias. Los niveles equivalentes se resumen en la tabla 12.1.

**Tabla 12.1.** Niveles sonoros radiados por vehículos con MCI y con ME a una velocidad constante de 80 km/h

| VELOCIDAD CONSTANTE 80 Km/h |         |
|-----------------------------|---------|
| VEHÍCULO                    | Leq dBA |
| Coche MCI                   | 79,3    |
| Coche ME                    | 79,1    |
| Ruido residual              | 43,4    |

Seguidamente, en la figura 12.6 se muestran los resultados de las mediciones con vehículos MCI y ME a velocidad constante de 50 km/h.



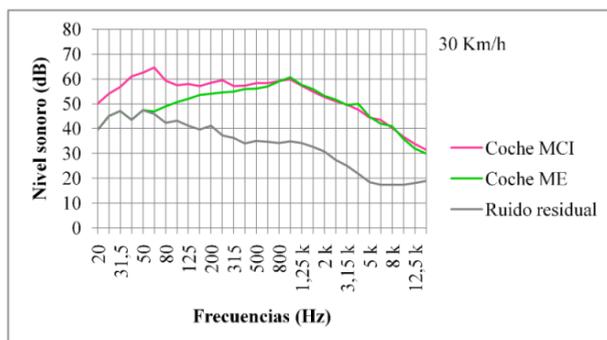
**Figura 12.6.** Espectro sonoro de vehículos con MCI y con ME a 50 km/h.

Como se puede observar, el pico sobre 1 kHz debido al ruido de los neumáticos es muy similar en las dos tecnologías de vehículos. Los resultados en esta ocasión tampoco arrojan diferencias entre las tecnologías MCI y ME en cuanto al nivel sonoro emitido. Los niveles equivalentes se resumen en la tabla 12.2.

**Tabla 12.2.** Niveles sonoros radiados por vehículos con MCI y con ME a una velocidad constante de 50 km/h

| VELOCIDAD CONSTANTE 50 Km/h |         |
|-----------------------------|---------|
| VEHÍCULO                    | Leq dBA |
| Coche MCI                   | 74,7    |
| Coche ME                    | 73,8    |
| Ruido residual              | 43,4    |

La figura 12.7 muestra los resultados de las mediciones con vehículos MCI y ME a velocidad constante de 30 km/h.



**Figura 12.7.** Espectro sonoro de vehículos con MCI y con ME a 30 km/h.

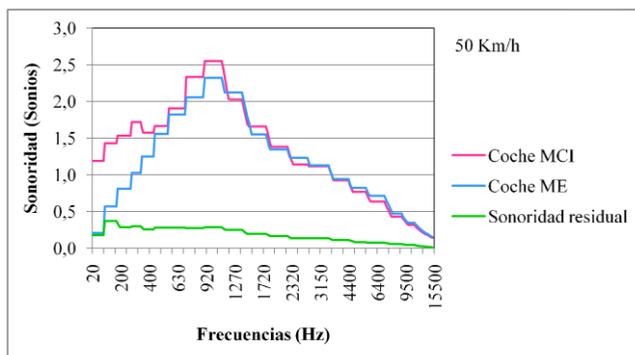
Como se puede observar, se mantiene el pico sobre la banda de 1 kHz debido al ruido de los neumáticos, que es muy similar en las dos tecnologías de vehículos. El nivel sonoro global de ambas tipologías de vehículos es prácticamente el mismo y, sin embargo, la sensación producida es bien distinta. Ocurre que el dBA pondera las bajas frecuencias en exceso, de manera que solo se reduce 0,3 dB. Los niveles equivalentes se resumen en la tabla 12.3.

**Tabla 12.3.** Niveles sonoros radiados por vehículo con MCI y con ME a una velocidad constante de 30 km/h

| VELOCIDAD CONSTANTE 30 Km/h |         |
|-----------------------------|---------|
| VEHÍCULO                    | Leq dBA |
| Coche MCI                   | 66,7    |
| Coche ME                    | 66,4    |
| Ruido residual              | 43,4    |

De los resultados obtenidos se desprende que las diferencias entre los niveles de ruido de los vehículos con MCI y con ME, circulando a velocidad constante, son prácticamente nulas. Estos resultados coinciden con otros estudios realizados. No obstante, la diferencia espectral es notable, por lo que, a la vista de estos resultados, se lleva a cabo un segundo análisis de sonoridad, con el objetivo de obtener más información que permita complementar la mostrada con los espectros de ruido.

A partir de los espectros de ruido de los distintos vehículos, se obtiene la sonoridad por bandas y global utilizando el método de Zwicker. Los cálculos de sonoridad para las velocidades de 80, 50 y 30 km/h no dan resultados significativos, es decir, se aprecia una ligera disminución de la sonoridad en el vehículo eléctrico para las tres velocidades. Con el fin de no repetir datos, en la figura 12.8 se muestra solo el resultado a 50 km/h.



**Figura 12.8.** Sonoridad del ruido de vehículos con MCI y ME a 50 km/h.

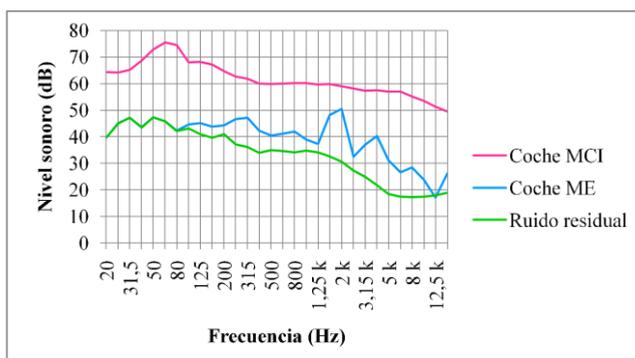
Se observa que los niveles de sonoridad son ligeramente inferiores en el propulsor eléctrico para las tres velocidades seleccionadas. Dicha reducción es debida a los bajos niveles de ruido en bajas frecuencias. Los niveles de sonoridad medidos se resumen en la tabla 12.4.

**Tabla 12.4.** Sonoridad obtenida para las tres velocidades de 30 a 80 km/h

| SONORIDAD VEHÍCULOS |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|
| VELOCIDAD (Km/h)    | 30    | 50    | 80    |
| Coche MCI           | 22,56 | 32,42 | 44,14 |
| Coche ME            | 19,80 | 28,67 | 39,55 |

Las pruebas a velocidad constante muestran que los niveles de ruido procedentes de los vehículos con MCI son muy similares a los procedentes de los vehículos con ME. En este sentido, no se aprecia una ventaja destacable en el uso de vehículos con propulsión eléctrica cuando estos se desplazan a velocidades entre 30 y 80 km/h. Nótese que el neumático es el elemento clave en los niveles de ruido en circulación urbana. Los vehículos con ME probados tienen unos neumáticos de dimensiones similares a los vehículos con MCI, por lo que su nivel sonoro será muy parecido, como demuestran los resultados.

Una característica común en la circulación en cualquier ciudad es la presencia de semáforos en los cruces de las calles. Esto obliga a los vehículos a pararse durante unos segundos para reemprender la marcha pasado el tiempo de regulación. La situación más frecuente en la circulación urbana es, sin duda, la de las paradas de los semáforos. La siguiente prueba trata de valorar el ruido generado por los vehículos con MCI y ME cuando arrancan desde parado.



**Figura 12.9.** Espectro del nivel sonoro de vehículos con MCI y con ME en arrancada desde parado.

Para conseguir una conducción eficiente, se debe consumir la menor energía posible. La aceleración muy rápida consume mucha energía y aplicarla en circulación urbana no tiene justificación, salvo emergencias. La pericia de cada conductor y su hábito en la conducción tiene su influencia en esta prueba, como se refleja en los resultados. Sobre el gráfico de los vehículos con MCI en la parte superior de la figura 12.9, se observa el pico de la arrancada desde parado que se sitúa entre los 50 y los 63 Hz para una motorización de 4 cilindros y 4 tiempos, y que se corresponde con un margen de 1.500 a 1.900 rpm, aproximadamente.

Nótese que el espectro refleja solo el ruido mecánico procedente del compartimento motor y de los sistemas anexos (inyección, embrague, transmisión, etc.), ya que la velocidad del vehículo inicialmente es cero, y al alejarse disminuye la contribución del ruido procedente de estos elementos. Los niveles sonoros globales para cada tipología de vehículo se resumen en la tabla 12.5.

**Tabla 12.5.** Niveles sonoros de vehículos con MCI y con ME cuando arrancan desde parado

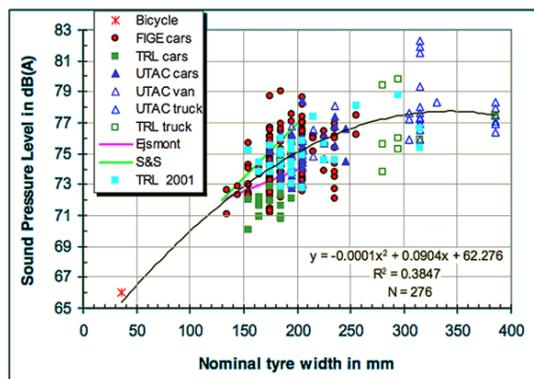
| <b>RUIDO VEHÍCULOS</b> | <b>Leq dBA</b> |
|------------------------|----------------|
| Arranque MCI           | 71,3           |
| Arranque ME            | 55,1           |

En esta ocasión, la diferencia de niveles sonoros es muy notable. Se observa como el espectro radiado por el vehículo con ME queda siempre bastante por debajo del vehículo con MCI. Esto se traduce en una reducción del nivel sonoro global superior a los 16 dBA. Esta reducción del nivel sonoro es muy apreciable para las personas cercanas, tanto en la calle como, especialmente, en las viviendas próximas.

Los resultados mostrados son de vehículos solos, lo que permite sacar conclusiones individuales. La circulación en ciudades implica un mayor número de vehículos que suman sus energías sonoras. Esto redundaría en que los espectros de ruido se suavizan y los niveles sonoros aumentan. El nivel sonoro que llega a un punto receptor depende de las fuentes de ruido que tenga más cercanas. Por muchos vehículos que circulen por las calles, los que contribuyen al nivel sonoro en un punto concreto serán los que estén dentro de un radio de acción. Las distintas calles de una ciudad suelen tener regulación con semáforos en los cruces. Mientras unos vehículos circulan por una calle a velocidades, digamos, constantes, los de la calle adyacente están parados. La proliferación de vehículos con la función *start-stop* activada permite observar cómo el nivel de ruido durante las pausas en las cercanías de los semáforos se va reduciendo, lo que se percibe como un «alivio» por los peatones cercanos.

Actualmente, no es posible conseguir que solo los vehículos eléctricos circulen por las calles de una ciudad, por lo que no se pueden realizar mediciones de comprobación de los niveles de ruido cuando todos los vehículos sean con propulsión eléctrica. Sin embargo, se puede hacer una aproximación partiendo de los niveles individuales de las distintas tipologías de vehículos y, mediante un modelo, establecer por cálculo las diferencias entre la circulación actual con mayoría de vehículos con MCI y con solo vehículos con ME. Esto permitiría saber hasta dónde se puede reducir el ruido ambiente en las ciudades. Los resultados arrojan unas diferencias de 2,5 dBA, en el caso de la velocidad limitada a 30 km/h. Para velocidades mayores, el nivel sonoro aumenta, pero, como los neumáticos son muy similares, el nivel de ruido se va igualando entre los vehículos con MCI y con ME (Barti R. , 2016).

Con los nuevos límites de velocidad en poblaciones de 30 km/h, la fuente de ruido principal en los vehículos con ME son los neumáticos. El dibujo, el compuesto utilizado y las dimensiones del neumático definen un perfil espectral específico. Se han llevado a cabo muchos trabajos de investigación con mediciones con distintos neumáticos y en distintas condiciones. En general, los neumáticos con buenas prestaciones mecánicas suelen ser los más ruidosos. Recientemente, los fabricantes están cambiando compuestos y dibujo para reducir los niveles de ruido emitido. La figura 12.10 muestra el nivel sonoro generado en función de la sección del neumático (Sandberg U., 2012).



**Figura 12.10.** Nivel global en dBA en función de la sección del neumático.

Con todo lo expuesto anteriormente, se llega a la conclusión de que, si bien la reducción de ruido del propulsor de los vehículos eléctricos es muy notable, permanece el ruido de los neumáticos como principal causa de contaminación acústica en la circulación urbana. Una de las mejoras más apreciables por los peatones será, sin duda, el nivel de ruido en los semáforos. Los vehículos eléctricos parados no hacen ningún ruido, por

lo que la sensación sonora será de auténtico confort. El inicio de marcha de los vehículos será igualmente silencioso, lo que será muy apreciado en las viviendas situadas en las cercanías. No obstante, los sistemas AVAS que deben llevar todos los vehículos eléctricos emitirán sonidos mientras circulan a velocidades inferiores a los 20 km/h, lo que puede diluir la mejora en el confort acústico que se podría conseguir.

El diseño del vehículo eléctrico debería orientarse más hacia el transporte eficiente y sostenible, focalizado en el menor consumo y dejando a un lado la competencia con los vehículos con MCI, que actualmente tratan de igualar o superar sus prestaciones mecánicas de potencia y aceleración. La reducción del ruido en las ciudades solo será posible si se reducen significativamente las secciones de los neumáticos y, a la par, las prestaciones mecánicas de los vehículos. Todo ello requerirá campañas de educación y sensibilización a la población, para que la reducción del ruido ambiente en las ciudades sea una realidad.

El comportamiento mecánico de los motores MCI es antagónico a los eléctricos. Para iniciar el desplazamiento del vehículo, el eléctrico es perfecto por su elevado par y elevado rendimiento, es decir, menor consumo de energía, mientras que, para mantener una determinada velocidad, el MCI tiene un rendimiento superior al eléctrico, es decir, menor consumo de energía.

#### *12.1.2.2.1. Futuro del sonido del vehículo eléctrico*

El vehículo eléctrico supone una innovación disruptiva en el campo del transporte. Al ser un medio que no emite gases ni ruido cuando circula, se ha calificado como un medio de transporte ecológico. A medida que esta movilidad ecológica se convierte en un objetivo social cada vez mayor, el progreso técnico y la presión competitiva impulsan y aceleran la electrificación del transporte, no solo en carretera, sino también por agua y aire. La progresión hacia sistemas de propulsión alternativos presenta múltiples desafíos para las industrias del automóvil y puede describirse como un desarrollo no lineal y disruptivo. Frente a estos cambios, los ingenieros acústicos se enfrentan al desafío de reconsiderar el proceso de optimización de los fenómenos vibroacústicos de formas diferentes, comúnmente bajo el término general NVH (ruido, vibración y rugosidad) (Eisele, Kauth, Steffens, & Glusk, 2019). Como fuente principal de varios fenómenos NVH, el tren motriz del vehículo desempeña un papel clave en el contexto del refinamiento acústico en los vehículos eléctricos.

El vehículo eléctrico actual tiene un inconveniente que afecta al nivel sonoro radiado: su elevado peso respecto al equivalente con MCI. El incremento de peso está entre el 40 % para vehículos de alta gama y el 45 % para vehículos utilitarios. Para compensar este incremento de peso, los fabricantes incrementan la potencia del propulsor en general un 25 %.

Si bien el incremento de potencia de un ME no afecta al nivel sonoro radiado, el incremento de peso sí. Un vehículo más pesado no es tan ágil en las curvas, requiere mayor distancia para acelerar y mayor distancia de frenado. Para asegurar que el vehículo eléctrico se puede controlar, los neumáticos, la suspensión y el sistema de frenado, entre otros, se dimensionan adecuadamente para poder guiar y detener al vehículo con seguridad. El propulsor eléctrico ofrece un mayor par motor, por lo que su capacidad de aceleración no se ve mermado.

Desde el punto de vista acústico, el mantenimiento de la sección de los neumáticos y el incremento de peso de los vehículos eléctricos va a dar como resultado un mayor nivel sonoro radiado por los neumáticos del estrictamente deseado. En general, para los vehículos eléctricos de gama alta se mantienen las dimensiones del neumático, siendo la más habitual la de 235/55R19 y sus variantes en relación con la llanta y relación de aspecto. En los vehículos utilitarios, la sección de neumático más habitual es de 195/55R16 y sus variantes.

El incremento de peso se debe exclusivamente a las baterías, que en general van alojadas en el suelo del vehículo. Es probable que en un futuro se puedan desarrollar baterías más ligeras que permitan acumular más energía. La célula de combustible de hidrógeno es una alternativa a las baterías. El hidrógeno, almacenado en un depósito presurizado a alta presión, se combina con el oxígeno para generar electricidad. Este sistema goza de las ventajas del eléctrico, pero sin los inconvenientes de la limitación de la autonomía y, sobre todo, del tiempo de recarga de las baterías. Los vehículos con hidrógeno pueden repostar como los actuales de combustibles fósiles y ofrecen autonomías iguales o superiores a los MCI. Estos vehículos tienen un peso parecido al de los MCI, por lo que su mecánica no requiere en principio de secciones importantes de neumático para potencias aceptables.

El acrónimo CASE, creado por Daimler en 2016, resume cuatro megatendencias en el transporte eléctrico: conectado, autónomo, compartido y eléctrico. El cambio al concepto «todo eléctrico» no supone solo un cambio del tipo de motor: es un cambio de tendencia y un cambio de actitud. La tendencia clara que se empieza a vislumbrar en nuestra sociedad es el uso compartido del vehículo. Tener un vehículo en propiedad no es una prioridad para las generaciones más jóvenes, incluso no es necesario tener carné de conducir, ya que en poco tiempo parte de los vehículos serán autónomos (sin conductor). El hecho de que muchos usuarios compartan el mismo vehículo reducirá la importancia de crear un sonido específico de marca individual.

En cambio, el diseño de sonido activo permitiría ajustar el ruido interior a las preferencias del usuario actual. Y en estos aspectos algunos fabricantes se han dado cuenta de que su enfoque inicial, hacia un sonido personalizado, estaba equivocado. Los vehículos eléctricos, que cuentan con un motor muy silencioso, crean nuevos desafíos para el desarrollo de NVH de varias maneras: ruido desagradable de alta frecuencia del tren

motriz, menos enmascaramiento del ruido perturbador como los ruidos de la carretera y el viento, y la diferenciación sonora de la marca respecto de la competencia, con el nuevo carácter sonoro de la transmisión eléctrica. Los requisitos de NVH para vehículos que operan de forma autónoma diferirán significativamente de los vehículos convencionales. La situación del usuario de un vehículo autónomo será similar a la de un pasajero de tren. Las características de NVH orientadas al confort sonoro serán las más importantes. Por otro lado, las generaciones más jóvenes sintonizan a la perfección con las nuevas tendencias que ofrece el transporte eléctrico. De todas ellas, el concepto *always on, anywhere, anytime* es la más importante y define un estilo de vida y unos valores a los que no se puede dar la espalda.

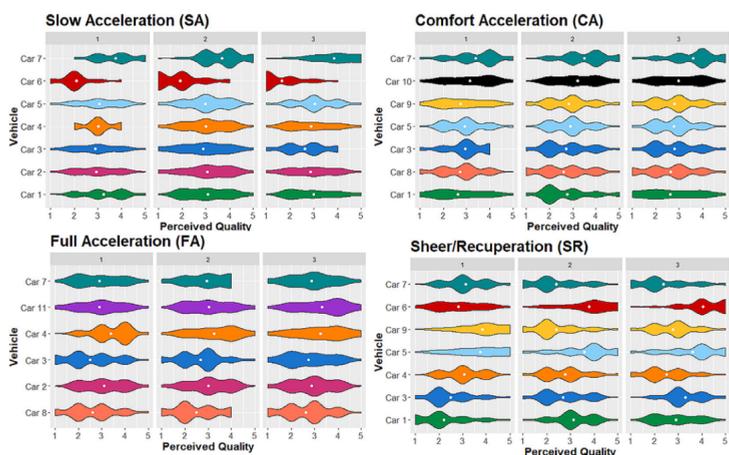
Sin embargo, han pasado muchas generaciones que se han acostumbrado a unos sonidos propios de un vehículo automóvil, y esto va a resultar difícil de cambiar. Por ejemplo, la conducción de un vehículo ha estado acompañada del perfil de sonido típico del MCI durante décadas para muchas personas y, por tanto, formó su expectativa sonora. De este modo, los clientes se adaptaron a ciertos patrones de sonido en referencia a diferentes situaciones operativas y ahora esperan y asocian patrones específicos dentro de su contexto de conducción situacional. Es decir, la calidad percibida no es una medida absoluta debido a su dependencia de determinadas variables personales y contextuales. Teniendo en cuenta el novedoso perfil acústico de los trenes motrices eléctricos, con el que la mayoría de las personas aún no están familiarizadas, es esencial averiguar hasta qué punto el ruido del tren motriz electrónico está relacionado con la impresión de calidad individual cuando se trata de reevaluar esta característica relevante para el usuario. El incremento notable del peso del vehículo supone también un cambio en su comportamiento dinámico, siendo la frenada y la maniobrabilidad los más críticos.

Los hallazgos de un estudio apoyan que el ruido del tren motriz electrónico es un atributo relevante para el usuario, ya que transmite información sobre el producto que contribuye a la impresión de la calidad general de este por las personas. No solo ha cambiado el nivel sonoro radiado, sino también las características de todo el perfil de sonido. En realidad, el perfil acústico de los vehículos eléctricos se desvía significativamente del de los MCI. En lugar del espectro de ruido de banda ancha típico del MCI, que está dominado por órdenes de motor y sus armónicos en el intervalo de frecuencia por debajo de 1 kHz, se caracteriza el ruido del tren motriz electrónico por frecuencias más altas y componentes tonales en el intervalo subjetivamente relevante de 1 a 10 kHz, para los cuales el aparato auditivo humano es particularmente sensible. El nivel sonoro de los vehículos eléctricos suele ir acompañado de un incremento relativo del ruido aerodinámico y del ruido de neumáticos.

Los trenes de potencia eléctricos muestran un zumbido característico causado por la electrónica de potencia que controla el motor o motores eléctricos, que generalmente

varía en el intervalo de frecuencia de 250 Hz a 20 kHz de la tensión eléctrica aplicada. La investigación sobre la incomodidad que esto podría inducir es todavía desconocida, pero este zumbido suele percibirse como bastante desagradable (Devillers, Gning, Degrende, & Le Besnerais, 2020). Como se encontró en diversas investigaciones psicoacústicas, los vehículos eléctricos más silenciosos son potencialmente más molestos y menos aceptables desde el punto de vista del usuario, ya que su perfil acústico se caracteriza por presentar frecuencias más altas y componentes tonales (Lennström, Lindbom, & Nykänen, 2013).

La figura 12.11 muestra, mediante diagramas violín, la calidad sonora percibida de una muestra de once vehículos eléctricos, evaluada por un total de 65 participantes, para cuatro situaciones de conducción: aceleración lenta (SA), aceleración confortable (CA), aceleración máxima (FA) y recuperación (SR). Cada prueba o test se repite tres veces, pero con los vehículos en distinto orden. Los puntos blancos muestran el valor promedio de puntuación en cada prueba (Münder & Carbon, 2021).



**Figura 12.11.** Distribución de calificación de la calidad percibida en cada bloque de prueba y cada repetición. Para la calificación de calidad: 1 = baja calidad, 2 = calidad insuficiente, 3 = neutra, 4 = calidad bastante alta, 5 = alta calidad. Las columnas 1, 2 y 3 representan el número de repetición.

Como muestra este estudio, la percepción subjetiva del paisaje sonoro de un vehículo eléctrico puede diferir mucho entre diferentes individuos, incluso si el estímulo presentado es el mismo. Estas diferencias son aún más prominentes en dominios perceptivos más complejos, como la calidad percibida. Los datos obtenidos también muestran que, a pesar de que en general se enfatizó positivamente el carácter de sonido silencioso de los vehículos eléctricos, los usuarios aceptan, o incluso esperan y desean, comentarios operativos en ciertas situaciones, como, por ejemplo, en el escenario de aceleración total.

En general, se echa de menos ese sonido «de potencia» que transmite un vehículo MCI en aceleración máxima. Esta sensación es debida a que en plena aceleración el vehículo eléctrico produce un empuje muy superior a un vehículo con MCI, pero «sin ruido», y eso resulta muy chocante para el conductor y muy peligroso para el peatón porque no escucha ningún sonido procedente de un vehículo con ME que delate que este acelera mucho más rápido que un MCI.

Se puede observar que no se obtiene ninguna puntuación máxima (5), probablemente debido a la poca familiarización con los nuevos sonidos procedentes del vehículo eléctrico.

Se necesita más investigación sobre la configuración exacta del ruido del tren motriz electrónico, desde el punto de vista de su perfil sonoro, para comprender qué tipo representa una combinación favorable de fenómenos NVH característicos, lo que lleva a un entorno sonoro interior agradable, esperado y orientado al usuario para los vehículos eléctricos.

#### 12.1.2.2.2. *Sistemas de alerta sonora (AVAS)*

Con los vehículos eléctricos surge un problema relacionado con la seguridad vial. Al ser muy silenciosos y estar, además, rodeados de vehículos con MCI, no son detectados acústicamente por los peatones y eso supone un grave problema para las personas con discapacidad visual, que tampoco pueden verlos. Tras muchos estudios y soluciones estudiadas, la solución propuesta por la Unión Europea ha sido que estos vehículos emitan sonidos siempre que circulen a velocidades inferiores a 30 km/h. De este modo, todas las personas que se encuentren alrededor del vehículo podrán escuchar un sonido que delata su presencia.



**Figura 12.12.** El vehículo eléctrico es tan silencioso que se le obliga a emitir sonido para alertar de su presencia a las personas cercanas.

El sonido radiado se dirige frontalmente durante la marcha normal y posteriormente cuando el vehículo da marcha atrás. Este sonido tiene un componente tonal armónico

que varía en función de la velocidad del vehículo, no del régimen de giro del motor. Con el vehículo parado, el sistema AVAS no emite sonido. Los niveles son variables en función del nivel sonoro ambiental, entre un mínimo de 56 dBA y un máximo de 75 dBA.

A la vista del ciudadano que ha sufrido durante décadas el ruido de automoción, es probable que esta medida le parezca contradictoria con el concepto de vehículo eléctrico, que es silencioso *per se*. Para los profesionales del sector, la decisión tampoco deja indiferente, ya que, tras décadas de investigación, trabajos y mediciones, y muchos recursos económicos invertidos para silenciar los vehículos con MCI, se llega a la conclusión de que el vehículo eléctrico es ahora «demasiado silencioso». Los nuevos sonidos de los vehículos eléctricos van a necesitar de una fase de habituación que se prevé larga para aquellos que han escuchado durante muchas décadas cómo suena un vehículo con MCI.

Cada fabricante de vehículos eléctricos es libre de seleccionar un sonido para sus productos y las grandes firmas ya llevan tiempo trabajando en encontrar un sonido que las identifique y diferencie de la competencia. El carácter tonal de todos estos sonidos, con ligeras variaciones de frecuencia en función de la velocidad del vehículo, es claramente perceptible por las personas, dado que este es el principal objetivo. Estos sonidos deben emitir frecuencias entre 1 kHz y 5 kHz, que es donde el oído presenta su máxima sensibilidad. Sin embargo, la gente mayor sufre hipoacusia y, para que puedan oír el AVAS, estos sistemas también deben emitir sonidos por debajo de 1 kHz.

El sistema AVAS establece que las velocidades de cruce en las pruebas consisten en una conducción a velocidad constante de 10 y 20 km/h, así como una conducción en marcha atrás a 6 km/h. Los niveles globales medidos de las pruebas no deben exceder los 75 dBA. Por otro lado, los niveles generales de marcha atrás para 10, 20 y 6 km/h deben ser superiores a 50, 56 y 47 dBA, respectivamente. Por último, las condiciones de 10 y 20 km/h requieren niveles de ruido mínimos adicionales en al menos dos bandas de 1/3 de octava, de las cuales una banda será la banda de 1/3 de octava de 1.600 Hz o inferior.

El sistema AVAS sustituye el sonido largamente no deseado producido por una máquina por otro sintetizado electrónicamente y que imita al primero, que solo estará presente para velocidades inferiores a 2 (Skoee E., Kraus N., , 2013)0 km/h. No se sabe si el sistema AVAS será permanente o solo durante la transición en el paso del combustible fósil al propulsor eléctrico.

Algunos trabajos de investigación apuntan que el sonido artificial procedente de los vehículos eléctricos puede ser molesto, perjudicando la calidad del paisaje sonoro en exteriores (Giudice, Jennings, Cain, Humphreys, & Song, 2010). Como indican los estudios de Genuit y Fiebig, un sonido puede ser percibido como molesto si no es necesario. El aumento de señales artificiales de aviso puede crear un entorno sonoro molesto (Genuit & Fiebig, 2012). Algunos estudios informan de que la influencia sobre el ruido

ambiental a menudo no se tiene en cuenta por completo en el desarrollo de señales de advertencia para vehículos eléctricos (Genuit & Fiebig, 2016).

Unas pruebas realizadas con vehículos eléctricos dotados de sistema AVAS muestran que el sonido que generan estos vehículos, no pueden asegurar siempre una detección segura del vehículo por personas con discapacidad visual. Determinadas combinaciones de tonos AVAS, no permitían detectar con suficiente antelación la presencia del vehículo eléctrico en las inmediaciones. Los autores del trabajo sugieren que estos resultados, pueden ser motivados por la familiaridad con el sonido de los vehículos con MCI y que los sonidos artificiales del sistema AVAS, no se habían escuchado con anterioridad por los participantes de la prueba. (Steinbach & Altinsoy, 2020)

Por último algunos trabajos muestran que los sonidos artificiales también resultan molestos para los mismos conductores, que en la mayoría de casos desconectan estos sonidos, si eso es posible. Los conductores manifiestan que no quieren añadir ruido al paisaje sonoro.

La sensación de desagrado generalizado que producen los sonidos artificiales del AVAS se agudizarán con la reducción de vehículos con MCI que estén en circulación. Con niveles sonoros ambientales más moderados, se hace evidente que el sistema AVAS debería incorporar un sistema automático que active el sonido en los momentos que sea necesario (presencia de personas con discapacidad visual) mediante sonidos *ad hoc*. Esto probablemente disminuiría la sensación de molestia o desagrado que estos sonidos producen entre la población (Barti R. , 2016).

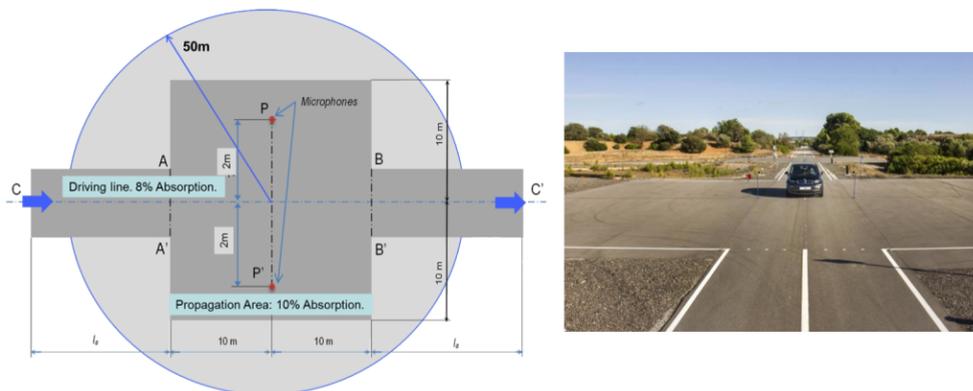
Con la reducción de la velocidad de circulación urbana a un máximo de 20 km/h, los sistemas AVAS estarán en funcionamiento siempre cuando los vehículos inicien su marcha. El resultado va a ser una cacofonía de sonidos tonales que, sin duda, va a generar todo tipo de comentarios nada favorables entre la población.

La imagen 12.13 muestra un equipo AVAS. Las dimensiones de la caja que aloja el sistema son las mismas para todos los fabricantes, de manera que es una pieza estándar para todos los vehículos. Este dispositivo va montado en la parte delantera y trasera del vehículo eléctrico.



**Figura 12.13.** Radiador acústico del sistema AVAS para vehículos eléctricos.

Las mediciones del nivel de ruido exterior para vehículos eléctricos, se hace en las mismas instalaciones homologadas, como se muestra en la figura 12.14.



**Figura 12.14.** Pista de pruebas homologada donde se hacen los ensayos de nivel sonoro radiado para vehículos.

### 12.1.3. Actuaciones musicales en espacios públicos

El ruido que genera más quejas es el relacionado con actividades festivas y musicales, especialmente en espacio público en entornos urbanos, que han ido aumentando exponencialmente durante los últimos años. A la vez, los equipos de sonido han experimentado en las últimas décadas un avance espectacular en el rendimiento, debido a las mejores prestaciones acústicas de los altavoces que permiten radiar niveles sonoros impensables unos años atrás. Todo esto hace que en ocasiones se produzcan situaciones de «saturación» por parte de los vecinos cercanos a determinadas zonas, que ven proliferar el número de noches sin poder dormir.

Para este tipo de eventos, el autor de este libro fue pionero en desarrollar el uso de limitadores acústicos para controlar el nivel sonoro en exteriores iniciado en 2005. Las distintas pruebas en diferentes eventos musicales en Barcelona entre os años 2005 y 2010, demostraron que era una herramienta eficaz. Sin embargo, el protocolo que se definió en 2005 no se ha actualizado y lleva casi dos décadas totalmente desfasado. La tendencia en las sonorizaciones en nuestro país sigue unas pautas basadas en dos aspectos. Primero, se trata de radiar el máximo nivel sonoro independientemente del espacio para sonorizar, con una única limitación: si los altavoces caben, se monta. En segundo lugar, el precio del alquiler de los equipos es bastante asequible. El resultado es que los equipos de sonido están sobredimensionados, y esto ocurre porque en general nadie se preocupa de calcular la potencia acústica necesaria para el evento y qué equipo es el

adecuado para sonorizar un determinado espacio, y se aplica la máxima: «Por el mismo precio, mejor que sobre».

Ante esta mala praxis tan generalizada, se recurre a poner limitadores acústicos en un intento por controlar los niveles sonoros, aunque de nada sirve este equipo si no se gestiona correctamente su programación y se realizan controles sonométricos paralelos a las actuaciones. Por otro lado, los equipos profesionales actuales llevan incorporadas diversas funciones para controlar o personalizar su funcionamiento. Uno de estos elementos es el sistema limitador del nivel sonoro, del que dispone actualmente la mayoría de las etapas de sonido profesionales;. Esta limitación también se puede conseguir con equipos externos, lo que permite aplicarlos a cualquier tipología de amplificador y además estos dispositivos externos permiten controlar más eficientemente el nivel sonoro. Su uso a partir de un estudio acústico sería suficiente para evitar los excesos; sin embargo, la solución definitiva pasa por un control acústico en bucle entre el nivel sonoro dentro del evento y en los puntos sensibles más representativos, que permite primero informar al responsable del control de sonido de los niveles sonoros que hay realmente en los puntos sensibles y que le diera la posibilidad de controlar o regular, si fuera necesario o adecuado, el nivel sonoro en emisión.

Las sonorizaciones se hacen en muchos sitios, con distintos objetivos y sensibilidades. Sonorizar un espacio es ajustar el nivel sonoro a las necesidades reales del evento. No es lo mismo una actuación musical en directo para un público adulto que una fiesta infantil, ni en nivel sonoro ni en calidad acústica. Hay lugares donde los eventos sonoros se autorregulan, o sea, no precisan de elementos externos de terceros para supervisar los niveles sonoros radiados. En estos casos, no necesitan limitadores acústicos, puesto que hay un responsable de la instalación y esta se ha dimensionado a la necesidad real, es decir, unos profesionales cualificados han hecho su trabajo “a priori” a instancias del organizador del evento.

Para ilustrar este concepto, se muestran los resultados cuando esta autorregulación se hace correctamente. La figura 12.15 muestra una vista aérea de la *place du Capitole* de Toulouse (92 × 120 m), donde anualmente se desarrolla un evento para promocionar distintos destinos turísticos en distintas partes del mundo. En una esquina de la plaza (rectángulo amarillo) se ofrecen una serie de actuaciones musicales de pequeño formato.

El evento musical estaba en una esquina de la plaza y se sonorizó una zona cercana delante del escenario, destacada con un rectángulo amarillo. El objetivo era sonorizar únicamente ese espacio afectando lo mínimo posible a los alrededores. El evento sonoro estaba formado por multitud de mostradores con expositores de turismo de diferentes países. Era importante que tanto la ubicación como el nivel sonoro emitido por las actuaciones musicales no perjudicaran a otros expositores. Por otro lado en esta plaza, hay diversos establecimientos hoteleros.



**Figura 12.15.** Ejemplo de sonorización eficiente.

La figura 12.16 muestra, a la izquierda, el escenario y los altavoces (en amarillo). Se puede observar que no hay «subs» y que los cuatro altavoces, agrupados de dos en dos a ambos lados del escenario, son de tamaño medio de dos vías con un *woofer* de 10". El amplificador tenía una potencia de 1.000 W, más que suficiente para sonorizar el evento. A la derecha se puede ver el control de sonido, formado por un portátil que regulaba y controlaba que el nivel sonoro se mantuviera dentro de los límites. En este caso, se trataba de sonorizar solo una pequeña parte de la plaza, por lo que el nivel de potencia radiado debe estar controlado y supervisado.



**Figura 12.16.** Escenario con altavoces a los lados y control de sonido.

Este evento muestra una forma eficiente de enfocar el problema. Cabe destacar la ausencia de «subs», no tanto por el nivel sonoro que pueden ofrecer, sino por su efecto contaminante tan devastador. Sonorizar no significa tener niveles de discoteca en espacios públicos. Podemos decir que el enfoque dado en este caso muestra un predominio del autocontrol de los niveles sonoros, permitiendo una integración del evento musical en el espacio urbano y que se refleja con el dimensionado adecuado del equipo de sonido. En otras latitudes, las sonorizaciones se hacen siempre igual, sea jazz, heavy metal o una

fiesta infantil: se pone la mayor potencia posible que permita el espacio y el presupuesto, independientemente de si se trata de una pequeña plaza en un entorno urbano o un terreno en medio del campo, y confundiendo la calidad sonora con el nivel sonoro.

El ejemplo mostrado demuestra que no hacen falta grandes inversiones para controlar los niveles sonoros de los eventos musicales en espacios abiertos, sino profesionalidad y responsabilidad. Notemos que otro aspecto característico es la ausencia de limitador acústico. La figura clave para este autocontrol es la figura del responsable acústico del evento. Si hay quejas por exceso de nivel sonoro, el responsable no queda impune y este deberá responder ante la Administración o la justicia, si llega el caso, con sanciones y consecuencias contundentes.

La clave es controlar el tamaño de los altavoces de graves. A mayor diámetro, más contaminación de baja frecuencia; y en entornos urbanos esto debería estar limitado. Obviamente, un altavoz de 8" no da el mismo rendimiento a bajas frecuencias que uno de 15" o 18". Sin embargo, no se puede pretender que todas las sonorizaciones en entornos urbanos abiertos «suenen» como una discoteca, con la típica percepción de la «patada en el estómago». La sonorización en entornos urbanos debe adaptarse al entorno y no al revés, como se hace actualmente. La sonorización en entornos urbanos debería estar limitada a altavoces con un tamaño máximo de 10" y sin uso de «subs» para evitar los excesos de energía a baja frecuencia y, por supuesto, sin «patada». El sonido-espectáculo, con una enfatización desmesurada de la baja frecuencia, debería reservarse exclusivamente para los espacios acústicamente preparados. Si se desea sonorizar con un sonido adecuado al tipo de música que requiere de esta enfatización, lo correcto sería buscar un entorno alejado de las zonas habitadas o espacios cerrados debidamente habilitados y acondicionados acústicamente para este tipo de acontecimientos, nunca en una calle o plaza de una población.

Como las necesidades de los asistentes a un evento musical son en general contrapuestas a la de los vecinos, y dado que se utiliza espacio público, en el caso mostrado se priorizaron las necesidades de los vecinos de la zona y otros usuarios del espacio público respecto a las actuaciones musicales y el público asistente. Una situación distinta son los festivales y conciertos musicales de pago, que supuestamente se organizan en lugares adecuados. En estos casos, debería prevalecer el deseo de los espectadores, ya que se supone que el espacio es adecuado para realizar el evento y, por consiguiente, no se producirán conflictos con residentes cercanos.

#### **12.1.4. Ambientes sonoros de terrazas en entornos urbanos**

Las zonas más céntricas de las grandes ciudades suelen tener una actividad comercial notable. En estas zonas conviven muchas actividades de distinta tipología. Una de

las más habituales suelen ser los servicios de bar-restauración con terrazas. Es obvio que el paisaje sonoro es muy distinto con o sin terrazas. La concentración de personas en las horas de comidas propicia unos cambios sonoros notables. No obstante, la influencia cultural, la formación y los hábitos sociales hacen que las previsiones de los niveles sonoros no se puedan extrapolar a cualquier población.

La presencia de terrazas en la vía pública es un problema sobre el que es difícil dar una solución efectiva. La principal fuente sonora son los propios clientes de las terrazas. Dependiendo de su actitud y el grado de ocupación de la terraza, el nivel sonoro será más o menos elevado. La voz humana presenta un margen dinámico elevado, aspecto que raras veces se tiene en cuenta en las previsiones de nivel sonoro y evaluación del grado de molestia.

El nivel equivalente ( $L_{Aeq}$ ) puede ser moderado; sin embargo, los picos de señal son elevados. Recordemos que la locución es un canal de comunicación con mucha información redundante, lo que permite a los humanos comunicarse en distintas situaciones, con ruido ambiente, con reverberación, etc., y esa redundancia no es solo por el contenido espectral, sino también por los desniveles de la locución (la prosodia) del lenguaje. Gracias a nuestro sentido auditivo binaural, podemos reconstruir el mensaje que nos llega a los oídos aunque estemos en entornos muy ruidosos y seleccionar la información. Justamente esta función tan maravillosa es la que no precisamos cuando no estamos en la terraza, sino intentando dormir, ya que nuestro cerebro «sigue» e identifica el lenguaje y su significado, y eso atrae nuestra atención y, por tanto, nos impide conciliar el sueño.

Las terrazas son espacios abiertos donde no hay estructuras que impidan la propagación del sonido en todas direcciones. Destaca que las lonas y los elementos similares presentan una atenuación débil a altas frecuencias y únicamente para receptores situados cercanos en la zona de sombra acústica. Poner techos o estructuras rígidas con absorbente es una solución que no es nueva y es bien conocida, pero eso puede requerir en muchos casos la modificación de las ordenanzas municipales para poner estructuras fijas en espacios públicos. La medida más eficaz, como ya se ha dicho anteriormente, es actuar sobre las fuentes sonoras.

La actitud de las personas en una terraza es más importante que el número de clientes en su interior. El ruido ambiente que se percibe en estos espacios procede mayoritariamente de las voces de los comensales de las distintas terrazas. El hecho de que unos comensales griten más de lo necesario conlleva el efecto avalancha con el incremento del nivel sonoro general, al gritar también más las personas que se encuentran a su alrededor y extenderse este fenómeno al resto de las mesas. Lo correcto y deseable sería una autorregulación de las distintas fuentes sonoras (en este caso, los mismos comensales). El principio de acción es muy simple: se llama *respecto* al prójimo, o *empatía* hacia los demás, que en general parece brillar por su ausencia.

La figura 12.17 muestra una terraza en una plaza de Liberec, en la República Checa. Su ubicación no revela ninguna situación o detalle destacable que justifique que el nivel sonoro captado a 30 m de la terraza era inapreciable, en un entorno peatonal bastante silencioso, estando esta llena de clientes. La foto fue tomada en agosto de 2013, con una temperatura de 30 °C y en un momento en el que todos los clientes de la terraza estaban hablando y consumiendo mayoritariamente cerveza en actitud distendida, pero respetuosa y con un tono de voz moderado. Se puede observar que no hay medidas correctoras. Esto evidencia que la mejor medida correctora y la más eficaz y económica contra el exceso de nivel sonoro en las terrazas, es la autorregulación sonora de los clientes. Otras medidas, como los techos móviles absorbentes o pantallas acústicas, pueden ser de ayuda, pero nunca la solución definitiva.



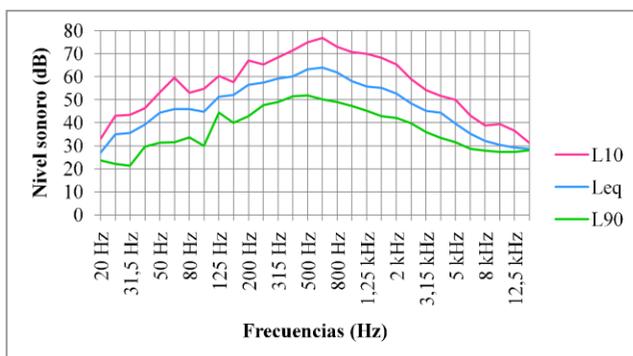
**Figura 12.17.** Una terraza en Liberec (Rep. Checa) donde no se aprecia ninguna medida correctora que justifique el silencio en las proximidades, a pesar de estar la terraza llena de clientes.

Para ilustrar la importancia de la empatía o respeto al prójimo en terrazas, se exponen dos ejemplos similares en restauración. En ambos casos, se trata de una plaza ubicada en pleno centro urbano, con diversos restaurantes con terraza en el exterior. Todas las mesas se encuentran ocupadas en el momento de hacer las mediciones y el número de clientes es similar. Sin embargo, la actitud de los clientes en los dos casos es diferente.

La primera terraza está situada en la parte céntrica de una población española. Se observa que el griterío de los clientes llega a ser ensordecedor en algunos momentos. El elevado nivel sonoro general denota que no hay respeto hacia los demás comensales, los clientes se hablan a gritos porque no llegan a escucharse, sin importarles que otros escuchen su conversación. La segunda terraza está también situada en un lugar céntrico de una ciudad francesa. En esta ubicación hay quizá más gente y, sin embargo, se puede hablar con normalidad, ya que los clientes tratan de no alzar la voz en exceso para que su conversación no trascienda más allá de los límites de la mesa. Para valorar los niveles so-

noros, se hacen registros de nivel sonoro mediante un sonómetro tipo 1, desde una mesa dentro de cada terraza durante la comida, entre las 13:00 y las 15:00. La figura 12.18 muestra los resultados obtenidos para la primera terraza.

El nivel equivalente para cada banda de frecuencia se muestra en el gráfico azul. Se destacan los niveles alrededor de los 500 Hz, que es donde la voz humana presenta más energía. Los gráficos de color rojo y verde muestran los niveles L10 y L90 respectivamente, por bandas de frecuencia. El nivel sonoro equivalente durante la medición fue de 68,1 dBA. La sensación percibida por los comensales en la mesa era de griterío constante y resultaba difícil hablar con la persona que estaba sentada delante a menos de 1 m, teniendo que alzar la voz constantemente para que el interlocutor entendiera el mensaje. Desde el punto de medida, se podían escuchar con claridad las conversaciones de las mesas cercanas y no cercanas. El exceso de ruido no invita a quedarse a tomar el café, sino a salir corriendo.

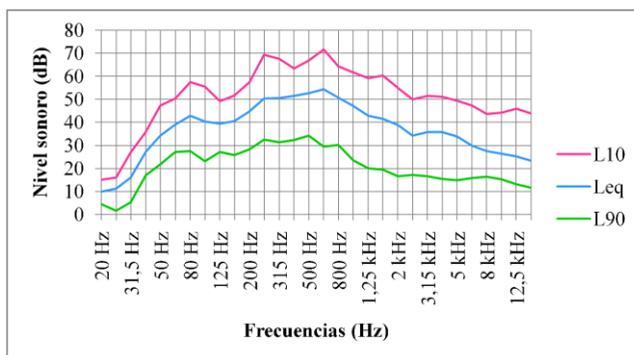


**Figura 12.18.** Espectro sonoro de una terraza con actitud no respetuosa de los clientes, con todas las mesas llenas (caso 1).

La figura 12.19 muestra los resultados obtenidos para la segunda terraza. La ubicación era similar: una mesa rodeada de otras mesas y con terrazas cercanas en una plaza sin paso de vehículos. Como se puede observar, la forma espectral se mantiene prácticamente igual que el caso anterior, con pequeños matices. El nivel sonoro fue en este caso de 57,6 dBA. Con este nivel sonoro, se podía mantener perfectamente una conversación sin necesidad de alzar la voz. Desde el punto de medida, se podía escuchar ocasionalmente la conversación de las mesas adyacentes.

La distancia entre los gráficos rojo L10 y verde L90, de las figuras 12.18 y 12.19, dan idea de la dinámica de la señal sonora. Cuanto mayor sea esta diferencia, más pausas habrá en la locución y esta será más relajada. Cuanto más cerca se encuentren, el nivel

sonoro se mantendrá durante más tiempo a unos niveles muy parecidos y eso incrementa el cansancio auditivo de la gente que comparte ese espacio. La tabla 12.6 muestra los niveles sonoros obtenidos en las terrazas de los casos 1 y 2, donde se aprecia un desnivel de más de 10 dBA.



**Figura 12.19.** Espectro sonoro de la terraza donde los clientes mantienen una actitud respetuosa con el prójimo y con todas las mesas llenas (caso 2).

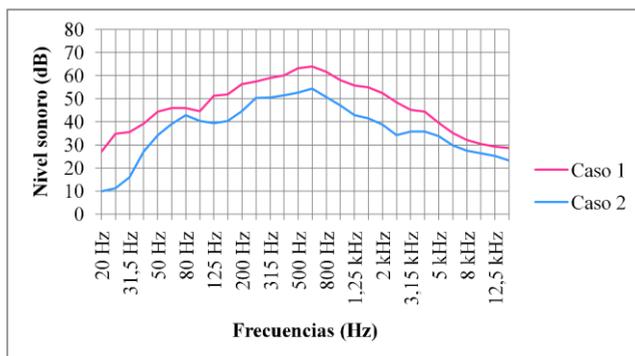
**Tabla 12.6.** Niveles sonoros en las terrazas de los casos analizados

| UBICACIÓN | Leq dBA |
|-----------|---------|
| Caso 1    | 68,1    |
| Caso 2    | 57,6    |

En el caso que nos ocupa, lo que se desea realmente, al margen de comer, es poder hablar con las personas sentadas en la misma mesa. La actitud de estas personas es la que va a situar el nivel sonoro ambiente. Nótese que para el caso 1 el espectro muestra un máximo en la banda de 630 Hz, y el resto de bandas queda claramente por debajo. Esta forma espectral denota un tono de voz forzado (locución cercana al grito). La locución humana no puede mantener su espectro radiado, manteniendo la sonoridad, y recurre a concentrar la energía sonora en las bandas medias (630 Hz) para aumentar el nivel de sonoridad (elevación de la voz). Por eso, la voz a gritos siempre es más aguda que el tono de voz «normal». Este mecanismo también lo utilizan algunas aves para alertar de algún peligro a sus homónimos.

En el segundo caso, en cambio, se observa un ambiente sonoro más relajado. Las conversaciones se hacen en un tono de voz moderado por la mayoría de comensales y

se nota que las personas tratan de preservar su intimidad sonora, limitando voluntariamente el nivel de la voz lo suficiente para que el interlocutor lo entienda y el resto no. Este «detalle», que puede parecer insignificante, se traduce en una diferencia superior a los 10 dBA del nivel sonoro equivalente ( $L_{Aeq}$ ) entre ambas terrazas. Es decir, la primera terraza suena el doble de fuerte que la terraza del segundo caso. La figura 12.20 muestra el espectro sonoro promediado durante 1 hora en ambos casos.



**Figura 12.20.** Espectro en frecuencia del ruido producido por dos actividades de restauración en terraza.

En la segunda terraza, la reducción del nivel sonoro se produce porque son las mismas fuentes sonoras (clientes) las que, mediante su actitud, y sobre todo su civismo y respeto al prójimo, moderan voluntariamente su tono de voz. Así consiguen un ambiente sonoro confortable y sin estridencias, que evita que otros clientes tengan que alzar la voz e incrementar notablemente el nivel sonoro, que llegará a los puntos sensibles cercanos.

### 12.1.5. Maquinaria de limpieza mecánica

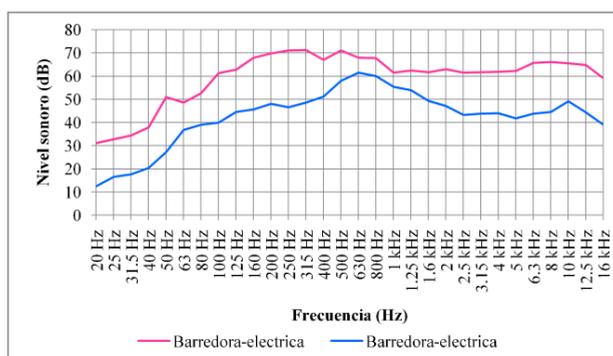
Otra fuente de ruido habitual en entornos urbanos son las máquinas de limpieza de las calles. La incorporación de medios mecánicos ha permitido que estas tareas sean más eficientes que antaño, cuando se hacían manualmente. No obstante, esta mecanización ha añadido el problema del ruido que genera a su paso este tipo de máquina, producido principalmente por el propulsor y el sistema de aspiración. En el mercado existen diferentes alternativas tanto de fabricantes como de capacidad de carga. La figura 12.21 muestra un ejemplo de barredora-aspiradora.

Respecto al nivel de ruido radiado, los fabricantes no suelen dar esta información en sus catálogos comerciales. Las barredoras con propulsor eléctrico reducen apreciablemente el nivel de ruido radiado, como se muestra en la figura 12.22 (Barti R. , 2018). El nivel de ruido depende del tipo de suelo y de la cantidad y tipología de la suciedad que se

encuentre. No obstante, en las barredoras tradicionales con MCI suele dominar el ruido del motor y el de aspiración.



**Figura 12.21.** Ejemplos de barredora-limpiadora. Izquierda: con propulsor diesel. Derecha: con propulsor eléctrico.



**Figura 12.22.** Espectro sonoro emitido por una barredora con motor diesel y una eléctrica a 3 m de distancia.

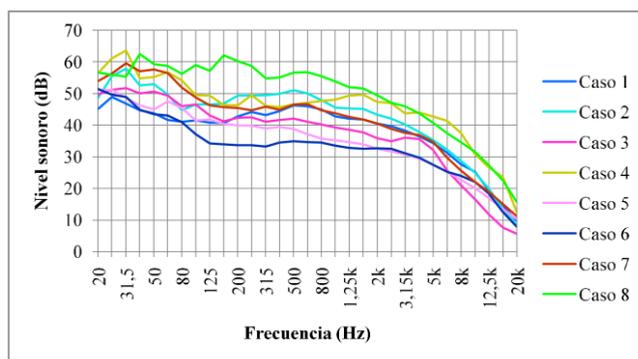
Los niveles sonoros centran su energía por encima de los 100 Hz. Una parte importante del ruido se genera por la interacción entre los elementos rotatorios que barren las superficies. El vehículo eléctrico consigue una reducción muy considerable de 12 dB, que se resume en la tabla 12.7.

**Tabla 12.7.** Nivel sonoro radiado por dos barredoras a 3 m de distancia

| MÁQUINA             | Nivel Leq dBA a 3m |
|---------------------|--------------------|
| Barredora-diesel    | 76,8               |
| Barredora-eléctrica | 64,9               |

Estas máquinas están pensadas para grandes volúmenes de trabajo en las calles de una población. En período diurno, el ruido de estas máquinas no suele destacar excesivamente para volúmenes de tráfico habituales. Sin embargo, para calles estrechas estas máquinas no son adecuadas. Por un lado, su tamaño dificulta que puedan girar o pasar libremente por las calles. Por otro lado, el nivel de ruido en las calles es notablemente bajo, ya que en general se trata de zonas peatonales donde no hay paso de vehículos, salvo mercancías. Para estos espacios se requieren otras soluciones mecánicas que se integren acústicamente en el entorno.

Una alternativa muy utilizada es el barrido manual, llevando un carro para recoger los restos. Si bien el método es silencioso por la ausencia de elementos mecánicos, su eficiencia no siempre es la deseable. Para estas situaciones se han creado las aspiradoras portátiles, propulsadas manualmente. Estas máquinas están pensadas para trabajar en lugares donde las personas pueden estar relativamente muy cerca de la máquina. Estas máquinas deberían estar adaptadas al nivel de ruido presente en estos espacios. La figura 12.23 muestra el ruido de fondo presente en ocho zonas peatonales de ocho poblaciones distintas. El elemento común en todos los espacios era la ausencia de vehículos. En función del grado de actividad, el nivel sonoro puede ser más o menos elevado.



**Figura 12.23.** Espectro sonoro de ocho calles peatonales en casco antiguo, ubicadas en ocho poblaciones distintas.

Los niveles sonoros globales medidos, correspondiente a las gráficas anteriores se resumen en la tabla 12.8.

La mayoría de los valores se encuentran por debajo de los 60 dBA, que suele ser lo habitual. El menor nivel corresponde al caso 6, con 43,8 dBA en una población de 8.000 habitantes. El mayor nivel corresponde al caso 8, con 63,5 dBA en una calle comercial del casco antiguo de una población de 1,6 millones de habitantes. Esta calle presenta un notable aforo de gente, lo que se traduce en un espectro más plano. A pesar de que en

ocasiones pasa relativamente poca gente, una calle peatonal situada en el casco antiguo de una población tiende a enfatizar el nivel sonoro, ya que la corta distancia entre las fachadas propicia la aparición de una cierta reverberación, de modo que cualquier ruido se ve «amplificado». Resulta llamativo que donde se observa más energía es a baja frecuencia. Esta energía acústica procede de las calles cercanas por donde pasan vehículos. La presencia de energía de baja frecuencia puede enmascarar otros sonidos, pero genera una sensación de bajo confort acústico.

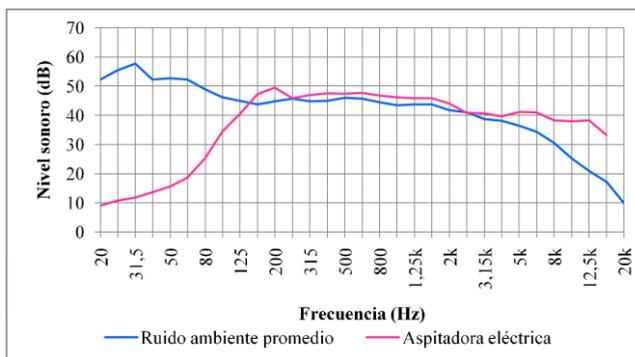
**Tabla 12.8.** Nivel global para cada caso mostrado de la figura 12.23

| <b>RUIDO AMBIENTE EXTERIOR</b> |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| <b>CASO ANALIZADO</b>          | <b>NIVEL Leq dBA</b> |
| Caso1                          | 57,6                 |
| Caso 2                         | 60                   |
| Caso 3                         | 56,1                 |
| Caso 4                         | 58,2                 |
| Caso 5                         | 55,6                 |
| Caso 6                         | 43,8                 |
| Caso 7                         | 58,4                 |
| Caso 8                         | 63,5                 |

Para la limpieza de los espacios con un nivel de ruido moderado, deberían preservarse estos niveles sonoros y utilizar máquinas con bajo impacto acústico. La solución debe ser eléctrica y sin autopropulsión. En el mercado se puede encontrar una aspiradora portátil eléctrica, que dispone de un eficiente silenciador para compatibilizar su uso al nivel de ruido ambiente de las calles por donde va a transitar. El diseño pretende, por un lado, facilitar la recogida de residuos asistida y, por otro, que su presencia sea percibida únicamente por los transeúntes más cercanos. El espectro en frecuencia de esta máquina se compara con el nivel sonoro de las máquinas ya mostradas y con el nivel de ruido ambiental promedio de los ocho casos analizados, como se muestra en la figura 12.24.

El nivel sonoro del promedio de casos analizados, exceptuando el caso 8, es de 57,3 dBA, mientras que la aspiradora de residuos eléctrica presenta un nivel de 56 dBA a una distancia de 3 m. Aunque los niveles sonoros globales son muy parecidos, el ruido de la máquina se podrá apreciar porque supone un ligero incremento del nivel sonoro, lo que permite que la máquina sea perceptible en las cercanías a unos 3 m de distancia. Notemos la ausencia de baja frecuencia y de componentes tonales en el ruido emitido. El

secreto está en un diseño acústico eficiente que elimina los componentes tonales que se pueden observar en otras máquinas con aspiración. Por otro lado, el nivel sonoro presenta un espectro amplio, entre los 160 Hz y los 12 kHz aproximadamente.



**Figura 12.24.** Espectro promedio del nivel de ruido en una calle peatonal comparado con el espectro radiado por una aspiradora de residuos eléctrica.

El carrito-aspiradora se puede considerar una solución *smart*, siendo una máquina diseñada a medida para unas situaciones concretas y que permite la convivencia de la máquina con el transitar en una calle con un bajo nivel de ruido ambiente cerca de las personas, aspectos que otras máquinas no consiguen.

La solución alternativa al carrito de tracción y recogida manual, y mucho más eficiente tanto en pulcritud del trabajo como en ahorro de tiempo, se muestra en la figura 12.25.



**Figura 12.25.** Ejemplo de solución eficiente para la limpieza de viales respetando el nivel sonoro preexistente.

### 12.1.6. Ayuda a la movilidad mediante tecnología sonora y vibratoria

Uno de los objetivos más importantes de las ciudades inteligentes es mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, haciendo los entornos más amigables y humanos. Las tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) pueden ayudar a conseguir mejoras en la movilidad de aquellas personas con discapacidad visual. El punto común de todos los dispositivos o aplicaciones que se pueden encontrar en el mercado es que pasan de imágenes o posiciones a sonidos. Hay multitud de dispositivos, algunos de ellos se citan seguidamente a modo de ejemplo:

- BlindSquare para iOS: basándose en la posición del dispositivo móvil, da indicaciones para llegar al punto de destino. También da avisos de puntos de interés durante el camino y avisa de las intersecciones durante el recorrido.
- Sunu Band: es una pulsera de ayuda a las personas con discapacidad visual mediante el uso de sonar y eco localización para detectar la presencia de objetos que puedan colisionar con la parte superior del usuario. Dispone de una pulsera que envía vibraciones para proporcionar al usuario información sobre la proximidad del objeto dentro de su trayectoria.
- Facing Emotions: es una aplicación que traduce siete expresiones faciales comunes a siete sonidos distintos para que las personas con discapacidad visual puedan interpretar las reacciones de los interlocutores.
- Soundscape: es una aplicación gratuita para iOS. La novedad es que utiliza sonido 3D para ayudar a las personas con discapacidad visual a crear un mapa mental sonoro tridimensional de lo que hay a su alrededor mediante sonidos. El funcionamiento es más intuitivo que otras aplicaciones porque solo hay que escuchar de dónde viene el sonido de guía. El usuario escucha a través de los auriculares un sonido pulsante en la dirección de la ubicación del punto de destino. Mediante la función *ahead me*, se indican cinco puntos de interés con una voz procedente de cada lugar concreto que le indica al usuario hacia dónde debe dirigirse para llegar. Por ejemplo, si una tienda concreta está a la derecha, el sonido procede exactamente de ese punto. Gracias a la tecnología sonora 3D, mientras camina los sonidos van apareciendo en la dirección correcta. Para que la aplicación funcione correctamente, el dispositivo debe estar posicionado delante de la persona, llevarla ladeada produce un error de la dirección del sonido.

### 12.1.7. Ruido de drones

La proliferación de drones con fines comerciales va en aumento en nuestra sociedad. Estas máquinas ofrecen una estabilidad de vuelo que los hace especialmente atractivos para realizar vuelos de seguimiento y supervisión aérea. Se comenta que su uso

para el reparto de mercancías puerta a puerta se podría generalizar en un futuro próximo. Aunque inicialmente su origen fue militar, la evolución de la tecnología, especialmente en las prestaciones de los giróscopos electrónicos, permite diseñar máquinas de formato micro y mini de uso civil.

Sin embargo, hay diversos aspectos que se deben tener en cuenta cuando se trata de volar sobre zonas pobladas, como puede ser una ciudad. El primero es la seguridad que ofrece un dispositivo volando a escasos metros de zonas habitadas, y el segundo es el ruido que generan estos dispositivos, que han puesto en alerta a las asociaciones en la lucha contra el ruido en todo el mundo.

El reglamento 2019/945 de la Unión Europea establece los requerimientos de los métodos de aeronaves no tripuladas (SANT). La parte 13 del reglamento establece los métodos de medición del ruido aéreo que se utilizarán para la determinación de los niveles de potencia sonora ponderados A de las clases 1, 2 y 3. La clase 0 es para una masa máxima en despegue (MMD) inferior a los 250 g, con una velocidad máxima en vuelo horizontal de 19 m/s y una altura máxima limitada a los 120 m. La clase 1 es igual que la clase 0, pero con una MMD inferior a los 900 g. La clase 2 es igual a las anteriores, pero con una MMD inferior a 4 kg y sin límite de velocidad. La clase 3 es igual a clase 2, pero con una MMD inferior a 25 kg.

Para determinar la potencia acústica, se aplica la norma EN ISO 3744:2011. En ella se establecen las normas básicas de emisión sonora y el código de ensayo detallado para la medición de los niveles de presión acústica sobre una superficie de medición que envuelve a la fuente y para el cálculo del nivel de potencia sonora emitido por esa fuente. El dron debe operar en vuelo estacionario, a 0,5 m sobre un plano reflectante. Los niveles de potencia máxima permitidos se muestran en la tabla 12.9.

**Tabla 12.9.** Niveles máximos de potencia radiados por un dron según el reglamento 2019/945 de la Unión Europea

| Clase de Dron | MMD (gramos)            | Entrada en vigor          | A los 2 años entrada en vigor | A los 4 años entrada en vigor |
|---------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| C1            | $250 \leq m \leq 900$   | 85                        | 83                            | 81                            |
| C2            | $900 \leq m \leq 4.000$ | $85 + 18,5 * \log(m/900)$ | $83 + 18,5 * \log(m/900)$     | $81 + 18,5 * \log(m/900)$     |

### 12.1.7.1. Medida del ruido de drones en laboratorio

Existen diversos estudios en los que se valoran los niveles sonoros emitidos por los drones y en ellos se han utilizado diferentes técnicas de medida. Por un lado, las medidas en laboratorio, tanto las medidas estándar de nivel de presión sonora como las medidas en los laboratorios especializados donde se puede medir la potencia sonora del dron en vuelo estacionario. Por otro lado, los trabajos más recientes usan una agrupación esférica

de micrófonos o una cámara acústica para obtener indirectamente los niveles sonoros radiados.

Un trabajo reciente estudia la emisión de los drones en una cámara semianecoica utilizando cinco micrófonos de presión sonora dispuestos en diferentes ángulos de elevación a una distancia de 1,5 m del centro de la fuente (Heutschi, Ott, Nussbaumer, & Welling, 2020). Los drones con una MMD entre 0,8 kg y 3,4 kg se operan a diferentes velocidades de rotación de las palas. La figura 12.26 muestra los drones utilizados en este estudio. Los pesos en vacío de los drones son: M2 = 900 g, I2 = 3400 g, F4 = 800 g y S9 = 3.300 g.



**Figura 12.26.** Imágenes de los drones utilizados para el estudio, todos considerados de uso profesional. De izquierda a derecha: M2, I2, F4 y S9.

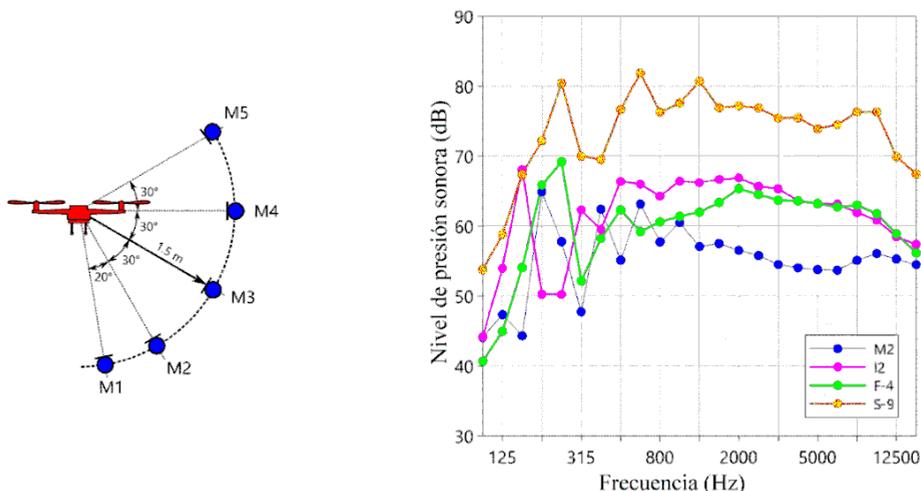
Las mediciones se hacen para vuelo estacionario, lo que da como resultado un modelo de emisión dependiente de la velocidad de rotación de las palas. La suposición de que la emisión acústica de un dron en particular depende exclusivamente de la velocidad del rotor aún debe confirmarse (Heutschi, Ott, Nussbaumer, & Wellig, 2020). Los autores consideran un ángulo de referencia de  $30^\circ$  (M3) respecto a la horizontal. El espectro de frecuencia mostrado es para esta posición de micrófono.

La figura 12.27 muestra a la izquierda la posición de los micrófonos equidistantes del centro de gravedad del dron. Los autores consideran al micrófono M3 el nivel de referencia. A la derecha, se muestra el espectro radiado por los cuatro drones ensayados para la posición M3. Se observa que la componente de frecuencia principal se encuentra entre las bandas de 125 Hz y 315 Hz. Destaca el mayor nivel sonoro radiado por el modelo S9, dado que se trata de un dron con seis rotores.

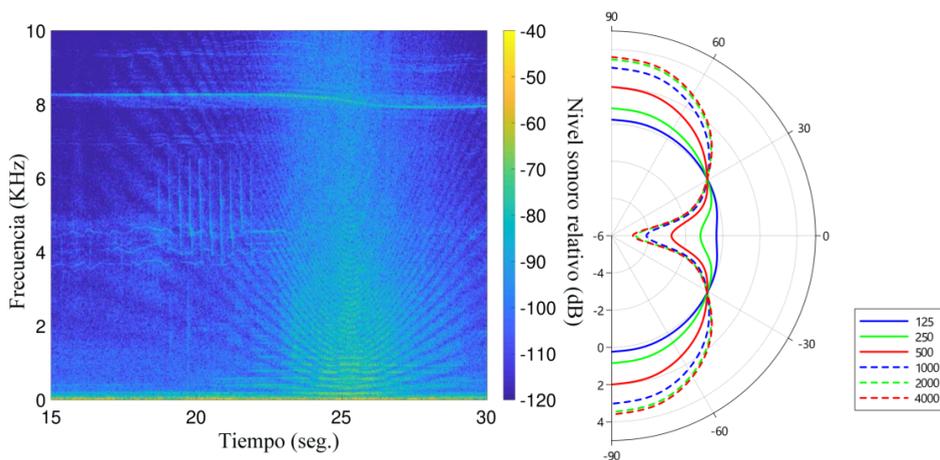
La figura 12.28 muestra la evolución del espectro en frecuencia del vuelo (*fly over*) con una velocidad de 8 m/s del dron F4 a una altura estable de 10 m sobre el suelo, sobrevolando el punto de medida.

A la izquierda, en la parte superior del gráfico, se puede observar el efecto doppler con un pico a 8,3 kHz al acercarse el dron al punto de medida y cómo desciende a 8 kHz al alejarse de él. A la derecha, se muestra el patrón de directividad promedio de los drones analizados. El diagrama de directividad promedio del sonido emitido por los

cuatro drones se ha supuesto simétrico respecto al semiplano horizontal. La directividad mostrada en este trabajo coincide con los resultados de otros autores (Kloet, Watkins, & Clothier, 2017) (Schäffer, Pieren, Heutschi, Wunderli, & Becker, 2021). Como se puede observar, se trata de una radiación tipo dipolo para las bandas de mayor frecuencia que también contienen más energía, mientras que para baja frecuencia el diagrama de radiación tiende a ser un monopolo.



**Figura 12.27.** Izquierda: posiciones de los cinco micrófonos de medida. Derecha: espectro en frecuencia de los cuatro drones analizados.

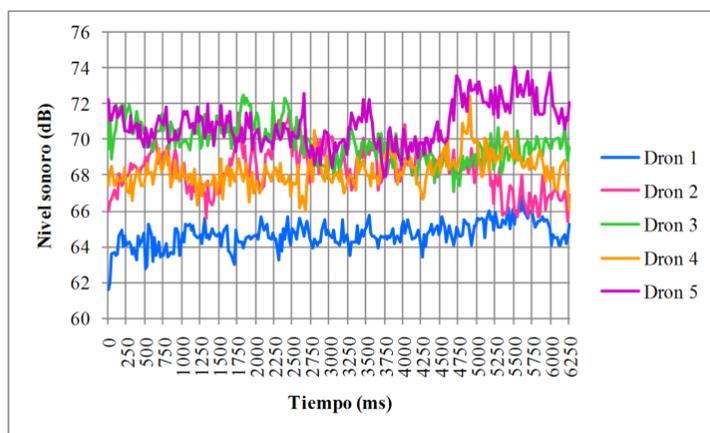


**Figura 12.28.** Izquierda: evolución espectral del dron F4 en vuelo hacia delante. Derecha: patrón de directividad promedio de los drones analizados.

### 12.1.7.2. Medida del ruido de drones en exterior

Para valorar los niveles sonoros en una situación más real, se seleccionan cinco drones de características similares y se mide el nivel de ruido emitido, manteniendo la misma distancia y condiciones de vuelo. En este caso, se han escogido cinco modelos, que tienen los brazos donde se alojan los motores plegables. Esto permite reducir notablemente las dimensiones del equipo en el momento de ser transportado. Los cinco modelos seleccionados son del año 2021. Todos ellos tienen cámaras de vídeo y distintos modos de operación, pensados para poder grabar imágenes desde un punto de vista distinto al que habitualmente usamos cuando viajamos.

Las mediciones se hacen en un campo abierto sin viento, con un nivel de ruido de fondo de 42,8 dBA durante las pruebas. Para comparar el nivel de ruido de los cinco drones, se hace un vuelo estacionario a 4 m de altura. El punto de medida se sitúa a 1,5 m del suelo y a una distancia de 3,5 m del centro del dron, quedando la base de este a 45° respecto al punto de medida. Para caracterizar los distintos ruidos, se muestran los espectros de ruido, los criterios psicoacústicos y la evolución temporal de la señal. La figura 12.29 muestra los niveles sonoros de los cinco drones en vuelo estacionario a 3,5 m del punto de medida.



**Figura 12.29.** Nivel sonoro en vuelo estacionario a 3,5 m y 45° bajo el dron.

Las figuras 12.30 a 12.34 muestran los resultados obtenidos, así como algunas de las características más importantes de cada dron. Se muestra el espectro en tercios de octava (azul) y el ruido de fondo durante las pruebas (rojo).

| Características principales     | Dron 1     |
|---------------------------------|------------|
| Peso despegue (gr.)             | 242        |
| Dimensiones (mm)                | 245x289x56 |
| Tiempo de vuelo (min.)          | 31         |
| Velocidad máxima (Km/h)         | 58         |
| <b>Nivel sonoro</b>             |            |
| Leq (dBA)                       | 65,9       |
| Leq (dB)                        | 65,8       |
| <b>Criterios psicoacústicos</b> |            |
| Sonoridad                       | 24,32      |
| Agudeza                         | 2,33       |
| Fluctuación                     | 2,28       |
| Rugosidad                       | 3,17       |

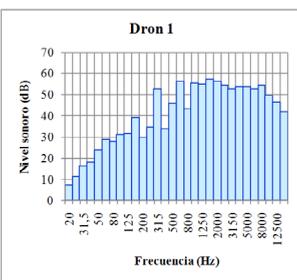


Figura 12.30. Resultados para el dron 1.

| Características principales     | Dron 2     |
|---------------------------------|------------|
| Peso despegue (gr.)             | 249        |
| Dimensiones (mm)                | 160x202x55 |
| Tiempo de vuelo (min.)          | 30         |
| Velocidad máxima (Km/h)         | 47         |
| <b>Nivel sonoro</b>             |            |
| Leq (dBA)                       | 69,5       |
| Leq (dB)                        | 69,4       |
| <b>Criterios psicoacústicos</b> |            |
| Sonoridad                       | 27,7       |
| Agudeza                         | 2,43       |
| Fluctuación                     | 2,16       |
| Rugosidad                       | 4,71       |

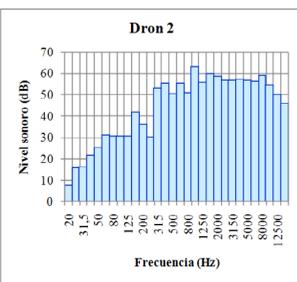


Figura 12.31. Resultados para el dron 2.

| Características principales     | Dron 3     |
|---------------------------------|------------|
| Peso despegue (gr.)             | 907        |
| Dimensiones (mm)                | 322x242x84 |
| Tiempo de vuelo (min.)          | 31         |
| Velocidad máxima (Km/h)         | 72         |
| <b>Nivel sonoro</b>             |            |
| Leq (dBA)                       | 71         |
| Leq (dB)                        | 71,7       |
| <b>Criterios psicoacústicos</b> |            |
| Sonoridad                       | 33,13      |
| Agudeza                         | 2,14       |
| Fluctuación                     | 1,6        |
| Rugosidad                       | 5,58       |

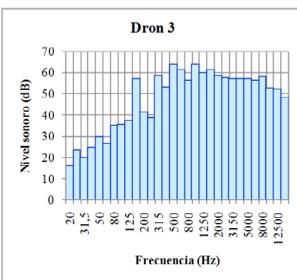


Figura 12.32. Resultados para el dron 3.

| Características principales     | Dron 4     |
|---------------------------------|------------|
| Peso despegue (gr.)             | 570        |
| Dimensiones (mm)                | 183x253x77 |
| Tiempo de vuelo (min.)          | 34         |
| Velocidad máxima (Km/h)         | 68         |
| <b>Nivel sonoro</b>             |            |
| Leq (dBA)                       | 69,4       |
| Leq (dB)                        | 70,4       |
| <b>Criterios psicoacústicos</b> |            |
| Sonoridad                       | 31,07      |
| Agudeza                         | 2,08       |
| Fluctuación                     | 2,34       |
| Rugosidad                       | 5,19       |

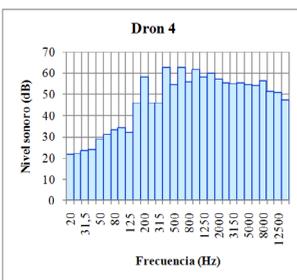


Figura 12.33. Resultados para el dron 4.

| Características principales     | Dron 5     |
|---------------------------------|------------|
| Peso despegue (gr.)             | 768        |
| Dimensiones (mm)                | 204x106x73 |
| Tiempo de vuelo (min.)          | 35         |
| Velocidad máxima (Km/h)         | 65         |
| <b>Nivel sonoro</b>             |            |
| Leq (dBA)                       | 72,1       |
| Leq (dB)                        | 72,7       |
| <b>Criterios psicoacústicos</b> |            |
| Sonoridad                       | 36,49      |
| Agudeza                         | 2,28       |
| Fluctuación                     | 1,28       |
| Rugosidad                       | 5,54       |

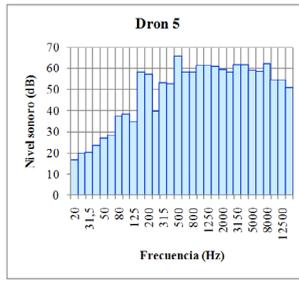


Figura 12.34. Resultados para el dron 5.

Se constata que, a mayor peso del dron, mayor nivel sonoro. El mayor peso requiere una fuerza de sustentación mayor y eso se puede conseguir de varias maneras. El diámetro de las palas para los modelos más pesados es la solución más usual para aumentar la sustentación. El mayor diámetro de las palas explica el aumento del nivel sonoro. También es usual que entre distintos drones las revoluciones cambien, lo que altera la posición de las tonales en el espectro de señal. La frecuencia de la fundamental de los drones se sitúa entre los 160 Hz (que se corresponde con unas 4.800 rpm) y los 180 Hz (que se corresponde con unas 5.500 rpm).

El sonido percibido en vuelo estacionario y en ausencia de viento debe ser muy estable, con pequeñas fluctuaciones producidas por los pequeños ajustes en el pilotaje para mantener el dron estático en el mismo punto. No obstante, el sonido percibido por los cinco modelos tiene distinta sonoridad. Los drones 1 y 2 tienen un sonido en el que se perciben claramente las componentes tonales, mientras que los drones 3, 4 y 5 presentan un zumbido que sorprende, en el que se pierde la sensación de tonalidad y aparecen bandas de ruido. Esto queda reflejado en la mayor rugosidad del sonido de los drones 3, 4 y 5.

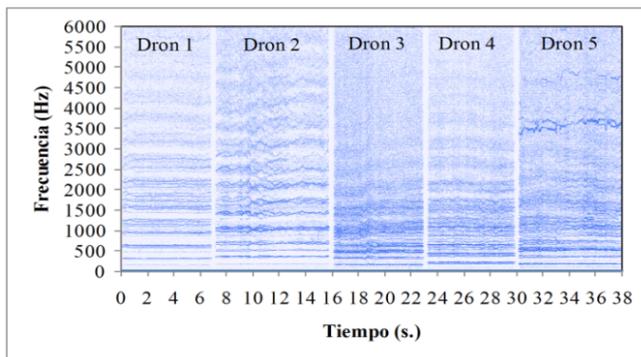


Figura 12.35. Espectrograma de cinco fragmentos correspondientes al vuelo estacionario de cinco drones distintos.

La explicación de la aparición de este zumbido está en el tipo de palas que llevan los drones 3, 4 y 5, que son de bajo ruido. Los extremos están modificados para minimizar las componentes tonales radiadas. La figura 12.36 muestra un ejemplar de estas palas, donde se aprecia como los extremos tienen una doble curvatura hacia atrás y hacia arriba, reduciendo las turbulencias del extremo de la pala que constituye un foco sonoro.

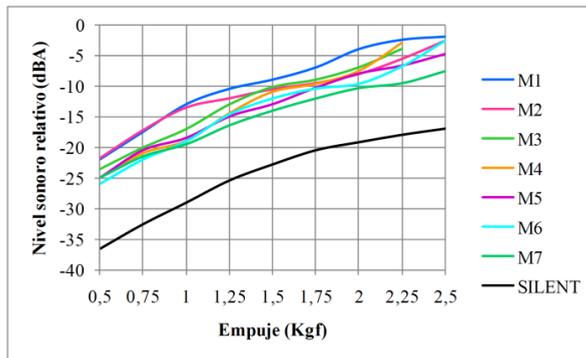


**Figura 12.36.** Ejemplo de palas para dron de bajo ruido. Se observan los extremos curvados para minimizar las turbulencias en ese punto.

### ***12.1.7.3. Reducción del ruido emitido por drones convencionales***

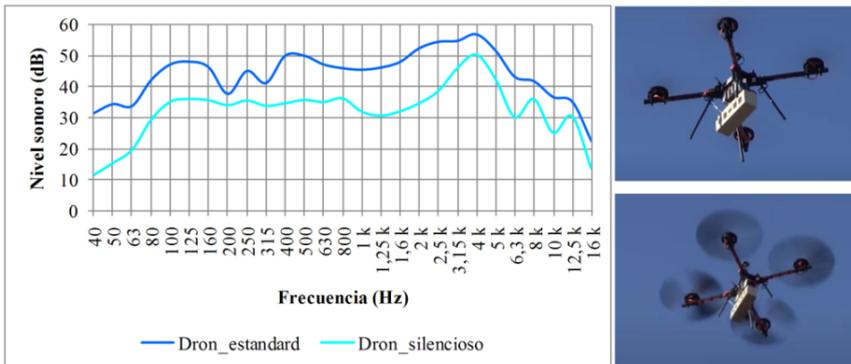
Diversos fabricantes de drones y componentes ofrecen sistemas más silenciosos. El nivel sonoro de un dron depende en gran medida del peso total que desplaza. A mayor peso, mayor fuerza de empuje y, por tanto, mayor nivel de ruido. El origen del ruido está en la interacción de las palas con el aire circundante. Las palas con diámetros más pequeños precisan de un mayor número de revoluciones para conseguir la misma sustentación y eso hace que el sonido sea más agudo. Un primer paso para reducir el nivel de ruido de un dron es aumentar el diámetro de las palas y reducir las revoluciones. Esto puede requerir cambiar los motores. El nivel de ruido también depende del modo de funcionamiento. Por ejemplo, en modo estacionario (el dron permanece estático en un punto), suele ser el más silencioso. La elevación y el avance suelen ser las operaciones más ruidosas. La presencia de viento influye notablemente en el nivel de ruido. Con el viento en contra, el nivel sonoro aumenta apreciablemente.

Dado que las palas son la fuente que origina el ruido, distintos fabricantes ofrecen soluciones bastante eficientes. La figura 12.37 muestra los niveles de ruido de siete modelos comerciales comparados con el prototipo más silencioso. Se puede observar que, a mayor solicitud de empuje, mayor nivel de ruido. Los siete modelos comerciales ofrecen unas prestaciones similares en cuanto al nivel de ruido. La reducción anunciada del nivel sonoro es de 10 dBA respecto al valor promedio de los drones estándar.



**Figura 12.37.** Relación entre el empuje obtenido y el ruido generado por siete modelos comerciales comparados con un prototipo silencioso.

El espectro radiado por el prototipo silencioso se compara con un modelo estándar. La figura 12.38 muestra el espectro y los dos modelos ensayados.



**Figura 12.38.** Espectro en frecuencia en vuelo estacionario. Se usa el mismo dron con la misma carga de 3 kg. Imagen superior derecha: estándar; inferior derecha: silencioso.

Aunque no se aprecia en la foto, el modelo estándar tiene dos aspas, mientras que el prototipo silencioso tiene mayor diámetro, tres aspas y estas giran a menor velocidad proporcionando la misma sustentación.

#### 12.1.7.4. Nuevas tecnologías en drones silenciosos

Las últimas tendencias en el diseño de drones apuntan a soluciones disruptivas que van a ofrecer nuevas prestaciones. El Massachusetts Institute of Technology (MIT) ha

publicado recientemente un artículo sobre una tecnología que permite a un avión volar sin partes móviles y, además, es completamente silencioso, siendo impulsado por el llamado «viento iónico», también conocido como «empuje electro aerodinámico», descubierto en 1920. Esta tecnología no está disponible para su explotación industrial; sin embargo, podría usarse para construir los drones del futuro. La carencia de partes móviles hace que su funcionamiento sea extremadamente silencioso. El diseño del prototipo para demostrar las posibilidades de esta tecnología se asemeja a un planeador grande. El avión, que pesa alrededor de 2 kg y tiene una envergadura de 5 m, lleva una serie de cables delgados que se ensartan como cercas horizontales a lo largo y debajo del extremo delantero del ala del avión. Los cables actúan como electrodos con carga positiva, mientras que cables más gruesos dispuestos de manera similar, que se extienden a lo largo de la parte trasera del ala del avión, sirven como electrodos negativos.

El fuselaje del avión contiene una batería de litio. El dispositivo utiliza una fuente de alimentación que convierte la salida de las baterías a un voltaje suficientemente alto para impulsar el avión. De esta forma, un convertidor de tensión electrónico suministra una tensión de 40.000 V para cargar positivamente los cables. Una vez que los cables están cargados estáticamente, actúan para atraer y eliminar electrones cargados negativamente de las moléculas de aire circundantes, como un imán gigante que atrae limaduras de hierro. Las moléculas de aire que quedan atrás se ionizan nuevamente y, a su vez, son atraídas por los electrodos cargados negativamente en la parte trasera del avión.

A medida que la nube de iones recién formada fluye hacia los cables cargados negativamente, cada ion choca millones de veces con otras moléculas de aire, creando un empuje que impulsa la aeronave hacia adelante.

#### ***12.1.7.5. Molestia generada por vuelo de drones***

Con respecto a la percepción del ruido producido por drones, existe una opinión bastante aceptada de que se trata de un sonido nuevo que, además, presenta componentes tonales. Se ha puesto en marcha un estudio sobre la reacción de las personas al ruido de drones en operaciones habituales (Ivosevic, Ganic, Petosic, & Radisic, 2021). Para ello, un grupo de 31 personas ha escuchado el ruido generado por dos drones distintos en dos modos de funcionamiento habituales. Las mediciones se hacen a una altura de 1,7 m, que correspondería a la altura de los oídos de una persona. Para cada tipo de funcionamiento, se hacen diversas repeticiones, para promediar los niveles sonoros medidos:

- La subida y bajada vertical del dron a 4,5 m de distancia del punto de medida, que representa el despegue y el aterrizaje. El dron se eleva hasta los 10 m de altura y baja hasta llegar cerca del suelo sin tocarlo. La velocidad de subida y bajada es de 5 m/s.

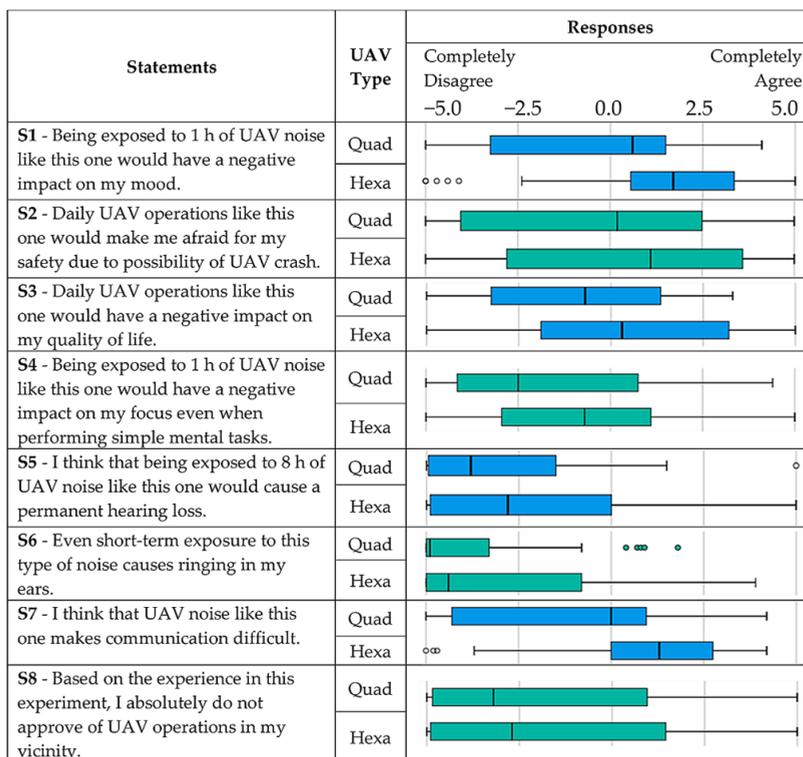
- El vuelo en línea recta a 10 m sobre el punto de medida. La velocidad del dron en línea recta era de 3 m/s.

Los niveles sonoros obtenidos se resumen en la tabla 12.10.

**Tabla 12.10.** Niveles de ruido de dos drones en dos modos de vuelo distintos

| Niveles sonoros Leq (dBA) | Tipo de vuelo |             |
|---------------------------|---------------|-------------|
| Tipo de dron              | Sube-baja     | Línea recta |
| Hexarotor                 | 86,5          | 78,8        |
| Cuadrirotor               | 81            | 70,9        |

Los participantes en el experimento contestan a un cuestionario con ocho preguntas y deben valorar si están de acuerdo o no mediante una escala de -5 a +5. Como se puede apreciar en la figura 12.39, para todas las respuestas, excepto para la tercera, las medianas de ambos tipos de dron se ubican en el mismo lado de la escala.



**Figura 12.39.** Respuestas a la encuesta sobre el vuelo de dos tipos de drones (Ivosevic, Ganic, Petosic, & Radisic, 2021).

Esto implica que más de la mitad de los encuestados compartían la misma actitud hacia ambos drones. Estas actitudes son positivas para afirmaciones sobre el impacto negativo en el estado de ánimo (S1), problemas de seguridad debido a la posibilidad de accidente del dron (S2) y dificultades en la comunicación (S7), mientras que son negativas para afirmaciones sobre el impacto negativo incluso al realizar tareas mentales simples (S4), pérdida auditiva permanente (S5), zumbidos en los oídos debido a la exposición a corto plazo (S6) y desaprobación de las operaciones de drones en las cercanías de las personas (S8). Con respecto a la tercera afirmación, la mayoría de los participantes no está de acuerdo en que las operaciones diarias con cuadricóptero tendrían un impacto negativo en su calidad de vida, mientras que la opinión general para las operaciones con hexacóptero es la contraria.

#### ***12.1.7.6. Reducción del nivel sonoro de los drones***

Los fabricantes de drones, conscientes del problema que el ruido de estos equipos puede generar en la población, están llevando a cabo avances interesantes. Los drones autopilotados disponen de toda la tecnología más avanzada en este momento para el vuelo sin control humano. Los sensores de posición, unidos a técnicas de inteligencia artificial para el reconocimiento de imágenes, permiten que el dispositivo se desplace con soltura por el tejido urbano.

Con respecto al ruido, el elemento que emite más sonido son los extremos de las palas. Hace unas décadas, Aérospatiale desarrolló el helicóptero Dauphin, que tenía la novedad de tener el rotor de cola protegido para minimizar el conocido batido que se produce entre el rotor principal y el de cola y que presenta elevados niveles sonoros cuando la aeronave se acerca a un punto. Los modelos más novedosos de drones autónomos de altas prestaciones tienen un aspecto bastante diferente a los convencionales.

Esencialmente, tienen una carcasa exterior que protege lateralmente a las palas del rotor de cola de la interacción con el rotor principal. De hecho, este elemento es el que reduce apreciablemente el nivel sonoro emitido. La figura 12.40 muestra, a la izquierda, la idea original desarrollada por Aérospatiale, y a la derecha, un dron silencioso de última generación.

#### ***12.1.7.7. Efectos del ruido de drones sobre las personas***

Hasta la fecha (Noviembre 2022), no hay estudios de larga duración de la afectación del ruido producido por los drones sobre la población. La mayoría de los estudios se han basado en los drones de cuatro motores y algunos con seis u ocho motores. En todos los trabajos se miden los niveles sonoros en vuelo estacionario y avanzando, pero no de las operaciones de despegue o aterrizaje.



**Figura 12.40.** Izquierda: primer rotor de cola silencioso de un helicóptero de los años ochenta. Derecha: vista frontal de un dron autopilotado con protección acústica.

Diversos estudios muestran que el grado de molestia producido por los drones durante el vuelo depende del nivel de presión sonora. Se efectuó una prueba psicoacústica como primer paso para determinar los factores asociados con la molestia humana al ruido producido por los aviones con multimotores eléctricos. Se encontró que la respuesta de molestia media varía de manera estadísticamente significativa con el número de hélices y con la inclusión de efectos variables en el tiempo (distintos de las condiciones ideales), pero no difiere significativamente con las revoluciones por minuto (RPM) relativas entre hélices. Esto último es muy sorprendente e indica que el beneficio potencial de un enfoque de dispersión en frecuencia para reducir la molestia puede tener un beneficio limitado. El uso del nivel sonoro, la aspereza y la tonalidad como factores predictivos proporciona intervalos de confianza y predicción aceptables (Rizzi, Palumbo, Rathsam, Christian, & Rafaelof, 2017).

Otros trabajos para valorar el grado de molestia percibido se basan en reproducir sonidos de drones, aeronaves y vehículos automóviles. Los participantes escuchan todos los sonidos y deben clasificarlos por orden de preferencia. Los resultados de estos trabajos muestran que, incluso con el mismo  $L_{Aeq}$ , la preferencia de las muestras de audio de los drones fue un 33 % y un 35 % más baja que la preferencia de las muestras de audio de aeronaves y de vehículos automóviles, respectivamente.

Basado en un modelado lineal multinivel, la interacción de tonalidad y la sonoridad-agudeza son los dos factores psicoacústicos principales que determinan la clasificación de preferencia de las muestras de audio del dron. El efecto de interacción entre las palas del rotor parece influir en la percepción de los sonidos de los drones (Torija & Li, 2020).

La comparación del ruido producido con drones con el ruido de aeronaves muestra que el ruido producido por drones resulta significativamente más molesto que el de las aeronaves a igualdad de nivel de sonoridad. Se constata que la sonoridad, la agudeza y el poder de fluctuación aparecen como indicadores representativos para describir el grado de molestia percibido por las personas (Gwak, Han, & Lee, 2020). Por otro lado, la agu-

deza y la sonoridad generaban diferencias de molestia percibida entre los drones y aviones de reacción. En un segundo experimento de laboratorio, se redujo la incomodidad generada por los drones, al reducir la agudeza y la fuerza de fluctuación. Sin embargo, los parámetros psicoacústicos no lograron explicar las diferencias de incomodidad observadas entre los drones más grandes y los más pequeños. De hecho, se ha encontrado que la preferencia de diferentes sonidos depende en gran medida de la tonalidad, así como de la interacción de la intensidad con la agudeza (Torija & Li, 2020).

Los parámetros psicoacústicos son prometedores para evaluar el ruido de los drones, así como para apoyar la optimización acústica de estos utilizando un «diseño influido por la percepción». De hecho, los drones optimizados acústicamente (emisiones totales reducidas, componentes de alta frecuencia y tonalidad) en la operación de prueba de un servicio de entrega de drones en Australia dieron como resultado solo unas pocas quejas por ruido a pesar de ofrecer miles de entregas.

Además de la molestia, algunos estudios investigan otros efectos sobre la salud. Aparece el concepto de «molestia-mezcla-detección», con la idea de que el ruido de los drones debe integrarse con los paisajes sonoros. Operar drones que no sean acústicamente detectables es poco realista con la tecnología actual. Esta integración sonora supone un compromiso entre la molestia y la detección, en una relación señal-ruido en la que los drones no deben dominar otras fuentes de sonido ambiental. Este concepto podría permitir definir un umbral de «aceptabilidad» por encima del cual el ruido se percibirá como intrusivo (Begault, 2020).

Otros trabajos han investigado sobre el efecto de molestia, el nivel y el agrado del sonido percibido. Los autores estudiaron el efecto de los estímulos acústicos solos, así como de los estímulos acústico-visuales, utilizando grabaciones de vídeo en parques con y sin el dron. La presencia de ruido de drones afectó negativamente a todos los resultados. Esto se debió principalmente al aumento del nivel equivalente ( $L_{Aeq}$ ) resultante, pero también a las características acústicas del dron. La información visual afectó a los diferentes resultados en diversos grados. Si bien apenas influyó en el nivel sonoro percibido de forma subjetiva, se relacionó con una molestia algo menor y un agrado sustancialmente mayor (+47%) de los estímulos. En general, el nivel subjetivo estuvo determinado principalmente por el  $L_{Aeq}$ , la molestia por igual por el  $L_{Aeq}$  y la presencia/ausencia del dron. El agrado dependió más fuertemente del  $L_{Aeq}$  y también (más débilmente) de la presencia/ausencia del dron en la información visual (Torija & Li, 2020).

#### ***12.1.7.8. Reglamento para las operaciones de aerotaxis***

La Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA) ha publicado recientemente el reglamento para la operación de taxis aéreos en las ciudades, la primera pro-

puesta integral para tales regulaciones emitidas en todo el mundo. La nueva propuesta fue sometida a consulta pública hasta finales de septiembre de 2022.

Complementan el material normativo de la Unión Europea existente para operaciones de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), el sistema de gestión de tráfico no tripulado conocido en Europa como U-Space y la certificación de aeronaves con capacidad de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), así como la guía EASA en el diseño de las plataformas para las VTOL.

La EASA introduce los siguientes conceptos con el fin de estandarizar la comunicación en la Unión Europea y para ser utilizados en el desarrollo de requisitos futuros (reglamentos y normas):

- Servicios aéreos innovadores (IAS): conjunto de operaciones o servicios que benefician a los ciudadanos y el mercado de la aviación y que están habilitados por las nuevas tecnologías aerotransportadas; las operaciones o los servicios incluyen tanto el transporte de pasajeros o carga como las operaciones aéreas (por ejemplo, vigilancia, inspecciones, mapeo, redes de telecomunicaciones, etc.).
- Movilidad aérea innovadora (IAM): movilidad aérea segura, protegida y sostenible de pasajeros y carga habilitada por tecnologías de nueva generación, integradas en un sistema de transporte multimodal.
- Movilidad aérea urbana (UAM): subconjunto de operaciones IAM realizadas dentro o fuera de las zonas situadas en entornos urbanos.
- Aeronave con capacidad (VTOL): aeronave propulsada mecánicamente, más pesada que el aire, distinta de un avión o helicóptero, capaz de realizar despegues y aterrizajes verticales por medio de unidades de sustentación o empuje utilizados para proporcionar sustentación durante el despegue y el aterrizaje.

Con estas propuestas, la EASA aplica un enfoque paso a paso que está estrechamente alineado con el desarrollo actual de la industria aeronáutica. Como tal, ciertos desarrollos futuros (por ejemplo, aeronaves VTOL sin piloto humano a bordo) aún no están cubiertos en esta propuesta. Serán abordados por la EASA con propuestas separadas cuando sea necesario y en línea con el progreso tecnológico.

### **12.1.8. Aplicaciones de la inteligencia artificial en el reconocimiento sonoro**

Los algoritmos basados en la inteligencia artificial (IA) se aplican en aquellas tareas o técnicas de tratamiento del sonido que requieran de la toma de decisiones con un comportamiento más humano. Esto implica una fase de aprendizaje del comportamiento en cuanto a la toma de decisiones cuando se procesa una señal de audio. Por ejemplo, en el reconocimiento y la identificación de objetos o de personas por parte de máquinas, la incorporación de algoritmos con IA mejora notablemente los resultados obtenidos.

En acústica, el uso de la IA permite obtener resultados más cercanos a la forma en que el humano percibe el sonido y, sobre todo, cómo este lo clasifica y lo entiende. Las aplicaciones más recientes permiten una mejora en el acierto de comprensión de los mensajes hablados en entornos desfavorables. Podemos encontrar aplicaciones de Amazon, Microsoft, Google y Apple que ofrecen esta función en varios dispositivos a través de servicios como Amazon Echo, Cortana, Google Home y Siri, respectivamente. Un estudio publicado por Pew Research Centre en 2017 muestra que el 46% de los americanos usa los comandos de voz cuando interactúa con máquinas, siendo el dispositivo móvil (42%) el más usado.

El Laboratorio de Computación e Inteligencia Artificial del Massachusetts Institute of Technology, estudia las técnicas que permiten crear robots que «entienden» cómo interactúan los objetos con el mundo. El sonido es una parte importante en dotar de realismo a los robots.

Pero las aplicaciones más interesantes de la IA permiten realizar funciones como el sentido auditivo humano, es decir, identificar sonidos, detectar patrones, como el ritmo musical, que se encuentran inmersos con otros sonidos. Estas prestaciones permiten obtener unas valoraciones objetivas del sonido hasta ahora imposibles de conseguir con los métodos actuales de análisis. Los espectros sonoros, incluida la evolución en el tiempo, no permiten detectar con la misma claridad que el sentido auditivo determinados elementos que los humanos podemos detectar. Los parámetros psicoacústicos tampoco suponen una ventaja en este sentido.

En una medición acústica, el sonómetro no detecta cómo es el entorno de medida y tampoco toma decisiones. Sin embargo, el humano percibe el entorno donde se realiza la medida. Antes de hacer la medición, se suelen evaluar muchos parámetros que pueden influir en mayor o menor grado sobre los resultados. En acústica es muy importante valorar cómo es el entorno y poder tomar las decisiones adecuadas, como alterar el punto de medida previsto o decidir si alarga la medición, en base siempre a unos criterios técnicos que aseguren la veracidad y la exactitud de las mediciones.

El cerebro humano percibe el mundo exterior en tiempo real a través de más de tres millones de fibras nerviosas (más de un millón de fibras por ojo). De manera similar, la percepción es la interfaz de interacción entre un sistema inteligente y el mundo real. Sin capacidades de percepción, sofisticadas y flexibles, es imposible crear sistemas avanzados de IA. Al igual que una persona tiene sistemas visuales, auditivos, gustativos y otros sistemas sensoriales diferentes, la percepción en un sistema de IA por lo general comienza con datos de sensores (posiblemente distribuidos) en varias modalidades y formas. Holísticamente, la IA significa que los equipos electrónicos podrán completar tareas que suelen requerir un nivel de inteligencia más alto que una serie de procesos lógicos.

Estudios recientes demuestran que las personas no evaluamos los sonidos solo por el grado de molestia. Podemos encontrar lugares que no son tranquilos a nivel sonoro, como lugares donde se escucha el trinar de los pájaros, se produce ruido de hojas secas al andar o los saltos de agua; sin embargo, las personas los encuentran mayoritariamente relajantes. El ambiente sonoro agitado puede producir emociones negativas, pero un ambiente sonoro silencioso puede llegar a ser aterrador. En los estudios de impacto acústico, durante muchas décadas se ha tratado de establecer una correlación entre el riesgo de enfermedad y la exposición a niveles sonoros elevados. Sin embargo, desde hace unos años se investiga con mayor precisión, abordando el tema de forma más holística.

#### ***12.1.8.1. Aplicaciones de la inteligencia artificial en las mediciones de sonido***

Las mediciones acústicas más delicadas se producen siempre en situaciones de muy bajo nivel sonoro, donde, a pesar de cumplir la legislación por el nivel de inmisión, las personas afectadas manifiestan escuchar sonidos que les resultan molestos. Estos sonidos suelen ser voces, golpes o el ritmo musical que no siempre están permanentemente presentes. Con las mediciones convencionales no es posible detectar estas señales sonoras y, por tanto, no se puede hacer una valoración precisa de la situación acústica vivida por las personas afectadas.

Con la IA es posible detectar la presencia de estas señales ocultas entre otras, pero que nuestro sentido auditivo localiza perfectamente. Este proceso puede ayudar en la detección de estas señales, dotando al equipo electrónico de medida de funciones más humanas y permitiendo obtener unos resultados más cercanos a los percibidos por las personas. Estos resultados no son simples apreciaciones, sino datos numéricos objetivos a los que se deberá dar una puntuación en el resultado o dictamen final.

#### ***12.1.8.2. Aplicaciones de la inteligencia artificial en el sonido profesional. El sonido HD***

Algunas aplicaciones dotadas de IA se pueden utilizar para crear un habla más limpia eliminando cualquier ruido de fondo de algunos audios. También permiten obtener señales de audio de mayor claridad, permitiendo procesar las grabaciones originales y eliminar ruidos o reverberaciones molestas. Se habla del sonido en alta definición, otra faceta de la mejora de audio que permite mejorar drásticamente la calidad del sonido.

Algunas producciones audiovisuales recientes, siguiendo las últimas tendencias en producción audiovisual, tratan de captar con la mayor naturalidad posible la escena y eso no permite colocar micrófonos de ambiente para recoger los diálogos entre los actores en los lugares correctos. Los micrófonos deben alejarse excesivamente de la escena, lo que redundo en que el espectador no puede escuchar los diálogos. La aplicación de la IA al sonido puede servir, en este caso, para resolver la baja calidad sonora captada por los micrófonos y hacer inteligible lo que originalmente no lo era.

### ***12.1.8.3. Aplicación de la inteligencia artificial para la detección de eventos sonoros***

No se trata de detectar sonidos por nivel o frecuencia, como se hace actualmente: se trata de ir unos pasos más allá, dotando a los sistemas electrónicos de capacidad de decisión. El proyecto AI for Sound dirigido por el profesor Plumbley, que comenzó en mayo de 2020 y finalizará en abril 2025, estudia la aplicación de la IA para la detección de eventos sonoros.

Imaginemos que estamos parados en la esquina de una calle en una ciudad. Cerramos los ojos: ¿qué oímos? Quizá algunos coches y autobuses circulando por la calle, pasos en la acera y voces de gente que pasa a nuestro alrededor. En toda esta secuencia de sonidos, hemos sido capaces de identificar la naturaleza de cada uno de ellos, su posición, su trayectoria y su nivel sonoro y contenido espectral. La IA permite construir sistemas informáticos para analizar y reconocer automáticamente la realidad cotidiana, escenas y eventos sonoros.

Esta nueva tecnología tiene importantes aplicaciones potenciales en seguridad, salud y bienestar, detección ambiental, vida urbana y el sector creativo. El análisis de los sonidos en el hogar ofrece el potencial de mejorar la comodidad, la seguridad y los servicios de salud para los habitantes. En la detección del sonido ambiental, el análisis de los sonidos urbanos ofrece el potencial de monitorizar y mejorar los paisajes sonoros que experimentan las personas en pueblos y ciudades.

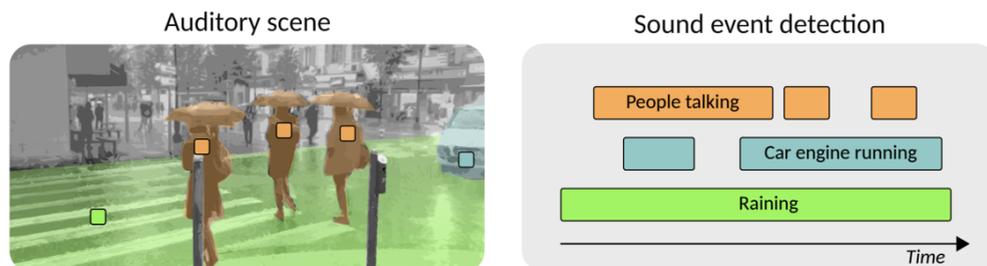
En el sector creativo, el análisis de sonidos también ofrece la posibilidad de hacer un mejor uso de los archivos en museos y bibliotecas y de los procesos de producción para las emisoras, los creadores de programas o los diseñadores de juegos. Se ha pronosticado que el mercado internacional de tecnología de reconocimiento de sonido tendrá un valor creciente, por lo que existe un potencial significativo para que las nuevas herramientas en «IA para el sonido» tengan un beneficio importante para la economía y la sociedad.

Nuestro entorno cotidiano consta de muchas fuentes de sonido que crean una compleja mezcla de señal de audio. La percepción auditiva humana está altamente especializada en segregar las fuentes de sonido y dirigir la atención a la fuente de sonido de interés. Este fenómeno es conocido como el «efecto cóctel» en analogía a la capacidad de poder concentrarse en una sola conversación en una sala ruidosa.

La percepción agrupa la información espectro-temporal en señales acústicas en objetos auditivos, de modo que los sonidos o grupos de sonidos se perciben como un todo coherente (Gaver, 1993). Esto determina, por ejemplo, una secuencia compleja de sonidos que se percibirá como una instancia de evento de sonido único, ya sea «canto de pájaro» o «pasos», por ejemplo.

El objetivo de los métodos de detección automática de eventos de sonido (Sound Event Detection, SED) es reconocer lo que está sucediendo en una señal de audio y cuán-

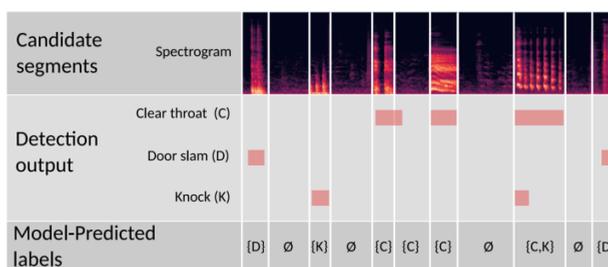
do está sucediendo. En la práctica, el objetivo es reconocer en qué instancias temporales están activos diferentes sonidos dentro de una señal de audio. La figura 12.41 muestra el proceso de detección de eventos sonoros con un ejemplo simple en el que se identifican tres tipos de sonido distintos.



**Figura 12.41.** Ejemplo de detección de eventos sonoros (Mesaros, Heittola, Vistanen, & Plumbley, 2021).

La imagen a la izquierda muestra una escena en la que se aprecia en color verde la fuente sonora de la lluvia; en naranja, las personas que están hablando, y en color azul, vehículos que pasan. A la derecha, un diagrama temporal en el que aparecen de forma secuencial los distintos sonidos, que se solapan entre ellos temporalmente.

La figura 12.42 muestra un ejemplo de cómo derivar etiquetas predichas por el modelo a partir de la salida de detección de eventos de sonido. El modelo parte de la segmentación espectral correspondiente a cada evento sonoro.



**Figura 12.42.** Ejemplo de generación de predicciones del modelo (Zhao, Heittola, & Virtanen, 2020).

La selección del evento en la fase de aprendizaje se realiza de tal manera que se mejora al máximo la precisión del modelo. Para ello, se utiliza el aprendizaje activo donde se usan métodos en los que un algoritmo de aprendizaje selecciona una muestra de audio sin etiquetar de un conjunto de datos y le pide a un anotador que la etiquete.

Se ha encontrado que un sistema de aprendizaje activo requiere solo el 2% de las anotaciones necesarias para los algoritmos de aprendizaje supervisado estándar para alcanzar la misma precisión (Zhao, Heittola, & Virtanen, 2020). Este tipo de enfoque humano en el bucle puede permitir comentarios de los usuarios finales para mejorar los modelos acústicos.

### 12.1.9. Detección de vehículos ruidosos. El radar acústico

Todos los vehículos de propulsión mecánica que circulen por la Unión Europea deben estar homologados. Esto significa que deben superar unas pruebas de verificación entre las cuales está el ruido máximo que puede emitir un vehículo. En consecuencia, salvo por causa de un mal mantenimiento o fallo mecánico, todos los vehículos emiten un ruido que no destaca por encima de los otros.

Sin embargo, la realidad cotidiana es que siguen proliferando vehículos que modifican voluntariamente el escape, con el fin de hacerse notar cuando circulan por la vía pública. Quienes sufren estos ruidos innecesarios son los transeúntes que deambulan en ese momento por la calle y los vecinos residentes en la zona. La presencia de vehículos ruidosos circulando por las calles de una ciudad sigue siendo un problema difícil de controlar por las autoridades.

A raíz de una encuesta realizada por el CidB (Centro de Información sobre el Ruido en Francia) en julio de 2020 sobre la percepción de las emisiones sonoras sobre el territorio, se constató que el 49% de los ruidos más molestos tenían su origen en el ruido de tráfico. De este porcentaje, el 57% correspondía a los vehículos de dos ruedas, el 25% a los vehículos de cuatro ruedas, el 12% a las bocinas y el 6% a los camiones. Un vehículo de dos ruedas atravesando una población como París podría llegar a despertar a más de 10.000 personas.



**Figura 12.43.** Radar acústico para detectar e identificar vehículos ruidosos.

Para dar respuesta a este reto, la asociación Bruitparif ha desarrollado un dispositivo llamado Medusa por su forma peculiar. Dispone de cuatro micrófonos y una cámara

360°. La figura 12.43 muestra el dispositivo colgado de un soporte; normalmente, se usan las farolas de las poblaciones para alojar estos equipos, que deben estar suficientemente separados de la vía pública.



**Figura 12.44.** La trayectoria sonora queda identificada para los vehículos ruidosos.

Estos dispositivos están dotados de unos micrófonos con una disposición particular que permite detectar cuándo se produce una superación del nivel sonoro máximo permitido y, además, puede identificar el vehículo que ha causado ese ruido. Está formado por una agrupación de cuatro micrófonos, que son los encargados de detectar el foco sonoro y «seguirlo» acústicamente, lo que permite identificarlo y medir el nivel de ruido en el momento de producirse la superación de nivel sonoro. La figura 12.44 muestra una secuencia captada por el dispositivo de un vehículo ruidoso. Se puede observar que la trayectoria del foco sonoro queda identificada por unos círculos, donde el color muestra el nivel de ruido medido.

# Capítulo 13.

## Marca sonora (*branding* sonoro)

### 13.1. El sonido como elemento diferenciador de una marca (*branding*)

El *branding* consiste en un conjunto de acciones que se efectúan relacionadas con el posicionamiento, el propósito y los valores de una marca en el mercado. Aunque puede parecer que es una técnica bastante nueva, lo cierto es que los comerciantes del Antiguo Egipto ya vendían sus productos usando elementos que destacaran de sus competidores, es decir, tenían el concepto de marca. Una marca es mucho más que un logotipo y una identidad visual: también se define por el conjunto de sentimientos y experiencias que vive el cliente a partir de los productos o servicios que le ofrecen. Si el cliente está satisfecho con el producto, repetirá. Básicamente, el *branding* trata de destacar las virtudes del producto o servicio para acercarlos a las necesidades del consumidor, de tal manera que este asocie su necesidad con el producto o servicio en cuestión.

Existen diferentes tipos de *branding*:

- *Branding* corporativo: es el *branding* enfocado a marcas y, por tanto, a empresas de todo tipo. En general, cuando se habla de *branding*, normalmente se hace referencia a esta tipología. Esta tipología se usa para el *branding* sonoro.
- *Branding* personal: se centra en trabajar la marca personal, es decir, la manera en que se percibe a una persona gracias a las acciones que lleva a cabo, comunica y transmite.
- *Employer branding*: este concepto algo más novedoso hace referencia a cómo trabajar la marca de un empleado. Por eso, se parte de la base de que el empleado es considerado un embajador de la marca o empresa a la que representa.

En una sociedad donde cada vez hay más competencia y más productos que tratan de acaparar la atención del cliente potencial, ya no es suficiente con ofrecer un producto con un color o una forma adecuados. Los productos tecnológicos siempre emiten al-

gún sonido cuando funcionan. Es frecuente que, cuando se configura alguna máquina mediante un menú en una pantalla, se emitan sonidos que le indican al usuario que los cambios introducidos se han efectuado correctamente. Esos sonidos deben ser adecuados a su función; por tanto, no sirve cualquier sonido. Los sonidos deben ser cortos, pero claramente diferenciables.

### 13.2. Introducción al concepto de *branding* sonoro

Del mismo modo que reconocemos un logotipo, un color o un tipo de letra, es posible identificar unas marcas concretas a través de su «huella auditiva» (Simmons R., 2005). El sonido constituye un camino expresivo de gran poder para transmitir mensajes. El poder de sugestión del lenguaje sonoro permite alimentar la imaginación y, con ello, potenciar una marca. El *branding* auditivo respalda y redefine la comunicación de marca, diseña un entorno sonoro concreto y se erige como un factor esencial en la experiencia del cliente. El *branding* auditivo se define como la creación de las expresiones de marca en sonidos y el consecuente uso estratégico de estas propiedades a través de *touch points* (Jackson, 2003).

El sonido puede transmitir información al cerebro y este procesarla mucho más rápido que otros sentidos. Por ejemplo, se ha establecido que la respuesta del sentido auditivo a los estímulos sonoros es cien veces más rápida que la respuesta a las imágenes. Esta particularidad hace que el sonido sea especialmente atractivo para reforzar el mensaje visual de una marca, por ejemplo. Además, el sentido auditivo nunca deja de recibir estímulos auditivos y está en permanente funcionamiento. Es curioso que una persona dormida pueda recordar el ruido que la ha despertado. Los neurólogos han descubierto que el ruido que entra por nuestros oídos en realidad permanecerá en nuestra mente durante casi cinco segundos antes de que comience a desvanecerse, mientras que las imágenes que llegan a través de los ojos desaparecen en menos de un segundo.

No procesamos el sonido de manera racional porque no llega a la parte racional de nuestro cerebro y afecta a nuestras emociones. Se ha estudiado y probado que la música provoca más respuestas emocionales que visuales. De hecho, la música, al igual que el lenguaje, tiene estructura, progresión y sintaxis. El cerebro humano procesa la sintaxis de la música en la misma área que procesa la sintaxis del lenguaje. El sonido no solo evoca emociones fuertes, sino que también evoca los recuerdos que están ligados a ellos, ya sean positivos o negativos. En el cerebro humano, el sonido puede influir en gran medida en el estado de ánimo del oyente y puede proporcionarnos un contexto para lo que viene a continuación porque los recuerdos vinculados a ese sonido nos lo dicen. Por ejemplo, determinadas películas utilizan la música para «preparar» al espectador de que algo va a suceder, lo que aumenta el impacto emocional que producen las escenas visuales.

La función clave de la marca es comunicar las diferencias entre ellas (dentro del mismo tipo de producto) a los consumidores. En consecuencia, la marca de audio es una medida planificada que se esfuerza por crear una conexión emocional entre el emisor y el receptor, crea señales asociativas para el reconocimiento, comunica mensajes y transfiere una imagen creada por el uso del sonido. La música no solo es compatible con los íconos y eslóganes visuales de la marca en la publicidad, sino que es una herramienta independiente para emocionar una marca de manera efectiva (Alper & Alper, 1990).

Debido a la sobrecarga de información y sensorial diaria a la que estamos sometidos, muchos estímulos visuales no llegan al cliente. Sin embargo, el oído no se puede desconectar o apagar, procesa señales acústicas permanentemente. Las señales acústicas no necesitan ser tratadas conscientemente por el consumidor, funcionan como una «señal periférica» e inducen un mecanismo de actitud por debajo del nivel de procesamiento cognitivo (Petty, Cacioppo, & Schumann, 1983). Además, los mensajes de sonido no necesitan ciertos códigos de idiomas o terminología para ser recordados (Park & Young, 1986).

Agregar sonido o música a una marca aporta otra dimensión a la experiencia de marca, ya que produce «capas adicionales» de respuesta emocional que las imágenes estáticas no pueden reproducir. Pueden ser canciones, melodías, voces o sonidos concretos. El sonido atraviesa la parte racional del cerebro y llega a un nivel más emocional. Los sonidos ayudan a generar y afianzar recuerdos con mayor fuerza que con la imagen. La parte sonora de los estímulos que recibimos constantemente influye en nuestro modo de ser, nuestro estado de ánimo, etc. Esto significa que, si se eligen los sonidos correctos, se puede comunicar y destacar mejor los valores de la marca para el consumidor. Se han realizado estudios sobre cómo los logotipos que quedan en el intervalo de 5-7 notas son los más exitosos desde el punto de vista de la permanencia en el cerebro humano. La figura 13.1 muestra de forma esquemática el proceso general del *branding* sonoro.

Por un lado, el *branding* sonoro tiene como objetivo crear un sonido identitario de la marca. Las cuatro estrategias para conseguir este sonido son: *a)* idear un *jingle* (breve fragmento musical) que sea muy fácil de recordar, *b)* crear un logo sonoro basado en tonos de corta duración que refuerza el logo de la marca, *c)* planear una locución adecuada que transmita un mensaje y *d)* usar sonidos creados específicamente para la campaña publicitaria que pueden acentuar determinados aspectos. Respecto al *branding* sonoro para publicitar una marca, se suele confundir el concepto de *branding sonoro* con *branding musical*. El *branding sonoro* básicamente consiste en una serie de acciones con el sonido para mejorar o potenciar la imagen de la marca. En cambio, el *branding musical* supone el desarrollo de la selección musical como fondo sonoro para los espacios en los que se vende el producto.

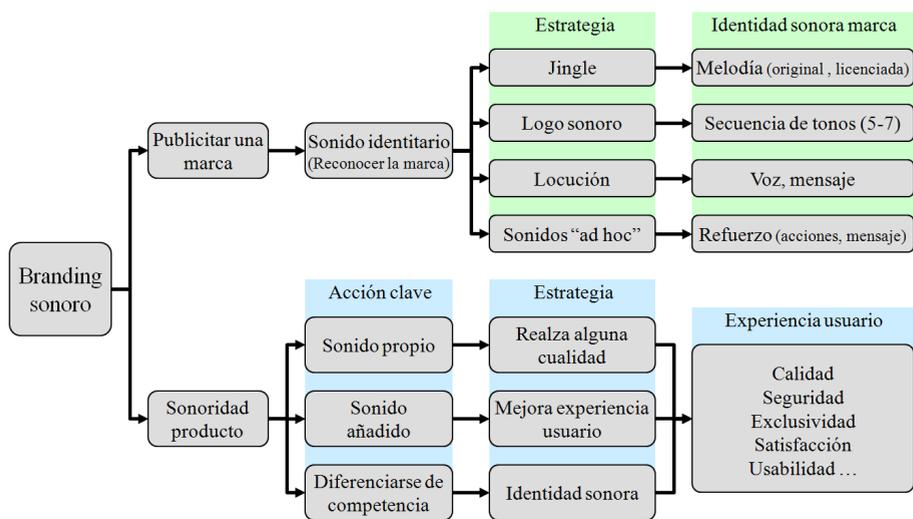


Figura 13.1. Proceso simplificado del branding sonoro.

El *jingle* es el fragmento musical para una campaña publicitaria concreta, mientras que el *branding* sonoro existe para hacer que una marca sea reconocida y para crear una conexión de afecto a largo plazo con la audiencia. El logo sonoro es un breve fragmento musical que representa a una marca; en general, se extrae del tema musical creado para la marca, y también puede no tener relación con el tema musical seleccionado. El logo sonoro posee atributos de personalidad que se alinean con los resultados de la tipología y las características del consumidor.

Por otro lado, el *branding* sonoro se puede orientar hacia la sonoridad del producto cuando eso sea posible. Las acciones clave consisten en decidir cómo se potencia la sonoridad del producto, y eso depende de la tipología del producto. La estrategia de realzar alguna cualidad del sonido propio es adecuada cuando existe la posibilidad de modificar o alterar ese sonido. Cuando eso no es posible, o bien el sonido original es suficientemente bueno, se recurre a la segunda opción, que es añadir un sonido con el objetivo de mejorar la experiencia del usuario. Por último, existe la tercera opción de diferenciarse de la competencia mediante una identidad sonora nueva. En todos los casos, se trata de enriquecerla imagen de la marca a través de mejorar la experiencia del usuario en cuestiones como la seguridad, la calidad, la experiencia (de uso), etc.

El silencio también se puede usar como un «sonido», incluso tiene más fuerza que el propio sonido. A principios de los años ochenta, se presentó un audiovisual publicitario para ser expuesto durante la pausa en un partido de fútbol a través de la pantalla gigante en un estadio. El anuncio publicitario se pasó entre otros anuncios. La cuña publicitaria

fue extremadamente simple a nivel técnico y de realización y, por tanto, muy económica. Imagen en negro durante 10 segundos. Durante este tiempo, las voces y el griterío general dieron paso a un silencio en todo el estadio, el público no entendía qué pasaba y, de repente, apareció en pantalla el logo del anunciante. Este anuncio fue visto por la mayoría de asistentes al partido, mientras que el resto de publicidad apenas fue visto, consiguiendo un retorno de la inversión espectacular. Fue el primer anuncio en usar el silencio como un elemento disruptivo para diferenciarse del resto de anunciantes.

### 13.3. Impactar en el estado de ánimo del comprador

El sonido captado por el oído supone el 10% de la información que llega al cerebro, mientras que las imágenes captadas por la visión representan el 90%. El cerebro procesa el sonido cien veces más rápido que la imagen. Esto produce un desfase en el proceso de asimilación y reconocimiento de la información audiovisual. Sin embargo, en la vida cotidiana no hay desfase, ya que internamente nuestro cerebro «sincroniza» ambas señales. El hecho de que las señales auditivas se procesen más rápido posibilita que estas permanezcan unos 5 segundos en nuestro cerebro, mientras que las imágenes lo hacen durante 1 segundo. Este fenómeno se conoce como *permanencia*. Esta cualidad, junto con el procesado irracional del sonido, configuran la llamada *sonoridad periférica*. El sonido percibido puede actuar sobre la capacidad de decisión o percepción de un producto, de forma sutil y sin que el usuario se aperceba de ello. La sonoridad periférica constituye la base para elaborar el sonido identificativo de una marca (*branding* sonoro).

La conexión entre el sonido y las emociones es fuerte y no debe subestimarse. Las empresas usan esta cualidad para influir en sus clientes todo el tiempo a través de múltiples puntos de contacto. Por ejemplo, los diseñadores de productos dedican mucho tiempo en el diseño del ruido de sus productos (particularmente, los destinados al interior del hogar) y los expertos dedican mucho tiempo a probar el sonido y calificarlo. En su investigación, constataron que los productos para el hogar que alcanzan los 40 dBA comienzan a alterar el estado de ánimo. Una nevera presenta estos niveles, pero la presencia más o menos pronunciada de componentes tonales puede perjudicar la valoración. Los niveles superiores a los 65 dBA de una forma continuada pueden producir hipertensión en la respuesta fisiológica humana, aumento de la secreción de hormonas del estrés y aumento de la densidad de la sangre. Si el sonido de un producto tiene un efecto negativo en los consumidores, estos no volverán a comprar esa marca.

La música que se escucha en un centro comercial puede condicionar la compra de determinados productos, como por ejemplo el vino. Durante un período de 2 semanas, se tocó música francesa y alemana en días alternos en una exhibición de vinos franceses y alemanes en un centro comercial. La música francesa hizo que los vinos franceses se vendieran más que los alemanes, mientras que la música alemana provocó el efecto con-

trario en las ventas de vino francés. Las respuestas a un cuestionario sugirieron que los clientes desconocían estos efectos de la música en sus elecciones de productos (North, Hargreaves, & McKendrick, 1999).

Otro ejemplo lo podemos encontrar en el sector de automoción. Es bien conocido que un motor potente tiene un sonido grave característico. En 2012, BMW introdujo en el modelo M5 un sistema que utiliza sonidos de motor sintetizados para reproducirlos a través del equipo de sonido del vehículo y aumentar así la sensación de baja frecuencia percibida por el conductor, sin contaminar excesivamente en el nivel sonoro exterior radiado. El resultado fue que los usuarios «apreciaban» que el vehículo tenía más potencia y las ventas aumentaron.

En un modelo de Porsche, el aislamiento acústico fue tan perfecto que los clientes se quejaban de que en el interior no «sonaba» a Porsche. El fabricante implantó un sistema similar al usado por BMW para enfatizar el «sonido deportivo» en el interior del vehículo. Esto ha dado origen a que, en los vehículos de alta gama más recientes, el usuario puede seleccionar cómo suena su vehículo en el interior de éste. En algunos modelos, estos ajustes se realizan automáticamente en función del programa de conducción del vehículo seleccionado previamente por el usuario.

#### **13.4. Maridaje entre marca y *branding* sonoro**

Los rasgos personales definen la actitud, la cognición y el comportamiento del consumidor. Asumiendo que el recuerdo es un requisito previo de cualquier efecto publicitario, debe examinarse hasta qué punto los logotipos de audio se «guardarán» en la mente del consumidor. Dependiendo de la edad, dos efectos son plausibles: por un lado, las personas mayores han tenido más contactos en el pasado con la publicidad que mejora el recuerdo; por otro lado, las personas mayores tienen un interés reducido en la publicidad y se puede suponer una disminución del recuerdo. La musicalidad del consumidor es un criterio psicográfico prácticamente olvidado en las publicaciones sobre el comportamiento del consumidor. Algunas pruebas empíricas afirman que la musicalidad debe tenerse en cuenta al analizar los efectos de la marca de audio (Krishnan, Kellaris, & Aurand, 2012).

La alta participación se correlaciona empíricamente con un conocimiento profundo sobre el producto y una búsqueda extendida de información (Mitchell 1979). La participación modera la influencia de la música en la actitud de marca y la intención de compra (Park y Young 1986). La música de fondo muestra mayores efectos cuando la participación cognitiva es baja. Las pruebas a largo plazo muestran que el recuerdo hacia una marca aumenta con una cantidad creciente de contactos con estímulos auditivos (Steward, Farmer, & Stannard, 1990). Inicialmente, el mensaje de audio necesita un

cierto tiempo y varias exposiciones hasta que se asocie con el producto en la mente del consumidor. A partir de ese momento, el mensaje de audio permanece presente en un nivel de conciencia bastante alto durante mucho tiempo.

Una forma de diferenciarse de la competencia, y de captar a los clientes, es que el producto tenga un sonido propio que «suene» distinto al del competidor. Además, ese sonido debe ser el «esperado o deseado» por el consumidor. ¿Y cuál es ese sonido? Lo primero que hay que saber son los deseos del cliente, es decir, en palabras de Bill Gates, «ofrecerle al cliente aquel producto que necesita, pero que no sabe que necesita, y convencerle de que realmente lo necesita y que somos los únicos que se lo podemos ofrecer». Se trata, pues, de crear un sonido adecuado que el cliente «espera» escuchar, pero que no sabe describir. Como decía Steve Jobs, «realmente, el cliente muchas veces no sabe lo que quiere hasta que ve el producto».

Los productos susceptibles de tener un sonido propio son muy diversos: electrodomésticos en general, equipos informáticos, automóviles, alimentación, etc. La incorporación del etiquetado de ruido en los electrodomésticos que solemos tener en casa ha disparado el interés y la sensibilidad del usuario hacia productos más silenciosos. El sonido no se ve y esto, unido a la poca memoria acústica de que disponen los humanos, hace muy difícil poder definir cómo ha de ser el sonido. En algunos electrodomésticos, lo que se busca es un cierto silencio o confort acústico, si bien algunos modelos comerciales, a pesar de ser más silenciosos, emiten un sonido que llega a ser molesto.

Esta situación se ha producido en el ámbito del automóvil con los sistemas de cancelación de ruido. Este dispositivo minimiza el nivel sonoro en la zona cercana donde se pone la cabeza de las bandas con mayor energía, que son las bandas de baja frecuencia y que proceden del motor MCI. Sin embargo, al activar la cancelación activa de ruido, aparecen otros sonidos que no eran perceptibles antes, como el crujido del salpicadero, los ruidos de los muelles del asiento, etc., que pueden llegar a ser más molestos a pesar de tener un menor nivel sonoro.

### **13.5. Rasgos sonoros**

Los rasgos sonoros, o identidad sonora de una marca, es el uso estratégico del sonido para comunicar los valores de la marca. La parte más breve que se asocia a una marca es el logo sonoro. El patrón musical de estos, que es la melodía creada por una secuencia de niveles sonoros, es la propiedad más importante para hacer que un logo sónico sea identificable, reconocible y percibido como tranquilo y agradable. La intensidad y el tono están conectados perceptivamente de acuerdo con la alineación o coherencia de la comunicación multisensorial. Dado esto, la regularidad, la simetría y la continuidad son algunas de las leyes de la teoría de la Gestalt que implicarían direcciones coincidentes,

entre las características acústicas, para aumentar el reconocimiento y el recuerdo de la marca (Bonde & Hansen, 2013).

Los logos sonoros más lentos y con una intensidad en aumento generan una sensación más agradable y de simplicidad que los logos rápidos y con intensidad en disminución. Por su parte, los logos sonoros con tono descendente son percibidos como más ordinarios. Asimismo, la combinación de intensidad en aumento y tono ascendente se percibe como menos emocionante y agresiva que la combinación de intensidad en disminución y tono descendente (Mas, 2019).

### 13.6. La conexión sonido-objetos de marca

Por un lado, la tipología se estructura según el tipo de sonidos y no, por ejemplo, por tipos de marcas. En concreto, se puede hacer una distinción tripartita ampliamente utilizada y aceptada entre música, habla y otros sonidos, salvo la omisión de la música, distinguiendo así entre sonidos verbales no musicales y no verbales (van Leeuwen, 1999). Los sonidos verbales incluyen la prosodia de la voz humana (es decir, la entonación del habla, la velocidad de pronunciación y el acento), así como el simbolismo fonético (es decir, el significado asociativo causado por la estructura fonológica y la fluidez). El término *sonidos no verbales*, a veces denominados *efectos de sonido* (Miller & Marks, 1992), *sonidos auxiliares* (Yorkston, 2010) o *sonidos ambientales* (Özcan & van Egmond, 2009), se refiere a tipos residuales de sonido: sonidos no verbales y no musicales que se derivan o se presentan como derivados del movimiento de objetos físicos.

Por otro lado, la tipología está informada por diferentes tipos de conexiones entre sonidos y objetos. Si bien todos los sonidos abordados en las contribuciones incluidas de alguna manera se conectan a un objeto, la conexión se establece y lleva a cabo de dos maneras diferentes. En primer lugar, el proceso de marca se refiere a los sonidos que se conectan intrínsecamente al objeto en el sentido de que encarnan y emanan del objeto: son sonidos del objeto. Por ejemplo, un refresco embotellado produce sonidos (tintineos, estallidos y efervescencias). Del mismo modo, los sonidos de los lugares, como los entornos de las tiendas, se derivan del propio objeto. En segundo lugar, el proceso de creación de marcas se centra en los sonidos que están conectados de forma extrínseca con el objeto, sobre todo los nombres, los eslóganes y los logotipos. Cualquier tipo de sonido no musical puede conectarse extrínsecamente a los objetos.

La tipología sonora implica que el mismo tipo de sonido se puede conectar a las marcas de dos maneras diferentes y a la inversa, que diferentes tipos de sonido se pueden conectar al objeto de la misma manera. Además, la tipología implica que no todos los sonidos en entornos comerciales están conectados a un objeto. Por ejemplo, los sonidos de un refresco pueden parecer intrínsecos cuando están conectados a una marca particular de refrescos. Sin embargo, los sonidos iguales o similares pueden no aparecer como

marcas sonoras al no calificar para ninguna de las tres categorías cuando aparecen, por ejemplo, como partes discretas del sonido ambiental en un comercial para algún objeto de marca que no sea de refrescos embotellados. Por último, una misma configuración puede incluir más de un tipo de sonido y función.

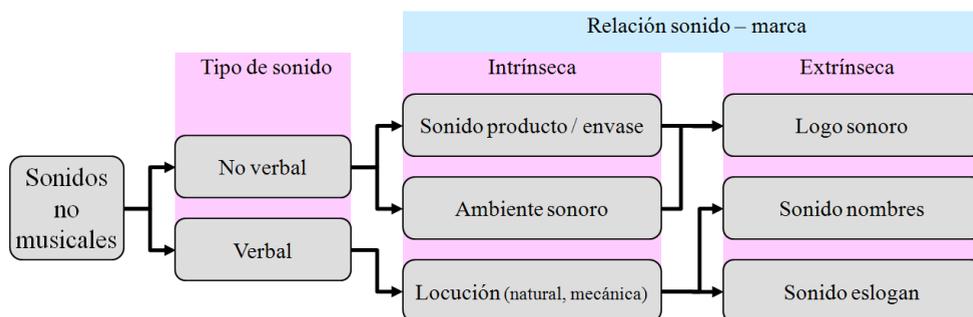
Por ejemplo, una cualidad particular de la voz humana que se usa constantemente para promocionar un refresco en publicidad produce sonidos que se originan desde «fuera» del objeto. Al existir «en nombre de» el objeto, es decir, son sonidos para el objeto, sirven básicamente para fines representativos y de autenticación. Por lo tanto, las dos formas de conexión entre sonidos y marcas, denominadas intrínsecas y extrínsecas, son dos categorías en una clasificación dicotómica de los sonidos de marca, del mismo modo que los sonidos verbales y no verbales representan categorías mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivas del sonido no musical.

### **13.6.1. Conexión intrínseca sonido-marca**

Los sonidos de marca intrínsecos son propiedades de los objetos que percibimos, es decir, se originan a partir de los objetos (Pasnau, 1999). La gran mayoría se concentra en los sonidos intrínsecos de los productos industriales, ya sea con el objetivo de teorizar sobre la calidad del sonido en general o específicamente en relación con la percepción que tienen los consumidores de los sonidos de los productos de marca.

Investigadores principalmente en los campos de la ingeniería de diseño industrial y la psicología experimental han llevado a cabo un número considerable de estudios de sonido de electrodomésticos, informando sobre investigaciones empíricas de diseño de sonido para una amplia gama de productos domésticos eléctricos y no eléctricos para la cocina, para la limpieza y comodidad y para el cuidado personal (Fenko, Schifferstein, & Hekkert, 2011) (Jansen, Egmond, & Ridder, 2012) (Özcan & van Egmond, 2012) (Zampini, Guest, & Spence, 2003).

Los resultados de los distintos trabajos de diseño sonoro son variados y a veces sorprendentes. Mientras que el nivel de ajuste entre el sonido y la apariencia visual de un producto puede estar inversamente relacionado con el grado de reacción de sorpresa (Ludden & Schifferstein, 2007), parece que los nuevos sonidos del producto diseñado corren el riesgo de afectar negativamente a la evaluación global de agrado del producto (Özcan & Schifferstein, 2014). Además, mientras que las grandes firmas pueden disponer de recursos para saber los deseos de sus clientes, y esto les permite diseñar sonidos de productos agradables y que encajan con sus clientes, también se ha demostrado que los sonidos de «alta calidad» para algunos productos más modestos (exprimidores, hervidores de agua y aspiradoras) pueden asociarse con marcas económicas (van Egmond, 2008). La figura 13.2 muestra la posible combinación entre sonidos no musicales y la marca.



**Figura 13.2.** Relación entre sonidos no musicales y la parte intrínseca y extrínseca de los sonidos asociados a la marca.

### 13.6.2. Conexión extrínseca sonido-marca

Los sonidos de marca extrínsecos se refieren a cualquier tipo de característica comunicativa, semiótica o expresiva (verbal o no verbal) que ayuda a construir y promover el carácter distintivo de los objetos de marca. Una publicidad siempre tiene que ir dirigida a un objetivo de público concreto, pero los aspectos culturales de una población son fundamentales. En algunos estudios, Pan y Schmitt (1996) detectan una oposición mutua entre los hablantes nativos de inglés y chino con respecto a los nombres escritos frente a hablados, con referencia al efecto sobre la actitud de marca y la intención de compra. Los autores señalan que, mientras que los hablantes nativos de inglés se ven afectados principalmente por el sonido de la marca, los hablantes nativos de chino se ven más afectados por la escritura de la marca (Pan & Schmitt, 1996). Otros estudios muestran que los nombres presentados auditivamente con correspondencias consistentes entre sonido y ortografía (nombres fáciles de deletrear) mejoran las evaluaciones positivas de la marca y proporcionan un mayor nivel de recuerdo del sonido de la marca (Carnevale, Lerman, & Luna, 2010).

Debido a la necesidad de reducir los costes publicitarios en los medios de comunicación, se han llevado a cabo muchos estudios encaminados a la reducción del tiempo de la publicidad. Esta reducción lleva implícita una limitación del tiempo disponible, lo que acorta el mensaje. Para intentar mantener el mismo mensaje, se recurrió a «acelerar» la locución, en aquellos tiempos (años setenta y ochenta), mediante locutores experimentados. Actualmente, se hace mediante procesado de señal. Se ha demostrado que el uso de un tono de voz más bajo (es decir, una locución pausada y bien vocalizada) conduce a actitudes hacia la marca más favorables (Chattopadhyay, Dahl, Ritchie, & Shahin, 2003). En cambio, el uso de voz comprimida en el tiempo para publicitarse ofrece al consumidor una imagen de mayor incertidumbre (MacLachlan & Siegel, 1980).

## 13.7. Audio UI/UX

Los acrónimos UI y UX significan en inglés User Interface y User Experience, respectivamente, refiriéndose, por un lado, al sonido que acompaña en una aplicación la comunicación con el usuario y, por otro lado, a la experiencia que siente el usuario.

Un diseño de sonido de experiencia del usuario (UX) es un sistema de avisos que indican diferentes cosas a un usuario. Contribuye a una mejor navegación, comprensión del producto por parte del cliente y elecciones más conscientes dentro de la propia aplicación. Algunas aplicaciones que se van actualizando requieren de sonidos que ayuden al usuario a tener información sin necesidad de estar pendiente de la pantalla. Los sonidos UX permiten al usuario:

- Llamar la atención sobre información importante.
- Proporcionar retroalimentación a las acciones del usuario.
- Informar sobre el estado del sistema.
- Proporcionar contexto.
- Ayudar a establecer la personalidad de la aplicación y, a mayor escala, la identidad de la marca.

Los sonidos no están ahí solo para generar un ambiente sonoro. Desempeñan un papel importante al informar al usuario sobre prácticamente todo. Por ejemplo, cuando recibe una alerta en una aplicación, un sonido concreto puede alertar al usuario, informándole para que tome una decisión a tiempo. Pueden informar al usuario sobre una operación exitosa o un error de *software*. Proporciona el contexto necesario sobre la aplicación y su entorno. Por último, incluso pueden volverse icónicos, como el sonido de inicio de Windows o de iOS.

La clave para pensar en audio UX es que no siempre necesitamos sonido, pero siempre es necesario pensar en él como un equivalente útil al diseño visual y otros componentes. En otras palabras, podemos reemplazar ciertos elementos del diseño de la aplicación y tener una opción para reproducir sonido en su lugar, ayudar a los usuarios en una situación en la que la comprensión clásica del diseño no es suficiente.

Incluso las experiencias ópticas apticas pueden fallar a veces, al igual que el sonido. Los usuarios pueden desactivarlos a ambos, pero si implementamos todo y dejamos que los usuarios elijan, pueden ajustar la experiencia a sus propias necesidades. Ese es un nivel de personalización diseñado para el mercado actual. La aplicación de sonidos UX a cada acción y botón puede crear molestias fácilmente, pero equipar la aplicación con comentarios de audio satisfactorios brinda información a las personas y las ayuda a evitar errores.

Podemos dividir los sonidos de la aplicación en dos tipos distintivos: sonidos de interacción y sonidos de notificación. Ambos, además de desempeñar sus papeles distin-



La parte central simboliza el concepto de *branding* sonoro, y los círculos concéntricos externos, las tres capas fundamentales. La primera capa muestra los seis elementos básicos para el diseño sonoro: la voz, la melodía, la armonización, los instrumentos musicales, el catálogo de música y sonidos y los atributos del sonido. El segundo nivel representa la identidad sonora. En este nivel, el usuario recibe la información sonora sin capacidad de poder alterarla. Por último, el tercer nivel son los distintos campos en los que puede actuar el *branding* sonoro y donde el usuario puede tomar decisiones para seleccionar diferentes opciones de sonido o configurar estos a su gusto.

### 13.8. Implantación del *branding* sonoro

Los pasos que se deben seguir para aplicar las técnicas de *branding* a un producto o marca pueden seguir el guion que se muestra seguidamente:

- Comunicación y documentación. Es esencial una comunicación fluida y con total transparencia entre el equipo de diseño sonoro y el fabricante de un producto o propietario de una marca (cliente). Estos deben transmitir el concepto del producto o marca, estableciendo los objetivos que se persiguen, así como detectar los puntos fuertes del producto o la marca. También es fundamental saber cómo está la competencia y conocer el estado del arte del sector. Documentarse es la clave del éxito.
- Análisis de la marca/producto. A partir de toda la documentación y de todas las ideas y los conceptos transmitidos en el apartado anterior, se hace un estudio exhaustivo para obtener un primer boceto en el que se establecen unas líneas maestras que van a definir la dirección del proyecto sonoro. Estos conceptos van a ser la base del diseño sonoro.
- Desarrollo creativo. Es la fase más importante o trascendente del proceso. Aquí se establece la identidad sonora del producto/marca.
- Puesta en común del primer boceto sonoro. Las propuestas sonoras y los logros conseguidos en la fase creativa se exponen al cliente. Es fundamental que por ambas partes se tenga una visión amplia que permita conseguir llegar a puntos de encuentro en los conceptos sonoros que la parte creativa propone. Es importante que en esta presentación se discutan los resultados presentados en aras de definir el proceso que seguir. En este paso se definen puntos clave del diseño sonoro (género musical, locución, tipo de voz, sonidos *ad hoc*, etc.).
- Revisión y personalización del proyecto sonoro. En este proceso se revisan los procesos sonoros en función del punto anterior, buscando la mejor solución que encaje con las propuestas.

- Desarrollo sonoro. A partir de los puntos anteriores, se pasa a la fase de diseño final de los sonidos corporativos o de producto. En esta fase se utilizan sonidos convenientemente modificados, melodías, voces, etc., que se han personalizado para su uso en el diseño sonoro. Dependiendo de la naturaleza del proyecto, esta parte puede requerir más o menos tecnología acústica para su implantación.
- Implantación y soporte. Es la fase final del proyecto. La parte sonora está preparada para acompañar a la imagen visual del producto o marca. En esta fase se consigue el sonido identitario del producto/marca. Se definen diferentes formatos en función de su uso (logo sonoro, publicidad, *jingle*, etcétera).

### 13.9. Aplicaciones del *branding* sonoro

Hay múltiples aplicaciones, desde las más simples hasta las más complejas, tanto de elementos tecnológicos como en alimentación, ropa, transporte, etc. El mundo sonoro abre multitud de posibilidades.

#### 13.9.1. Ejemplo 1: cierre de puerta en un vehículo

Según un estudio americano publicado a mediados de los años ochenta, el 30% de las ventas de vehículos se decidieron en el momento de escuchar el sonido cuando se cierra la puerta del vehículo. Si el sonido transmite calidad y seguridad, la valoración del vehículo es positiva. Estos sonidos son similares entre distintos vehículos; sin embargo, hay algunas diferencias que marcan las distancias entre marcas y modelos. Los fabricantes de automóviles tienen su conocimiento propio, que no divulgan para preservar su firma acústica y evitar ser plagiados. Por este motivo, hay poca información práctica al respecto.

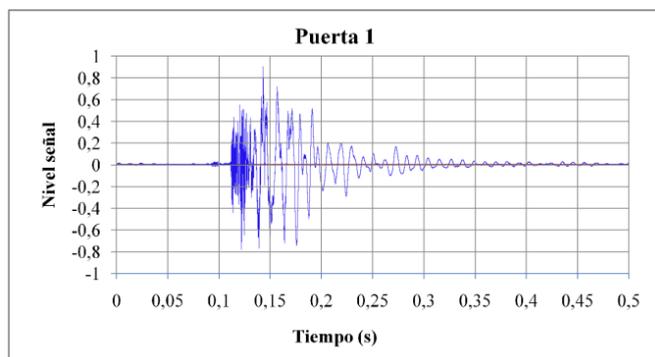
En todos los casos, se trata de una puerta de acero que cierra un volumen de similares dimensiones mediante un ajuste perimetral con una junta de goma. El cierre mecánico se encuentra a un lado de la puerta, salvo puertas especiales de apertura superior. El primer elemento distintivo del sonido es la duración temporal del cierre de la puerta. Este tiempo oscila entre los 180 ms y los 350 ms, aproximadamente. Son señales de corta duración y esto dificulta un análisis exhaustivo.

Otro factor subjetivo importante es la facilidad con que la puerta se cierra. Es bien conocido que hay que ejercer una cierta fuerza para que la puerta quede bien cerrada, sin necesidad de acompañarla. Un exceso de fuerza se interpretará como un producto de baja calidad y poca seguridad. A mayor fuerza aplicada, más deformación de las estructuras, las cuales pueden entrar en oscilación y alargar el fenómeno vibratorio, con lo que se empeora la calidad sonora.

Las preferencias de los usuarios en el cierre valoran positivamente la facilidad de cierre. El típico «portazo» ya no se admite en los vehículos actuales, aunque sea un utilitario. Esto ayuda a mejorar la calidad sonora. El sonido considerado «bueno» debe con-

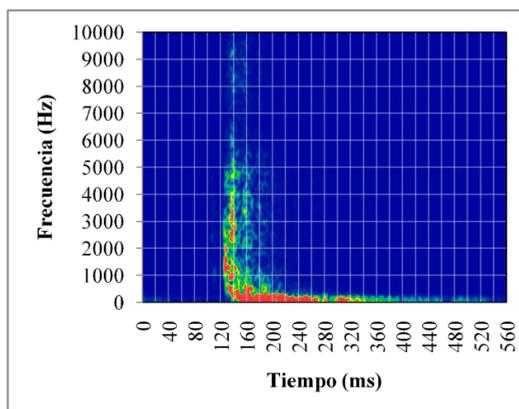
tener baja frecuencia, con un sonido «compacto» y con muy poco contenido de media y alta frecuencia. Por otro lado, el cierre perimetral de la puerta y el del cierre mecánico deben ir acompasados; de lo contrario, aparecen múltiples señales acústicas que empeoran la calidad sonora percibida.

Para ilustrar estos conceptos, se muestran los resultados de dos puertas. La figura 13.4 muestra la señal acústica producida por el cierre de la puerta 1. Se puede apreciar la evolución temporal de la señal y su duración.



**Figura 13.4.** Duración de la señal correspondiente al cierre de la puerta 1.

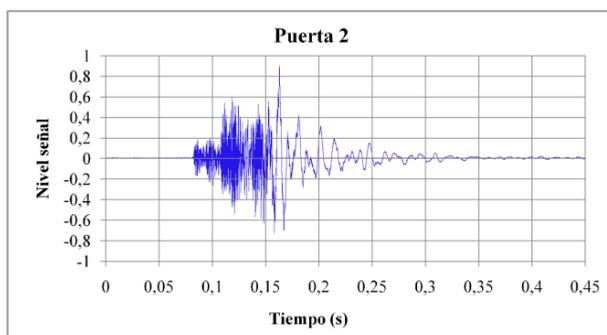
Al principio de la señal (izquierda) aparecen componentes de alta frecuencia, que corresponden al cierre mecánico, y luego una señal de baja frecuencia que corresponde a la puerta cuando cierra perimetralmente, que presenta un tiempo de extinción propiciado por la rigidez estructural de los elementos. La distribución energética de la señal se muestra en la figura 13.5.



**Figura 13.5.** Distribución energética para el cierre de la puerta 1.

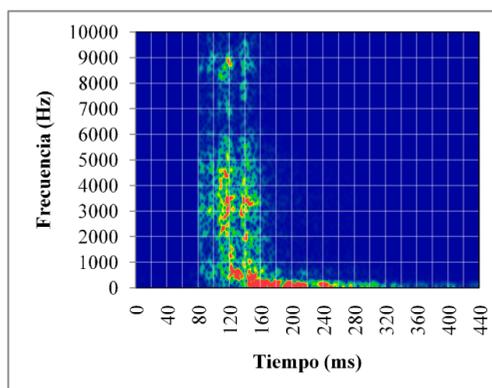
Podemos observar como la parte inferior del gráfico muestra la energía de baja frecuencia en color rojo. Al empezar el cierre (120 ms) aparecen con un retraso de unos 10 ms componentes de alta frecuencia originadas por el cierre mecánico y componentes de baja frecuencia de la puerta. La calidad sonora se considera media, no transmite esa sensación de calidad y seguridad total.

Para contrastar resultados, en la figura 13.6 se muestra la evolución temporal para la puerta 2. Podemos observar como la parte inicial de la señal con contenido de alta frecuencia presenta mayor tiempo. A partir de los 130 ms, se aprecia que la baja frecuencia hace su irrupción claramente.



**Figura 13.6.** Duración de la señal correspondiente al cierre de la puerta 2.

En este caso, comparado con la señal de la puerta 1, se observa una mayor energía a altas frecuencias en la fase inicial del cierre de la puerta. La parte final es muy similar a la anterior, donde solo queda la baja frecuencia que se extingue rápidamente. La duración de ambos fenómenos es similar, 250 ms de la puerta 1 y 270 ms de la puerta 2. La distribución energética para la puerta 2 se muestra en la figura 13.7.

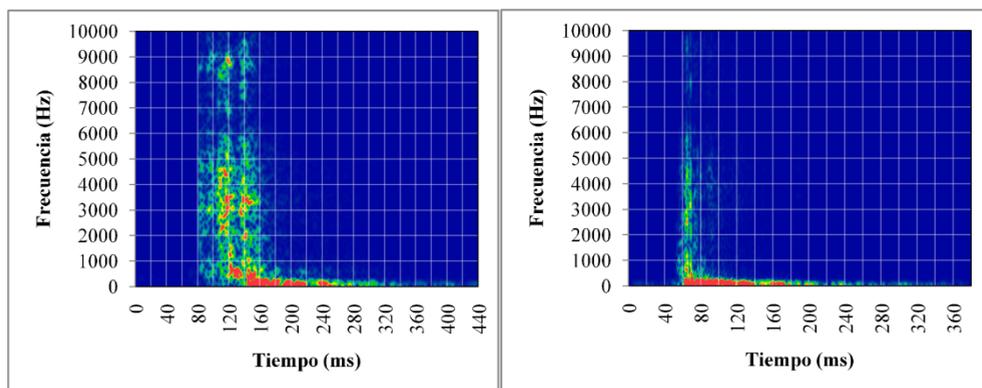


**Figura 13.7.** Distribución energética para el cierre de la puerta 2.

Comparando la figura 13.7 con la figura 13.5, podemos observar como en este caso aparece una doble señal de alta frecuencia, en 120 ms y 140 ms, que denota un cierre en dos fases, lo que, además de alargar la duración de la señal, produce una sensación de un sonido metálico. Se observa también que la duración de la baja frecuencia es menor en este caso. El sonido percibido se considera de peor calidad que el procedente de la puerta 1.

Para poder establecer las preferencias de los clientes por un determinado sonido, hay diferentes técnicas, dependiendo de si el sonido hay que seleccionarlo entre unas muestras o bien hay que crear un nuevo sonido. El caso más asequible es partir de unos sonidos existentes y tratar de detectar cuál de ellos se considera mejor. Cuando el sonido no existe, como es nuestro caso, lo más aconsejable es presentar sonidos similares de diversos vehículos y tratar de discernir cuál de ellos resulta mejor puntuado. Para obtener unos resultados más cercanos a la realidad, las muestras deben grabarse en binaural, o como mínimo en estéreo, para tener la sensación de espacio, aunque el análisis se hace en monoaural. En este caso, la fuente sonora estará en un espacio abierto para evitar la influencia de la reverberación o reflexiones sobre la calidad sonora escuchada. El punto de grabación debe situarse siempre donde se ubica la cabeza del usuario.

Los resultados anteriores de la puerta 2 se comparan con la puerta 3, que se considera la mejor desde el punto de vista acústico para el cierre. La figura 13.8 muestra la energía acústica medida.

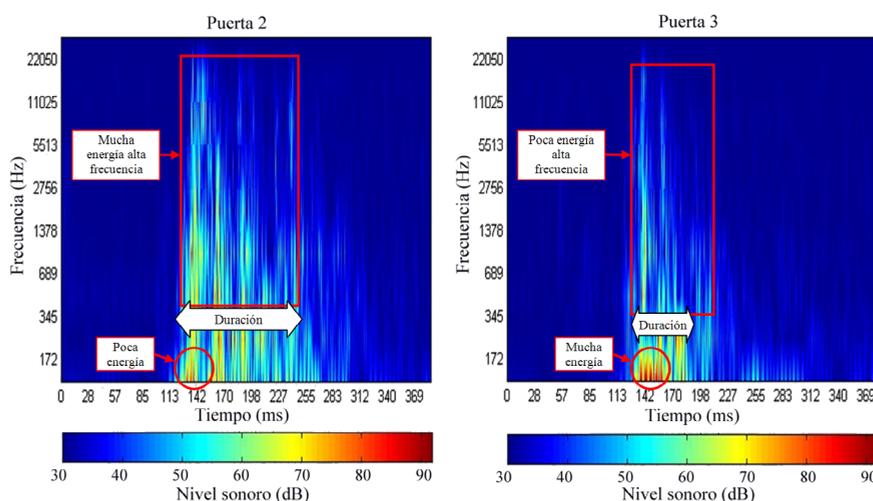


**Figura 13.8.** Espectrograma del cierre de la puerta 2 (izquierda) y 3 (derecha).

Los resultados de la encuesta reflejan que el sonido más apreciado es el de la puerta 3 y el peor valorado es el de la puerta 2. En la encuesta de valoración subjetiva, la puerta 3 se consideró mejor con expresiones como: «sonido que transmite seguridad» o «suena a compacto» o «calidad del cierre (y del coche)». En el aspecto positivo, destacamos tres palabras: seguridad, compacto y calidad. Estos sonidos se relacionan con

un contenido de baja frecuencia y una ausencia aparente de frecuencias medias y altas. La duración excesiva del cierre penaliza la calidad acústica de este. Por tanto, podemos deducir que el buen sonido del cierre debe tener solo bajas frecuencias y con un tiempo ajustado. Así pues, a partir del panel de encuestas, se deduce que el cliente espera escuchar un sonido que le transmita estos valores, que son los que el fabricante, en este caso, debe proporcionar. Nótese que el sonido perfecto no se conoce, pero, a partir de diversos sonidos similares, se pueden deducir algunos aspectos que van a permitir mejorar el sonido del cierre.

En la parte negativa correspondiente a la puerta 2, aparecen las expresiones: «suen a lata», «sonido metálico», «no transmite confianza», «algo suelto». Podemos agrupar los calificativos «suen a lata» y «sonido metálico» y, por otro lado, «no transmite confianza» y «algo suelto». El punto en común es que el sonido es más metálico; algunos encuestados decían que el sonido «resonaba» más. En este punto, hay que saber interpretar ciertas expresiones, ya que el sonido no se ve. Esta resonancia, el sonido metálico, etc., denota un cierre con un exceso de energía en alta frecuencia. La resonancia nos describe un tiempo del sonido excesivo, pero, en este caso, tratándose de señales de corta duración, implica la presencia de repetición o duplicado temporal en frecuencia, lo que, unido a la presencia de señales de media y alta frecuencia, produce una sensación negativa. El sonido que algunos manifiestan como «metálico» o «suen a lata» (puerta 2) tiene su origen en la energía de las componentes de alta frecuencia. Por otro lado, la mayor duración de la señal, junto con lo anterior, transmite la sensación de «resonancia» manifestada por algunos de los encuestados.



**Figura 13.9.** Comparación de los elementos básicos en la mejora de la calidad sonora del cierre de una puerta de automóvil. Izquierda: sonido de baja calidad. Derecha: sonido de gran calidad.

El sonido «compacto» asociado a un cierre de mayor calidad y seguridad se manifiesta en la concentración de energía de baja frecuencia de corta duración (puerta 3). Esta señal también tiene componentes de alta frecuencia, pero con una duración y energía notablemente inferiores al caso de la puerta 2. La figura 13.9 resume los tres aspectos más importantes en cuanto a la mejora de la calidad sonora del cierre de una puerta de automóvil, la duración del sonido y el balance entre el contenido de baja frecuencia y el contenido de alta frecuencia.

A partir de estos datos, se puede definir un perfil sonoro objetivo para conseguir un sonido del cierre de la puerta «deseado» por la mayoría de clientes. En un vehículo, el cierre perimetral va a cargo de una junta de goma. Al cerrar la puerta, las juntas de goma deben dejar salir el aire que queda encerrado en el interior del vehículo.

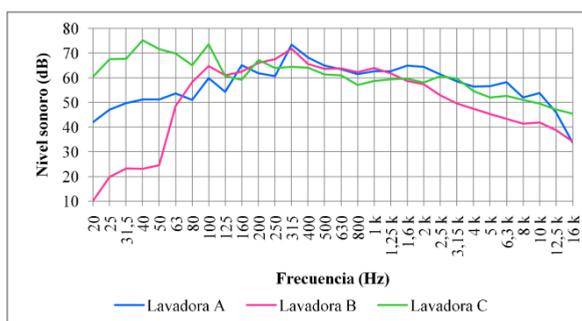
Si esto se consigue, queda un cierre «corto». Si, en cambio, el aire no puede salir libremente, se genera una sobrepresión en el interior del vehículo que alarga el tiempo de cierre, lo que empeora su calidad sonora y, además, dificulta el cierre «suave» de la puerta. Por otro lado, el cierre debe estar muy bien anclado al montante del vehículo y este debe producirse con elementos no metálicos intercalados para evitar el contacto directo entre metales que corten la transmisión de vibraciones de alta frecuencia hacia la chapa del vehículo. Amortiguar los golpes entre piezas metálicas es ventajoso en el aspecto cualitativo.

### **13.9.2. Ejemplo 2: calidad sonora de lavadoras**

La lavadora es un electrodoméstico que tiene distintas fases de operación con diferentes niveles sonoros. En principio, la operación de la máquina debería ser lo más silenciosa posible. El centrifugado y la entrada de agua suelen ser las fases en las que se radia más nivel sonoro. Al poner en marcha la lavadora, puede ser útil escuchar si se activa el cierre y entra agua en la máquina. Sin embargo, pasados unos instantes, ya no es necesario seguir escuchando el ruido de la máquina.

Los distintos fabricantes aplican técnicas correctoras del nivel sonoro, con más o menos éxito, lo que hace que el nivel de ruido radiado sea variable de un fabricante a otro. Seguidamente, se exponen los resultados de un test elaborado con el sonido de tres lavadoras de similares prestaciones en la fase de lavado. La mayoría de las respuestas mostraron preferencia por la lavadora B, siendo la peor la A.

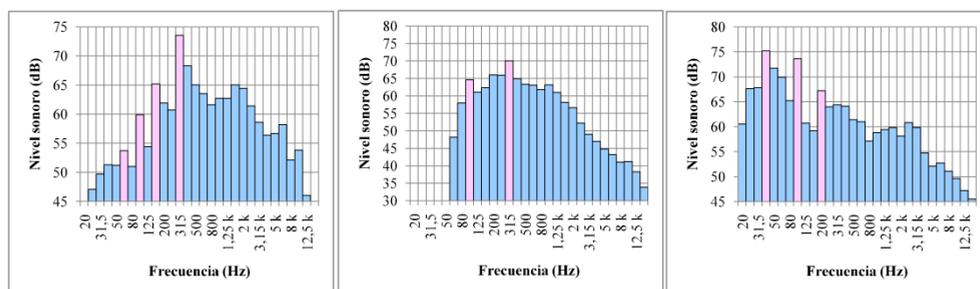
En la descripción o justificación del porqué de la elección, se argumentó mayoritariamente que la lavadora B tenía un ruido más «suave», «menos intrusivo». En el lado opuesto, para la lavadora A, se respondió que el sonido era «más estridente», «más irregular», «se oye el motor». En la figura 13.10 se muestra el nivel sonoro durante el programa de lavado para cada una de las lavadoras analizadas.



**Figura 13.10.** Espectro en frecuencia de tres lavadoras en la fase de lavado.

Podemos observar grandes diferencias en la parte de baja frecuencia, entre los 20 Hz y los 50 Hz. Los niveles sonoros a medias frecuencias son similares y la alta frecuencia de la lavadora B radia menos energía. Con los espectros mostrados, se hace difícil justificar las respuestas. Como el sonido no se ve, se recurre a representarlo en forma gráfica, siendo el espectro la forma más habitual, ya que nos informa del nivel sonoro y su distribución espectral. Cuando se está investigando qué sonido puede resultar más adecuado, resulta ventajoso buscar los defectos del sonido.

No obstante, el gráfico anterior adolece de dos problemas que dificultan «la visión» de los detalles que el oído humano capta. Para tener una mejor visión del fenómeno, es recomendable el uso del gráfico de barras, aprovechando al máximo la dinámica del nivel.



**Figura 13.11.** Espectros comparados de las tres lavadoras. De izquierda a derecha: lavadoras A, B y C, respectivamente. En rosa, se destacan las componentes tonales que desmerecen al sonido percibido.

La figura 13.11 muestra los tres espectros por separado, donde se puede observar que la forma espectral presenta una particularidad destacada en color rosa: la aparición de componentes tonales. Este aspecto es justamente el que reflejan los encuestados con la expresión «se oye el motor». El motor eléctrico no hace ruido, salvo por las partes

móviles de los cojinetes. No obstante, lo que se oye no son los cojinetes, sino el zumbido de las bobinas del estator, sonido producido por el control electrónico de velocidad de giro. Los niveles sonoros medidos correspondientes a los gráficos de la figura 13.10 se resumen en la tabla 13.1.

**Tabla 13.1.** Niveles globales en dBA y dBC de las tres lavadoras durante la fase de lavado

| Nivel sonoro | Lavadora A | Lavadora B | Lavadora C |
|--------------|------------|------------|------------|
| Leq dBA      | 74,5       | 72,1       | 70,8       |
| Leq dBC      | 77,5       | 76,7       | 79,7       |

Comparar los niveles en dBA y dBC suele mostrar la presencia de baja frecuencia en el sonido, aunque en este caso no aporta información interesante. La lavadora B, considerada la más silenciosa, tiene un nivel sonoro superior al de la lavadora C, que se considera más ruidosa. Usando el dBC, tampoco se detecta que la lavadora A es la peor valorada. Los criterios psicoacústicos explicados en el capítulo 9 pueden ayudar a obtener más datos que permitan una valoración objetiva del fenómeno. La tabla 13.2 muestra los resultados.

**Tabla 13.2.** Criterios psicoacústicos aplicados al sonido de lavadora

| Psicoacústicos | Lavadora A | Lavadora B | Lavadora C |
|----------------|------------|------------|------------|
| Agudeza        | 1,74       | 1,35       | 1,56       |
| Fluctuación    | 1,62       | 1,09       | 2,05       |
| Sonoridad      | 44         | 33,1       | 39,74      |

La tabla 13.2 muestra los tres parámetros más interesantes en este caso. La agudeza nos detecta perfectamente el caso B, donde se califica de sonido «suave». La acepción «suave» está relacionada con la ausencia de sonidos estridentes, que se producen en alta frecuencia. La fluctuación para el caso B es el menor de los tres. En este caso, menor fluctuación resulta un factor positivo, dado que la lavadora debe pasar desapercibida. Por último, la sonoridad global para el caso B presenta el valor más bajo, lo que sin duda ayuda a una sensación sonora favorable. La combinación de los factores mostrados puede ayudar a calificar de forma objetiva el nivel sonoro de las lavadoras para la fase de lavado. Por otro lado, el espectro de la lavadora B es más continuo sin presentar discontinuidades de nivel, que producen un efecto negativo en la percepción cualitativa. Se trata, pues, de un sonido más natural y «equilibrado» que no llamará la atención del sentido auditivo.

### 13.9.3. Ejemplo 3: calidad sonora de vehículos de motor

El sonido generado por los vehículos con MCI ha sido motivo de estudio desde hace varias décadas. El propulsor es el elemento que origina todo el ruido del vehículo. El nivel de ruido emitido está relacionado con las revoluciones a las que este gira y el esfuerzo mecánico que debe realizar.

El control del nivel sonoro se ha enfocado desde los inicios del automóvil con dos enfoques distintos. Inicialmente, se trataba de reducir los elevados niveles sonoros que producían los escapes libres, añadiendo elementos que permitían bajar los elevados niveles sonoros. Se ha estudiado y trabajado para reducir los niveles sonoros de los MCI, que se basan en la explosión controlada de un combustible, por lo que la entrada de aire (aspiración) y, especialmente, la salida de gases (escape) son los puntos más ruidosos.

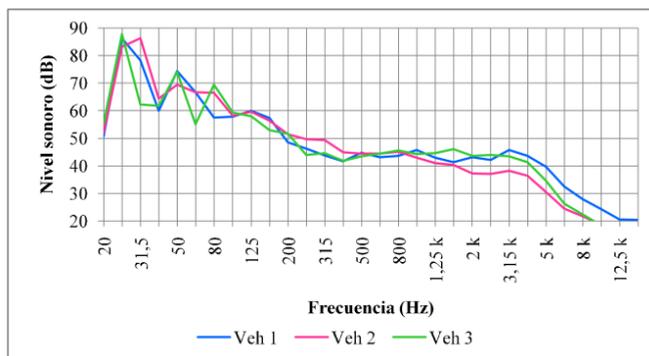
Es a partir de finales de los años sesenta cuando se empieza a legislar y limitar el nivel sonoro radiado. Los fabricantes van viendo que el sonido del escape puede ser un elemento diferenciador de sus productos. Así, la firma Harley-Davidson ofrece un sonido difícil de imitar y que, además, está patentado. El secreto del sonido Harley está en la mecánica del motor. Con otras mecánicas, no se puede imitar el sonido original.

Por otro lado, a partir de los años setenta los fabricantes de automóviles empiezan a personalizar acústicamente sus productos, sobre todo en lo referente al cierre de puertas antes comentado y al ruido originado por el propulsor. Este último tiene dos variantes: el nivel sonoro interior y el exterior. El sector del automóvil usó los límites sonoros que impone la legislación para cumplir con esos valores, pero el gran esfuerzo se destinó a conseguir un sonido diferente de la competencia. Para este cometido, la industria automovilística impulsó el uso de indicadores más cercanos a las sensaciones de las personas, que culminaron en los criterios psicoacústicos aparecidos en la década de los noventa, que permitieron objetivar con datos numéricos las sensaciones que se percibían *in situ* y que las mediciones usando el  $L_{eq}$  dBA no podían ni pueden ofrecer.

Para ilustrar este propósito, se expone un estudio comparativo de tres vehículos de características similares de tres fabricantes distintos. En este trabajo, que se llevó a cabo a mediados de los años noventa, se pretendía que el sonido del vehículo fuera deportivo elegante. Hacer que el sonido del vehículo suene más deportivo es relativamente fácil. Se trata de dejar pasar las frecuencias bajas, aunque eso supone siempre un aumento del nivel sonoro, lo que no siempre es aceptado. Esta solución adoptada por los escapes «tuneados» generalmente se basa en dejar el escape menos silenciado, para que los gases salgan con mayor facilidad, y también más ruido. No hay ningún diseño acústico del sistema, porque se considera un aspecto secundario. El resultado es un sonido agresivo basado en el nivel sonoro, no en su calidad.

El proyecto pretendía conseguir que el sonido de escape fuera un sonido deportivo elegante, que se manifestase ya desde el ralenti, pero que, circulando a mayores revoluciones (por ejemplo, por autopista), el sonido fuera más silenciado. El propósito era crear un sonido para un vehículo de gama media que con el motor al ralenti (parado en semáforo con motor en marcha) consiguiera llamar la atención a los peatones cercanos. La solución consistió en actuar sobre el volumen y la sección interna de las marmitas (silenciosos) y dotar al silencioso final de una válvula de presión. Cuando se pisa a fondo el acelerador, la válvula se abre ligeramente durante unos instantes, generando más sonido.

Para iniciar el proyecto, se exploraron sonidos de otros vehículos que se consideraban representativos como competidores directos de la marca. Las mediciones se llevaron a cabo en ambiente exterior, en un lugar con un nivel de ruido ambiente muy bajo, y se tomaron a una distancia de 3 m del escape, que se consideró representativa para un posible peatón en las cercanías. Los registros se hicieron con un canal. La figura 13.12 muestra el espectro en frecuencia para los tres vehículos seleccionados. Los vehículos 1 y 2 son de la competencia y el vehículo 3 es el que se desea modificar.



**Figura 13.12.** Espectro en frecuencia del sonido de ralenti de tres vehículos similares desde un mismo punto observador.

Se puede apreciar que los tres espectros son muy similares en su conjunto. Para acentuar el carácter deportivo a bajas revoluciones, hay que centrarse en las primeras bandas. A estas frecuencias, y teniendo en cuenta que se trata de motores de cuatro cilindros y cuatro tiempos, se destaca el pico del segundo orden motor, situado entre los 25 Hz y los 31,5 Hz, que corresponde con un régimen de giro entre 780 y 940 rpm, aproximadamente. Los niveles globales obtenidos se resumen en la tabla 13.3.

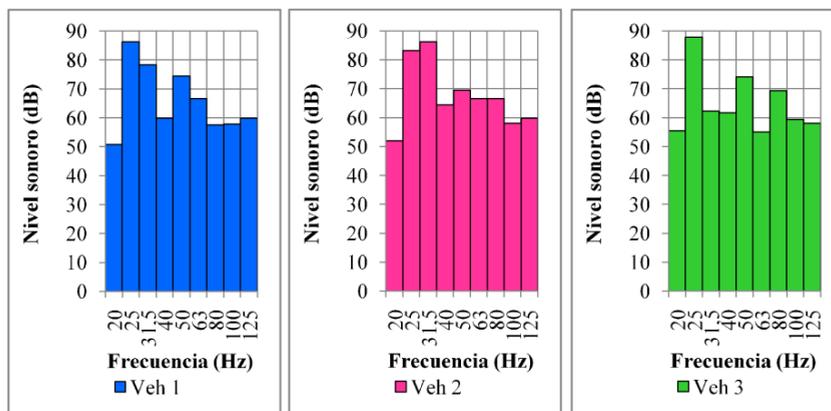
El test sonoro se hace para comparar el vehículo 3 con los de la competencia, que ofrecen unas características mecánicas similares. Como se puede observar, los niveles

globales no ofrecen ninguna información sobre las diferencias de sonidos presentes y claramente perceptibles por el sentido auditivo. Las diferencias inferiores a los 0,8 dBA no son suficientemente perceptibles. Las pruebas iniciales, efectuadas por expertos en sonido del automóvil, muestran que el sonido del vehículo 1 aparece como el mejor, mientras que el vehículo 2 queda en segundo lugar.

**Tabla 13.3.** Valores globales de nivel de ruido de los tres vehículos analizados

| Nivel global | Veh 1 | Veh 2 | Veh 3 |
|--------------|-------|-------|-------|
| Leq dBA      | 56,1  | 55,3  | 56,4  |
| Leq dBC      | 83,3  | 84,8  | 83,9  |

El carácter deportivo de un vehículo se aprecia con el «rugido» del motor a regímenes elevados. Sin embargo, girando al ralentí, lo que se debe percibir es un sonido que denote potencia del motor, y eso se consigue con las pulsaciones del sonido. Estas pulsaciones están relacionadas con la frecuencia de giro del motor. Por tanto, lo aconsejable es hacer una ampliación de la señal espectral centrada en el régimen de giro de los motores al ralentí. La figura 13.13 muestra los espectros de los tres vehículos entre las bandas de 20 Hz a 125 Hz, que es donde se sitúa siempre el segundo orden motor y algunos armónicos.



**Figura 13.13.** Espectro en frecuencia ampliado a las bajas frecuencias para los tres vehículos analizados.

Como se puede apreciar, en el vehículo 1 se destaca claramente el segundo orden motor que está entre las bandas de 25 Hz y 31,5 Hz. Se aprecia también un armónico

situado unos 12 dB por debajo, a una frecuencia de 50 Hz. Para el vehículo 2, la situación es distinta. Se destaca el segundo orden motor a las bandas de 25 Hz y 31,5 Hz, pero el armónico a 50 Hz queda muy desdibujado. El vehículo 3 es similar a los anteriores, pero en este caso, además de la fundamental (segundo orden motor) a 25 Hz, aparecen los dos primeros armónicos a 50 Hz y 80 Hz.

Llegados a este punto, se trata de mejorar el sonido del vehículo 3 para que suene mejor que los de la competencia, dándole un sonido deportivo elegante. Como se ha dicho antes, un sonido deportivo, que refleje la potencia del motor, es relativamente fácil de conseguir a altas revoluciones. No obstante, en este caso estamos al ralentí, donde el motor no puede transmitir su potencia. Al ralentí el segundo orden motor que se sitúa entre los 25 Hz y los 31 Hz no es suficientemente audible, puesto que se trata de una frecuencia extremadamente baja. Si se opta por aumentar el nivel de estas bandas, debería incrementarse su nivel sonoro notablemente para percibir el cambio y el nivel sonoro global se verá muy aumentado, que es un efecto no deseado.

Por otro lado, el sonido resultante será demasiado agresivo y eso resta el carácter elegante que se pretende. En este caso, el término *elegante* debe interpretarse como un sonido sutil que nos transmite la sensación de vehículo potente. Este sonido debe ser suficientemente llamativo para captar la atención de los peatones sensibles y amantes de los vehículos deportivos, pero sin generar incomodidad a los que no tienen esta sensibilidad.

Al tratarse de un sonido sin *run-up* (aceleración), es fácil de modelar y, por tanto, de experimentar en laboratorio y definir los parámetros necesarios. Partiendo, pues, de una base, se añadieron los armónicos y se varió su contenido respecto de la fundamental. Para incrementar la sonoridad sin variar el nivel, se trasladó la energía acústica hacia el primer armónico situado sobre los 50 Hz y el segundo armónico a 80 Hz. Los armónicos impares son más agresivos, mientras que los pares son más agradables para el sentido auditivo. De acuerdo con esta observación, se opta por aumentar el segundo armónico de manera que destaque por encima del resto. El carácter «deportivo» del sonido se obtiene de la fundamental y el tercer armónico. La combinación de las tres componentes de frecuencia produce el sonido deportivo elegante deseado.

Tras varias pruebas en un estudio de grabación profesional con expertos en sonido del automóvil, se definió el perfil espectral deseado. Con estos datos se diseñó el sistema de escape, que dio origen al sonido identificativo de la marca. La figura 13.14 muestra el perfil espectral en las bandas bajas entre el escape original y el prototipo.

Los niveles globales se resumen en la tabla 13.4. Se aprecia que los niveles sonoros del prototipo (veh. 4) respecto del vehículo original (veh. 3) han disminuido, consiguiendo además un sonido más deportivo.

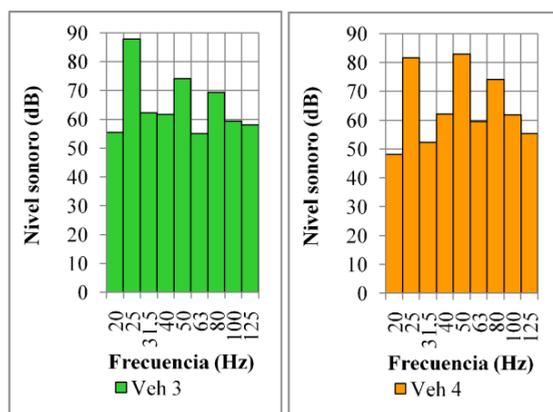


Figura 13.14. Espectro en frecuencia para el vehículo original (veh. 3) y el producto mejorado (veh. 4).

Tabla 13.4. Niveles globales para los vehículos analizados y el prototipo

| Nivel global | Veh 1 | Veh 2 | Veh 3 | Veh4 |
|--------------|-------|-------|-------|------|
| Leq dBA      | 56,1  | 55,3  | 56,4  | 56,2 |
| Leq dBC      | 83,3  | 84,8  | 83,9  | 83,5 |

Los criterios psicoacústicos nos pueden ayudar a valorar la calidad acústica conseguida y comparada con la competencia. La tabla 13.5 muestra la sonoridad, la agudeza y la fluctuación de los sonidos analizados.

Tabla 13.5. Criterios psicoacústicos del sonido de cuatro vehículos

| Psicoacústicos | Veh 1 | Veh 2 | Veh 3 | Veh4  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Sonoridad      | 25,44 | 24,3  | 25,98 | 18,88 |
| Sahrpness      | 0,93  | 0,71  | 0,81  | 0,7   |
| Fluctuación    | 0,92  | 0,85  | 0,82  | 1,06  |

Como se observa, la sonoridad del prototipo (veh. 4) es la más baja y con diferencia del resto de vehículos. Paralelamente, el carácter deportivo elegante viene marcado por un valor elevado de la fluctuación y, a su vez, una disminución de la agudeza del sonido, aspectos que, comparados con el modelo original (veh. 3), se cumplen perfectamente y superan a los de la competencia, que era el objetivo del proyecto.

El nuevo sistema de escape se montó en un vehículo de gama media no deportivo y se circuló con él por distintas calles de Barcelona, observando la reacción de la gente

a su paso. Se constató que el sonido llamaba la atención a una parte de los transeúntes. Cabe destacar que el nivel sonoro no superaba las limitaciones de la legislación de la Unión Europea de 1995. El sistema de escape que se propuso para el modelo de prueba fue adoptado por la casa matriz para el resto de modelos de la marca, siendo el diseño del escape más simple y, por tanto, más económico que los que se montaban hasta ese momento. Este proyecto fue el inicio del sonido personalizado para vehículos de gama media, con un nuevo concepto de sonido deportivo elegante.

## Bibliografía

- Ahlbom, A., Bridges, J., De Jong, W., Hartemann, P., Jung, T., Mattson, M., y otros. (2008). *Health risk from exposure to noise from personal music players*. European Commission.
- Aletta, F., Masullo, F., Maffei, L., Kang, J. (2016). The effect of vision on the perception of the noise produced by a chiller in a common living environment. *Journal of Noise Control Engineering*, 363-378.
- Aletta, F., Oberman, T., Axelsson, Ö., Hui, X., Yuang, Z., Siu-Kit, L., y otros. (2020). Soundscape assessment: towards a validated translation of perceptual attributes in different languages. *Congress Proceedings Internoise 2020*, 10.
- Almo, F. (2014). *Soundscape Ecology*. Springer Netherlands.
- Alper, J., Alper, M. (1990). Music Influences on Mood and Purchase Intentions. *Psychology and Marketing*, 109-133.
- Andersen, J., Moller, H. (1984). Equal Annoyance Contours for Infrasonic Frequencies. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 1-9.
- Anderson, P., Kappel, J., Spangenberg, E. (2009). Aspects of propeller developments for a submarine. *First International Symposium on Marine Propulsors*, 551 - 561.
- Anikin, A., Johansson, N. (2018). Implicit associations between individual properties of color and sound. *Attention, Perception Psychophysics*, 764-777.
- Arons, B. (1992). A Review of The Cocktail Party Effect. *MIT Media Lab*, 16.
- Asensio, C., Pavón, I., De Arcas, G. (2020). Changes in noise levels in the city of Madrid during COVID-19 lockdown in 2020. *The Journal of Acoustical Society of America*, 1748-1755.
- Audoly, C., Rousset, C. (2014). European project for achieving quieter oceans by shipping noise footprint reduction. *Proceedings of Meetings on Acoustics. Underwater Acoustics*, 10

- Axelsson, Ö., Nilsson, M., Berglund, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2836-2846.
- Axelsson, O., Nilsson, M., Hellström, B., Lundén, P. (2014). A field experiment on the impact of sounds from a jet-and-basin fountain on soundscape quality in an urban park. *Landscape and Urban Planning*, 49-60.
- Babisch, W. (2002). The noise/stress concept, risk assessment and research needs. *Noise Health*, 1-11.
- Banberry, S., Berry, D. (2005). Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvement. *Ergonomics*, 25-37.
- Bangjun, Z., Lili, S., Guoqing, D. (2003). The influence of visibility of the source on the subjective annoyance due to its noise. *Applied Acoustics*, 1205-1215.
- Barber, J., Crooks, K., Fristrup, K. (2010). The cost of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology Evolution*, 180-189.
- Barti, R. (2010). *Acústica medioambiental*, vol. 1 y vol. 2. editorial ECU
- Barti, R. (1983). *Aplicación de equipos ionizadores en la mejora de las condiciones de trabajo*. Trabajo investigación no publicado
- Barti, R. (2006). Distintivo de calidad acústica de actividades musicales. *Publicación del Congreso Tecniacústica 2006*, 6.
- Barti, R. (2016). El vehículo eléctrico y la reducción del ruido ambiente en ciudades. *Comunicaciones EuroRegio 2016*, 10
- Barti, R. (1999). *Estudio de los desniveles de sonido entre publicidad y programación en Mass Media. Propuesta de soluciones*. Consell de l'Audiovisual de Catalunya.
- Barti, R. (2007). Evaluation of acoustic noise from musical activities. Is dBA correct? *Proceeding of ICA 2007*, 6.
- Barti, R. (2005). Importancia de la percepción binaural en la medida del ruido. *Publicación Oficial del Congreso Tecniacústica 2005*, 6.
- Barti, R. (2019). *Medida y evaluación del ruido*. Editorial EAE
- Barti, R. (2000). *Modelización del grado de molestia del ruido de automoción*(tesis doctoral). Universidad Ramón Llull.
- Barti, R. (2018). Pequeñas acciones para maximizar el beneficio percibido por la sociedad en las «smart cities». *Ponencias del FIA 2018*. 14
- Barti, R. (1999). Problemas auditivos en la gente joven. *Publicación Oficial Tecniacústica 1999*, 6.
- Barti, R. (1995). Ruido de tráfico en la ciudad. Propuesta de nueva normativa. *Publicación Oficial Tecniacústica 1995*. 8

- Barti, R. (2015). Uso del contraste acústico para evaluar la molestia percibida per el ruido. *Publicación Oficial del Congreso Tecniacústica 2015*, 8.
- Barti, R. (2017). Valoración del confort acústico. *Publicación Oficial Tecniacústica 2017*,14.
- Barti, R., Vida, J. (2018). Uso de indicadores de calidad acústica para la valoración cualitativa de los ambientes sonoros («soundscapes»). *CONAMA 2018*,30.
- Beattie, D., Baillie, L., Halvey, M., McCall, R. (2014). What's Around the Corner?: Enhancing Driver Awareness in Autonomous Vehicles via In-Vehicle Spatial Auditory Displays. *Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational*, 189-198.
- Begault, D. (2020). Psychoacoustic Neasures for UAM Noise in the Context of Ambient Sound. *Vertical Flight Society SF Bay Area Chapter*, 40 .
- Beh, H.C., Hirst, R. (1999). Performance on driving-related tasks during music. *Ergonomics*, 1087-1098.
- Beloc, L. (2017). *De la smart city au territoire d'intelligence*. Publicación del Primer Ministro Francés
- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6-22.
- Berglund, B., Eriksen, C. A., Nilsson, M. E. (2001). *Exploring Perceptual Content in Soundscapes*. Karolinska Institutet and Department of Psychology, Stockholm University,
- Berlung, B., Lindvall, T. (1995). *Community Noise*. Stockholm University
- Bernard, J. (1986). The correspondence between color and sound structure in his music. *Music Perception*, 41-68.
- Björk, E. (1985). The perceived quality of natural sounds. *Acustica*, 57, 185-188.
- Blauer, J. (1983). *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press.
- Bonde, A., Hansen, A. (2013). Audio logo recognition, reduced articulation and coding orientation: rudiments of quantitative research integrating branding theory, social semiotics and music psychology. *Sound Effects-An Interdisciplinary Journal of Sound and Sound Experience*, 112-135.
- Booth, N. K. (1989). *Basic elements of Landscape Architectural Design*. Waveland Press.
- Boyd, I., Brownell, D., Cato, C., Clarke, C., Costa, D., Evans, P., y otros. (2008). The effects of anthropogenic sound on marine mammals: A draft research strategy. *European Science Foundation Marine Borad*, .96

- Brambilla, G., Maffei, L. (2006). Response to Noise in Urban Parks and in Rural Quiet Areas. *Acta Acústica United With Acustica*, 881-886.
- Brederoo, S. G., De Boer, J. N., De Vries, J., Linszen, M. M., Sommer, I. E. (2021). Fragmented sleep relates to hallucinations across perceptual modalities in the general population. *Nature Scientific Reports*, 11: 7735, 9
- Bregman, A.S. (1990). *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. MIT Press. correcto
- Broner, N. (1978). The effects of low-frequency noise on people - a review. *Journal of Sound and Vibration*, 483-500.
- Brooks, B., Schulte-Fortkamp, B., Voigt, K., Case, A. (2014). Exploring our sonic environment through soundscape research and theory. *Acoustics Today*, 30-40.
- Brown, A. L., Rutherford, S. (1994). Using the sound of water in the city. *Landscape Australia*, 103-107.
- Brown, I. (1965). Effect of a car radio on driving in traffic. *Ergonomics*, 475-479.
- Brumm, H., Goymann, W., Deréghaucourt, S., Geberzahn, N., Zollinger, S. (2021). Traffic noise disrupts vocal development and suppresses immune function. *Science Advances*, 5
- Bueno-Enciso, J., Núñez-Escribano, D., Sanz, J. (2015). Cultural transmission and its possible effect on urban acoustic adaptation of the great tit *Parus major*. *Animal Biodiversity and Conservation*, 221-231.
- Button, D., Behm, D., Holmes, M., Mackinnon, S. (2004). Noise and muscle contraction affecting vigilance task performance. *Occupational Ergonomic*, 751-756.
- Cain, R., Jennings, P. (2009). Emotional dimensions of a soundscape. *Internoise 2009*, 11.
- Carlijn, M., Le Clercq, P., Goedegebure, A., Vincent, W., Jaddoe, V., Raat, H., y otros. (2018). Association Between Portable Music Player Use and Hearing Loss Among Children of School Age in the Netherlands. *JAMA Otolaryngology-Head Neck Surgery*, 668-675.
- Carlyon, R.P. (2004). How the brain separates sounds. *Trends in Cognitive Sciences*, 465-471.
- Carnevale, M., Lerman, D., Luna, D. (2010). Hear is the thing: auditory processing of novel non-word brand names. *Sensory marketing: Research in the Sensuality of Products*, 183-198.
- Casado, F., (2022) El impacto en la salud del confinamiento en Barcelona, Viena y Estocolmo. El Pais Blog Planeta Futuro
- Chattopadhyay, A., Dahl, D., Ritchie, R., Shahin, K. (2003). Hearing voices: the impact of announcer speech characteristics on consumer response to broadcast advertising. *Journal of Consumer Psychology*, 198-204.

- Chion, M. (1983). *Guide des objets sonores*. Institut Nationale de l'Audiovisuel, Éditions Buchet.
- Chion, M. (1993). *L'audio-vision*. Éditions Nathan.
- CidB. (2020). Enquête sur l'évolution de la perception du bruit liée à la crise sanitaire. *CidB*, 84.
- Colburn, H., Durlach, N. (1965). Time-intensity relations in binaural unmasking. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93-103.
- Consiglio, W., Driscoll, P., Witte, M., Berg, W. (2003). Effect of cellular telephone conversations and other potential interference on reaction time in a braking response. *Accident Analysis and Prevention*, 495-500.
- Crawford, H., Strapp, C. (1994). Effects of vocal and instrumental music on visuospatial and verbal performance as moderated by studying preference and personality. *Personality and Individual Differences*, 237-245.
- Cummings, J. (2009). Wind Fram Noise Public Perception and Annoyance. *The Acoustic Ecology Institute*, 16
- Dahl, P., Miller, J., Cato, D., Andrew, R. (2007). Underwater Ambient Noise. *Acoustics Today*, 23-33.
- Daró, C. (2013). *Avant-gardes sonores en architecture*. Presses du Reel.
- Davies, H., Teschke, K., Kennedy, S., Hodgson, M., Hertzman, C., Demers, P. (2008). Occupational exposure to noise and mortality from acute myocardial infarction. *Epidemiology*, 25-32.
- Davies, W., Adams, M., Bruce, N., Murphy, J. (2009). The positive soundscape project: A synthesis of results from many disciplines. *Proceeding of Internoise 2009*, 1161-1166.
- De Blas, F., Chías, P. (2009). *Paisajes y objetos sonoros*. Universidad Politécnica de Madrid
- De Coensel, B., Bockstael, A., Dekoninck, L., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., Kang, J., y otros. (2010). Application of a model for auditory attention to the design of urban soundscapes. *Proceedings of the 1st EAA-Euroregio 2010. Congress on Sound and Vibration*, 8
- De Coensel, B., Vanwetswinkel, S., Botteldooren, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *The Journal of Acoustical Society of America*, 148-153.
- De Jong, C., Harmsen, J., Bekdemir, C., Hulskotte, J. (2020). *Reduction of emission and underwater radiated noise for the Belgian shipping sector*. TNO.
- De Kluizenaar, Y., Janssen, S., Vos, H., Salomons, E., Zhou, H., Van den Berg, F. (2013). Road Traffic Noise and Annoyance: A Quantification of the Effect of Quiet Side Ex-

- posure at Dwellings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2258-2270.
- De Waard, D., Brookhuis, K. (1997). On the measurement of driver mental workload. *Traffic and Transport Psychology*, 161-171.
- Devillers, E., Gning, P., Degrendele, K., Le Besnerais, J. (2020). Sound Quality Aspects of Electric Vehicles. *ATZ Worldwide*, 26-31.
- Dragutinovic, N. (2005). Use of mobile phone while driving-effects on road safety. *SWOV Institute for Road Safety Research The Netherlands*, 58
- Durlach, N., Mason, C., Kidd, G., Arbogast, T., Colburn, H. S., Shinn-Cunningham, G. (2003). Note on informational masking. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2984-2987.
- Earshen, J. (1986). Sound measurement: Instrumentation and noise descriptors. *Noise and Hearing Conservation Manual*, 24
- Ecma International. Technical Committee 26. (2019). *Proposal of new parameters, T-TNR and T-PR for total evaluation of multiple tones*. Ecma International.
- Edworthy, J., Waring, H. (2007). The effects of music tempo and loudness level on treadmill exercise. *Ergonomics*, 1597-1610.
- EEA Report-No 22/2019. (2020). *Environmental noise in Europe-2020*. European Environment Agency.
- Eisele, G., Kauth, M., Steffens, C., Glusk, P. (2019). Automotive megatrends and their impact on NVH. *International Stuttgarter Symposium*, 553-569.
- Elder, J., Chou, C. (2003). Auditory Response to Pulsed Radiofrequency Energy. *Bioelectromagnetics Supplement*, 162-173.
- EMSA. (2021). *Sounds: Status of Underwater Noise From Shipping*. European Maritime Safety Agency EMSA
- Engdahl, B., Heine-Strand, B., Aarhus, L. (2020). Better Hearing in Norway: A Comparison of Two HUNT Cohort 20 Years Apart. *Ear Hearing (American Auditory Society)*, 42-52.
- Erdreich, J. (1986). A distribution based definition of impulse noise. *Journal of Acoustical Society of America*, 990-998.
- Etaugh, C., Michals, D. (1975). Effects on reading comprehension of preferred music and frequency of studying to music. *Perceptual and Motor Skills*, 553-554.
- Europa, C. D. (2000). *Convenio europeo del paisaje*. Consejo de Europa
- European Marine Board. (2021). *Addressing underwater noise in Europe*. Kellett P., et al.
- Fabrizio, L., Romei, V., Freeman, E., Lavadas, E., Driver, J. (2011). Looming Sounds Enhance Orientation Sensitivity for Visual Stimuli on the Same Side As Such Sounds. *Experimental Brain Research*, 193-201.

- Fastl, H. (2002). From psychoacoustics to sound quality engineering. *Proceeding of the Institute of Acoustics 2002*, 13
- Fay, J., Puria, S., Steele, C. (2006). The discordant eardrum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 19743-19748.
- Fégeant, O. (2001). *Noise from wind turbines*. KTH Building Sciences.
- Feizi, M., Ghadimi, P., Reza, S., Soroushan, M. (2013). Investigation of Different Methods of Noise Reduction for Submerged Marine Propellers and Their Classification. *American Journal of Mechanical Engineering*, 34-42.
- Fenko, A., Schifferstein, H., Hekkert, P. (2011). Noisy products: does appearance matter? *International Journal of Design*, 77-87.
- Fiebig, A. (2016). Human strategies to provide overall assessments of unsteady sound episodes. *Proceedings Internoise 2016*, 6711-6716.
- Finneran, J., Schlundt, C. (2011). Subjective loudness level measurements and equal loudness contours in bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3124-3136.
- Fitch, W. (2006). The biology and evolution of music a comparative perspective. *Cognition*, 173-215.
- Fligor, B., Cox, L. (2004). Output Levels of Commercially Available Portable Compact Disc Players and the Potential Risk to Hearing. *Ear and Hearing*, 513-527.
- Francis, C., Ortega, C., Cruz, A. (2009). Cumulative consequences of noise pollution: Noise changes avian communities and species interactions. *Current Biology*, 1415-1419.
- Fritz, J., Mishkin, M., Saunders, R. (2005). In search of an auditory engram. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 9359-9364.
- Frye, D. (2007). We Want Cars that Sound like Cars. *Braille Monitor NFB-org*,
- Fuente, A., Qiu, W., Zhang, M., Xie, H., Kardous, C., Campo, P., y otros. (2018). Use of the kurtosis statistic in an evaluation of the effects of noise and solvent exposures on the hearing thresholds of workers: An exploratory study. *The Journal of Acoustical Society of America*, 1704-1710.
- Fuller, R., Warren, P., Gaston, K. (2013). Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may explain why birds sing higher-frequency songs in cities. *Proceedings of the Royal Society B*, 6.
- Furnham, A., Strbac, L. (2002). Music is as distracting as noise: The differential distraction of background music and noise on the cognitive test performance of introverts and extraverts. *Ergonomics*, 203-217.
- Gabriel, K. J. (1981). Interaural correlation discrimination; I. bandwidth and level dependence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1394-1401.

- Gabrielsson, A., Sjögren, H. (1979). Perceived sound quality of sound reproducing systems. *Journal of Acoustic Society of America*, 1019-1033.
- Galbraith G.C. (2008). Deficient brainstem encoding in autism. *Clinical Neurophysiology*, 21
- Galbrun, L., Ali, T. T. (2013). Acoustical and perceptual assessment of water sounds and their use over road traffic noise. *The Journal of Acoustical Society of America*, 227-237.
- Galbrun, L., Calarco, F. M. (2014). Audio-visual interaction and perceptual assessment of water features used over road traffic noise. *Journal of Acoustical Society of America*, 2609-2620.
- Gaver, W. (1993). What in the world do we hear? *Ecological Psychology*, 1-29.
- Geiler, C. (1998). *From Sound to Synapse: Physiology of the Mammalian Ear*. Oxford University Press.
- Genuit, K. (1991). Binaural Technique for the Objective Measurement of Subjectively Perceived Sound Quality. *Congress Proceedings NOISE-CON 91*, 451-458.
- Genuit, K. (2002). Sound Quality Aspects for Environmental Noise. *Congress Proceedings Internoise 2002*, 6.
- Genuit, K., Fiebig, A. (2016). Alternative alert signal concepts and their perceptual implications. *Proceedings of Internoise 45*, 1683-1692.
- Genuit, K., Fiebig, A. (2012). Die Relevanz der Psychoakustik für die E-mobility. *Proceedings DAGA 38*, 85-86.
- Genuit, K., Sottek, R. (2018). *Relative Approach*. Head Acoustics Application Note 02/18. Publicación de Head Acoustics
- Gilbert, H., Shackleton, T., Krumbholtz, K. y Palmer, A. (2015). The Neural Substrate for Binaural Masking Level Differences in the Auditory Cortex. *The Journal of Neuroscience*, 12
- Giudice, S., Jennings, P., Cain, R., Humphreys, L., Song, W. (2010). Perceptual Dimensions for Electric Vehicle Sound Quality. *Proceedings of Internoise 39*, 7012-7021.
- Goley, G., Song, W., Kim, J. (2010). Kurtosis corrected sound pressure level as a noise metric for risk assessment of occupational noises. *The Journal of Acoustical Society of America*, 1475-1481.
- Grau, D., Dreiseitl, H. (2005). *New Waterscapes: Planning, Building and Designing with Water*. Dreiseitl Consulting.
- Griffiths, I., Raw, G. (1989). Adaptation to changes in traffic noise. *Journal of Sound and Vibration*, 331-336.
- Griffiths, T., Warren, J. (2004). What is an auditory object? *Nature Review Neuroscience*, 887-892.

- Guastavino, C. (2006). The Ideal Urban Soundscape: Investigating the Sound Quality of French Cities. *Acta Acustica United With Acustica*, 945-951.
- Guest, H., Munro, K., Prendergast, G., Howe, S., Plack, C. (2017). Tinnitus with a normal audiogram: Relation to noise exposure but no evidence for cochlear synaptopathy. *Hearing Research*, 265-274.
- Gwak, D., Han, D., Lee, S. (2020). Sound quality factors influencing annoyance from hovering UAV. *Journal of Sound and Vibration*, 16
- Hahad, O., Beutel, M., Gori, T., Schulz, A., Blettner, M., Pfeifer, N., y otros. (2018). Annoyance to different noise sources is associated with atrial fibrillation in the Gutenberg Health Study. *International Journal of Cardiology*, 79-84.
- Halfwerk, W., Slabbekoorn, H. (2014). The impact of anthropogenic noise on avian communication and fitness. *Avian Urban Ecology*, 84-97.
- Hancock, P., Lesch, M., Simmons, L. (2003). The distraction effects of phone use during a crucial driving maneuver. *Accident Analysis Prevention*, 501-514.
- Hänninen, O. (2014). Environmental burden of disease in Europe: assessing nine risk factors in six countries. *Environmental Health Perspectives*, 439-446.
- Hartmann, W., Rakerd, B., Koller, A. (2005). Binaural coherence in rooms. *Acta Acustica United With Acustica*, 451-462.
- Heutschi, K., Ott, B., Nussbaumer, T., Welling, P. (2020). Synthesis of real world drone signals based on lab recordings. *Acta Acústica*, 10.
- Hidaka, S., Ide, M. (2015). Sound can suppress visual perception. *Nature. Scientific Reports*, 9
- Hiramatsu, K., Minoura, K., Matsui, T., Miyakita, T., Osada, Y., Yamamoto, T. (2000). An analysis of the general health questionnaire survey around airports in terms of annoyance reaction. *Proceedings Internoise 2000*, 7
- Hirsh, I.J. (1948). The influence of interaural phase on interaural summation and inhibition. *Journal of the Acoustical Society of America*, 536-544.
- Hockey, G. (1970). Effect of loud noise on attentional selectivity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28-36.
- Holmes, E., Hermann, B. (2017). Revisiting the Contribution of Auditory Cortex to frequency-Following Responses. *The Journal of Neuroscience*, 5218-5220.
- Hong, J., Jeon, J. (2013). Designing sound and visual components for enhancement of urban soundscapes. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2026-2036.
- Huiying-Wen, N. S. (2019). Effect of Music Listening on Physiological Condition, Mental Workload, and Driving Performance with Consideration of Driver Temperament. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-12.

- Hume, K. (2010). Sleep disturbance due to noise: Current issues and future research. *Noise Health*, 70-76.
- Hunter, M., Eickhoof, S., Pheasant, R., Douglas, M., Watts, G., Farrow, T., y otros. (2010). The state of tranquility: subjective perception is shaped by contextual modulation of auditory connectivity. *Neuroimage* 53, 611-618.
- Hunton, J., Rose, J. (2005). Cellular telephones and driving performance: The effects of attentional demands on motor. *Risk Analysis*, 855-866.
- Ipsen, D. (2002). The urban nightingale or some theoretical considerations about sound and noise. *Finnish Society for Ethnomusicology*, 1-11.
- Ivosevic, J., Ganic, E., Petosic, A., Radisic, T. (2021). Comparative UAV Noise-Impact Assessments throught Survey and Noise Measurements. *Environmental Research and Public Health*, 20
- Jackson, D. (2003). *Sonic branding: an introduction*. Palgrave Macmillan.
- Jahncke, H., Hygge, S., Halin, N., Green, A. M., Dimberg, K. (2011). Open-plan office noise: Cognitive performance and restoration. *Journal of Environmental Psychology*, 373-382.
- Jansen, R., Egmond, R., Ridder, H. (2012). Sound meets image: freedom of expression in texture description. *Proceedings of SPIE (Society for Optics and Photonics)*, 38
- Jeon, J. Y., Lee, P. J., Kang, J. (2012). Acoustical characteristics of water sounds for soundscape enhancement in urban open spaces. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2101 - 2109
- Jeon, J., Lee, P., Hong, J., Cabrera, D. (2011). Non-auditory factors affecting urban soundscape evaluation. *The Journal of Acoustical Society of America*, 3761-3770.
- Jiang, D., McAlpine, D. y Palmer, A. (1997). Detectability Index Measures of Binaural Masking Level Difference Across populations of Interior Colliculus Neurons. *The Journal of Neuroscience*, 9
- Jiang, P., Lin, J., Sun, J., Yi, X., Shan, Y. (2020). Source spectrum model for mercant ship radiated noise in the Yellow Sea of China. *Ocean Engineering*, 13
- Johnson, K. (2001). The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology*, 455-461.
- Jorge, P. (2022). *La cardiopatía isquémica*. Fundación Española del Corazón.
- Juslin, P., Sloboda, J. (2001). *Music and emotion: Theory and research*. Oxford University Press.
- Kane, B. (2014). *Sound Unseen: Acousmatic Sound in Theory and Practice*. Oxford University Press.
- Kang, J., Zhang, M. (2010). Semantic differencial analysis of the soundscape in urban open public spaces. *Biulding and Environment*, 150-157.

- Kaplan, R., Kaplan, S. (1989). *The experience of nature: A psychological perspective*. Cambridge University Press.
- Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of Environmental Psychology*, 169-182.
- Kardous, C., Shaw, P. (2014). Evaluation of smartphone sound measurement applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 186-192.
- Kardous, C., Shaw, P. (2016). Evaluation of smartphone sound measurement applications (apps) using external microphones-A follow-up study. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 327-333.
- Kawai, K., Kojima, T., Hirate, K., Yasuoka, M. (2004). Personal evaluation structure of environmental sounds: Experiments of subjective evaluation using subjects' own terms. *Journal of Sound and Vibration*, 523-533.
- Kerrick, J., Nagel, D., Bennett, R. (1969). Multiple ratings of sound stimuli. *Journal of Acoustical Society of America*, 1014-1017.
- Kloet, N., Watkins, S., Clothier, R. (2017). Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems. *Internationa Journal of Micro Air Vehicles*, 3-14.
- Kluizenaar, Y., Van Lenthe, F., Visschedijk, A., Zandveld, P., Miedema, H., Mackenbach, J. (2013). Road traffic noise, air pollution components and cardiovascular events. *Noise Health*, 388-397.
- Koch, S., Khomenko, S., Cirach, M., Ubalde-López, M., Baclet, S., Daher, C., y otros. (2022). Impacts of changes in environmental exposures and health behaviours due to the COVID-19 pandemic on cardiovascular and mental health: A comparison of Barcelona, Vienna, and Stockholm. *Environmental Pollution*, 11
- Krahé, D. (2010). Low frequency noise. Strain on the brain. *14th International Meeting on Low frequency Noise and Vibration ans its Control*, 8
- Krahé, D. (2008). Why is sharp-limited low-frequency noise extremely annoying? *Acoustics*, 9
- Kreutz, G., Bongard, S., Rohrmann, S., Hodapp, V., Grebe, D. (2005). Effects of choir singing or listenig on secretory immunoglobulin A, cortisol and emotional state. *Journal of Behavioral Medicine*, 623-635.
- Krishnan, V., Kellaris, J., Aurand, T. (2012). Sonic Logos: Can Sound Influence Willingness To Pay? *Journal of Product and Brand Management*, 275-284.
- Kryter, K. D. (1970). *Effects of Noise on Man*. Academic Press.
- Laberge-Nadau, C. M. (2003). Wireless Telephones and the risk of road crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 649-660.

- Landstrom, U., Lundstrom, R., Bystrom, M. (1983). Exposure to infrasound-Perception and changes in wakefulness. *Journal of Low frequency Noise and Vibration*, 1-11
- Langner, G., Ochse, M. (2006). The neural basis of Pitch and Harmony in the Auditory System. *Musicae Scientiae*, 185-208
- Le Clercq, C., Van Ingen, J., Ruytjens, L., Van der Schroeff, M. (2016). Music-induced Hearing Loss in Children, Adolescents, and Young Adults. *Otology Neurotology*, 1208-1216.
- Le Prell, C., Dell, S., Hensley, B., Hall, J., Campbell, K., Antonelli, P., y otros. (2012). Digital Music Exposure Reliability Induces Temporary Threshold Shift in Normal-Hearing Human Subjects. *Ear and Hearing*, e44-e58.
- Leder H., Beike, B., Oeberst, A. y Augustin, D. (2004). A model of aesthetic appreciation and aesthetic. *British Journal of Psychology*, 489-508.
- Leighton, T. G. (1994). *The Acoustic Bubble*. Academic Press.
- Lennström, D., Lindbom, T., Nykänen, A. (2013). Prominence of tones in electric vehicle interior noise. *Proceedings of Internoise 2013*, 8.
- Lercher, P., Schulte-Fortkamp, B. (2003). Soundscape and community noise annoyance in the context of environmental impact assessment. *Proceeding of Congress Internoise 2003*, 2815-2824.
- Leventhall, G. (2007). What is Infrasound? *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 130-137.
- Leventhall, H., Benton, S., Pelmear, P. (2003). *A review of published research on low frequency noise and its effects*, 89
- Levi, L. (1967). *Sympatho-adrenomedullary responses to emotional stimuli: methodology, physiologic and pathologic considerations*. Karger.
- Levitt, H. y Rabiner, L. (1965). Binaural release from masking for speech and gain in intelligibility. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 601-608.
- Lewis, R. M., Rubel, E. W. (2016). Regeneration of Auditory Hair Cells: A Potential Treatment for Hearing Loss on the Horizon. *Acoustics Today*, 40-47.
- Licklider, J.C.R. (1948). The influence of interaural phase relations upon the masking of speech by white noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150-159.
- Lindberg, S., Backteman, O. (1988). Loudness of impulse and community noises. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Noise Control*, 98-103
- Liu, J., Kang, J., Behm, H., Luo, T. (2014). Effects of landscape on soundscape perception. *Landscape and Urban Planning*, 30-40.
- Ludden, G., Schifferstein, H. (2007). Effects of visual-auditory incongruity on product expression and surprise. *International Journal of Design*, 29-39.

- Lutfi, R. A. (1993). A model of auditory pattern analysis based on component-relative-entropy. *The Journal of Acoustical Society of America*, 3341 - 3401
- Luttik, J. (2000). The value of trees, water and open space as reflected by house prices in the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, 161-167.
- Lynch, J., Gawarkiewicz, G., Lin, Y., Duda, T., Newhall, A. (2018). Impacts of ocean warming on acoustics propagation over continental shelf and slope regions. *Oceanography*, 174-181.
- MacLachlan, J., Siegel, M. (1980). Reducing the cost of TV commercials by use of time compressions. *Journal of Marketing Research*, 52-57.
- Maffei, L., Iachini, T., Masullo, M., Aletta, F., Sorrentino, F., Senese, V., y otros. (2013). The Effects of Vision-Related Aspects on Noise Perception of Wind Turbines in Quiet Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1681-1697.
- Mandel, S., Hanser, S., Secic, M., Davis, B. (2007). Effects of Music Therapy on Health-Related Outcomes in Cardiac Rehabilitation: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Music Therapy*, 176-197.
- Mas, L. (2019). Sonic Logos: An Experimental Design on Sound Features and Brand Personality. *Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social «Disertaciones»*, 125-141.
- Massaro, D. W., Friedman, D. (1990). Models of integration given multiple sources of information. *Psychological Review*, 225-252.
- McKinney, M. L. (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. *BioScience*, 883-890.
- Mehrabian, A., Russell, J. (1974). *An Approach to Environmental Psychology*. MIT Press.
- Mennitt, D., Fristrup, K., Nelson, L. (2015). A spatially explicit estimate of environmental noise exposure in the contiguous United States. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2339-2340.
- Mesaros, A., Heittola, T., Vistanen, T., Plumbley, M. (2021). Sound Event Detection: A Tutorial. *IEEE Signal Processing Magazine*, 67-83.
- Miedema, H., Oudshoorn, C. (2001). Annoyance for transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ Health Perspect*, 409-416.
- Miller, D., Marks, L. (1992). Mental imagery and sound effects in radio commercials. *Journal of Advertising*, 83-93.
- Moller, H., Pedersen, S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health*, 22

- Moore, D., Zobay, O., Mackinnon, R., Whitmer, W., Akeroyd, M. (2017). Lifetime leisure music exposure associated with increased frequency of tinnitus. *Hearing Research*, 18-27.
- Munar, E., Rosselló, J., Mas, C., Morente, P., Quetgles, M. (2002). El desarrollo de la audición humana. *Psicothema*, 247-254.
- Münder, M., Carbon, C. (2021). Howl, whirr, and whistle: The perception of electric powertrain noise and its importance for perceived quality in electrified vehicles. *Applied Acoustics*, 10.
- Münzel, T., Gori, T., Babisch, W., Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European Heart Journal*, 829-836.
- Münzel, T., Sorensen, M., Schmidt, F., Steven, S., Kröller-Schön, S., Daiber, A. (2018). The Adverse Effects of Environmental Noise Exposure on Oxidative Stress and cardiovascular Risk. *National Library of Medicine. Antioxidants Redox Signaling*, 873-908.
- Nagahata, K. (2018). Linguistic issues must resolve before the standardization of soundscape research. *Congress Proceedings Euroise 2018*, 2459-2463.
- Ndrepepa, A., Twardella, D. (2011). Relationship between noise annoyance from road traffic noise and cardiovascular diseases: A meta-analysis. *Noise and Health*, 251-259.
- Neitzel, R., Fligor, B. (2017). *Determination of risk of noise-induced hearing loss due to recreational sound: review*. World Health Organization.
- Nemeth, E., Pieretti, N., Zollinger, S. A., Geberzahn, N., Partecke, J., Miranda, A. C., y otros. (2013). Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may explain why birds sing higher frequency songs in cities. *Proceedings of the Royal Society B*, 6.
- Nilsson, M. E., Berglund, B. (2006). Soundscape Quality in Suburban Green Areas and City Parks. *Acta Acustica United With Acustica* 92, 903-911.
- Nilsson, M., Berglund, B. (2006). On a tool for measuring soundscape quality in urban residential areas. *Acta Acustica United With Acustica*, 938-944.
- Nilsson, M., Berglund, B. (2006). Soundscape quality in suburban green areas and city parks. *Acta Acustica United With Acustica*, 903-911.
- Nilsson, M., Alvarsson, J., Radsten-Ekman, M., Bolin, K. (2010). Auditory masking of wanted and unwanted sounds in a city park. *Noise Control Engineering Journal*, 524-531.
- Nilsson, M., Botteldooren, D., De Coensel, B. (2007). Acoustic indicators of soundscape quality and noise annoyance in outdoor urban areas. *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics ICA 2007*, 6.
- Nixon, K., Parker, M., Elwell, C., Pemberton, A. (2022). Effects of Music Volume Preference on Endurance Exercise Performance. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 9

- NOAA. (2018). *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing*. National Oceanic and Atmospheric Administration U.S.
- Nordtest. (2002). *Prominence of impulsive sounds and for adjustment of LAeq*. Espoo.
- Norman, D.A. (1976). *Memory and Attention*. John Wiley and Sons.
- North, A., Hargreaves, D., McKendrick, J. (1999). The influence of in-store music on wine selections. *Journal of Applied Psychology*, 271-276.
- Nudds, M. (2010). What are auditory objects? *Review of Philosophy and Psychology*, 105-122.
- Núñez-Gómez, P., Ortega-Mohedano, F., Monguí-Monsalve, M., Paul-Larrañaga, K. (2020). *El uso de dispositivos móviles y apps por los niños y las niñas en España*. Universidad Complutense de Madrid, Universidad de Salamanca.
- Oerlemans, S., Sijtsma, P. (2007). Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, 869-883.
- OLEV. (2013). *Driving the Future Today. A strategy for ultra low emission vehicles in the UK*. Crown.
- OMS. (2011). *Uso del teléfono móvil al volante: un problema creciente de distracción del conductor*. Organización Mundial de la Salud
- Ordóñez, R., Aranda de Toro, M., Hammershoi, D. (2010). Time and frequency weightings and the assessment of sound exposure. *Proceedings of Internoise 2010*, 11
- Orini, M., Bailón, R., Enk, R., Koelsch, S., Mainardi, L., Laguna, P. (2010). A method for continuously assessing the autonomic response to music-induced emotions through HRV analysis. *Medical Biological Engineering Computing*, 423-433.
- OsBoCo. (2017). *L'observatoire des usages émergents de la ville*. Chronos.
- Ouis, D. (2002). Annoyance caused by exposure to road traffic noise: an update. *Noise Health*, 69-79.
- Özcan, E., Schifferstein, H. (2014). The effect of (un)pleasant sounds on the visual and overall pleasantness of products. *Proceedings of the colors of care: 9th International Conference on Design and Emotion*, 601-606.
- Özcan, E., Van Egmond, R. (2012). Basic semantic of product sounds. *International Journal of Design*, 41-54.
- Özcan, E., Van Egmond, R. (2009). The effect of visual context on identification of ambiguous environmental sounds. *Acta Psychologica*, 110-119.
- Pan, Y., Schmitt, B. (1996). Language and brand attitudes: impact of script and sound matching in Chinese and English. *Journal of Consumer Psychology*, 263-277.
- Panksepp, J., Bernatzky, G. (2002). Emotional sounds and the brain: the neuro-affective foundations of musical appreciation. *Behavioural Processes* 60, 133-155.

- Park, W., Young, M. (1986). Consumer response to Television Commercials: The Impact of Involvement and Background Music on Brand Attitude Formation. *Journal of Marketing Research*, 11-24.
- Parsons, M., Duncan, A., Parsons, S., Erbe, K. (2020). Reducing vessel noise: An example of solar-electric passenger ferry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3575 - 3583
- Pasnau, R. (1999). What is Sound? *The Philosophical Quarterly*, 309-369.
- Pedersen, E. (2009). Effects of wind turbine noise on humans. *Proceedings of Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, 1 - 11
- Pedersen, E., Persson, K. (2007). Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational Environmental Medicine*, 480-486.
- Pedersen, S. (2007). Indoor measurements of noise at low frequencies. Problems and solutions. *Journal Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 3 - 11
- Perani, D., Saccuman, M., Scifo, P., Spada, D., Andreolli, G., Rovelli, R., y otros. (2010). Functional specializations for music processing in the human newborn brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 4758-4763.
- Peretz, I., Coltheart, M. (2003). Modularity of music processing. *Nature Neuroscience*, 688-691.
- Persson, K., Björkman, M., Rylander, R. (1990). Loudness, Annoyance and dBA in Evaluating Low Frequency Sounds. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 32 - 45
- Petty, R., Cacioppo, J., Schumann, D. (1983). Central and Peripheral Routes to Advertising Effectiveness: The moderating Role of Involvement. *Central and Peripheral Routes to Advertising Effectiveness: The Moderating Role of Involvement*, 135-146.
- Pheasant, R., Horoshenkov, K., Watts, G., Barrett, B. (2008). The acoustic and visual factors influencing the construction of tranquil space in urban and rural environments tranquil spaces-quiet places? *The Journal of Acoustical Society of America*, 1446-1457.
- Pickles, J. (2008). *An introduction to the Physiology of Hearing*. Brill.
- Pollack, I. (1975). Auditory informational masking. *The Journal of Acoustical Society of America*, 57
- Qiu, W., Hamernik, R., Davis, R. (2013). The value of a kurtosis metric in estimating the hazard to hearing of complex industrial noise exposures. *The Journal of Acoustical Society of America*, 2856-2866.
- Qu, F., Kang, J. (2019). Wind turbine noise evaluation and traffic noise masking - a field study in the UK. *The Regional Conference for Sustainable Build Environment*, 12

- Qu, F., Tsuchiya, A. (2021). Perceptions of Wind Turbine Noise and Self-Reported Health in Suburban Residential. *Frontiers in Psychology*, 12
- Quiroga, C., Bongard, S., Kreutz, G. (2009). Emotional and neurohumoral responses to dancing tango argentino. *Music and Medicine*, 14-21.
- Radsten-Ekman, M. (2015). *Wanted Unwanted Sounds. Perception of Sounds from Water Structures in Urban Soundscapes*. Department of Psychology, Stockholm University
- Radsten-Ekman, M., Axelsson, O., Nilsson, M. (2013). Effects of Sounds from Water on Perception of Acoustic Environments Dominated by Road Traffic Noise. *Acta Acustica United With Acustica*, 218-225.
- Rainbault, M., Dubois, D. (2005). Urban soundscapes: Experiences and knowledge. *Elsevier*, 339-350.
- Redelemeir, D. A. (1997). Association between cellular telephone calls and motor vehicle crashes. *The New England Journal of Medicine*, 453-458.
- Ren, X., Kang, J. (2015). Effects of the visual landscape factors of an ecological waterscape on acoustic comfort. *Applied Acoustics*, 171-179.
- Rizzi, S., Palumbo, D., Rathsam, J., Christian, A., Rafaelof, M. (2017). Annoyance to Noise Produced by a Distributed Electric Propulsion High-Lift System. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 17.
- Rodríguez, A. (2015). *Determinación de los umbrales de audición en la población española*. Universidad Autónoma de Madrid.
- Rosenblum, L. (2011). *See What I'm Saying*. W.W. Norton Company.
- Sandberg, U. S. (2012). Adding noise to quiet electric and hybrid vehicles: an electric issue. *Acoustics Australia*, 211-220.
- Sandoval, C. (2002). *Especialización en teoría, métodos y técnicas de investigación social-investigación cualitativa*. ARFO Editores.
- Sbihi, H., Davies, H., Demers, P. (2008). Hypertension in noise-exposed sawmill workers: a cohort study. *Occupational and Environmental Medicine*, 643 - 649
- Schaeffer, P. (1966). *Traité des objets musicaux*. Éditions du Seuil.
- Schaeffer, P. (2017). *Treatise on Musical Objects: An Essay Across Disciplines*. University of California Press.
- Schäffer, B., Pieren, R., Heutschi, K., Wunderli, J., Becker, S. (2021). Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans. A systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 27.
- Schmidt, L., Sagemuehl, D. (2008). Comparison of various procedures for the assessment of prominent discrete tones using a large number of sound samples. *Proceedings of Acoustics '08*, 3453-3456.

- Schreiber, C., Kahneman, D. (2000). Determinants of the remembered utility of aversive sounds. *Journal of Experimental Psychology*, 27-42.
- Seonghee, J., Miyong, T. (2007). Effects of a theory-driven music and movement program for stroke survivors in a community setting. *Applied Nursing Research*, 125-131.
- Shannon, C.E., Weaver, W. (1963). *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.
- Simmons, C. (1997). Measurements of sound pressure levels at low frequencies in rooms. Comparison of available methods and standards with respect to microphone positions. *SP Report*, 27.
- Simmons, R. (2010). *Music Branding. What is the real score?* noblemusicnyc.wordpress.com
- Skoe E., Kraus, N. (2013). Musical training heightens auditory brainstem function during sensitive periods in development. *Frontiers in Psychology* 1-15.
- Slabbekoon, H., Ripmeester, E. (2008). Birdsong and anthropogenic noise: Implications and applications for conservation. *Molecular Ecology*, 72-83.
- Slawson, W. (1985). *Sound Color*. University of California Press.
- Smalley, D. (1997). Spectromorphology: Explaining soundshapes. *Organised Sound*, 203-207.
- Soderquist, D.R., Shilling, R. (1990). Loudness and the binaural masking level difference. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 553 - 555
- Southworth, M. (1967). *The Sonic Environment of Cities*. MIT.
- Spinney, L. (1997). Pump down the volume. *New Scientist*, 22.
- Starck, J., Pekkarinen, J. (1987). Industrial impulse noise. Crest factor as an additional parameter in exposure measurements. *Applied Acoustics*, 263-274.
- Steward, D., Farmer, K., Stannard, C. (1990). Music as a Recognition Cue In Advertising-Tracking Studies. *Journal of Advertising Research*, 39-48.
- Strayer, D., Johnston, W. (2001). Driven to Distraction: Dual-Task Studies of Simulated Driving and Conversing on a Cellular Telephone. *Psychological Science*, 462-466.
- Swift, H. (2010). *A Review of the Literature Related to Potential Health Effects of Aircraft Noise*. Cambridge USA.
- TNO. (2020). *Reduction of emissions and underwater radiated noise for the Belgian shipping sector*. TBO Report.
- Torija, A., Li, Z. (2020). *Metrics for assessing the perception of drone noise*, 6. University of Salford.
- Tougaard, J., Beedholm, K. (2019). Practical implementation of auditory time and frequency weighting in marine bioacoustics. *Applied Acoustics*, 137-143.

- Truax, B. (1999). *Handbook for Acoustic Ecology*. Cambridge Street Publishing.
- Turner, M., Fernández, J., Nelson, K. (1996). The effect of music amplitude on the reaction to unexpected visual events. *The Journal of General Psychology*, 51-62.
- Ulrich, R. (1983). Aesthetic and Affective Response to Natural Environment. En: I. Altman, J. Wohlwill, *Behavior and the Natural Environment*, 85-125. Springer.
- Ulrich, R., Simons, R., Losito, B., Fiorito, E., Miles, M., Zelson, M. (1991). Strees Recovery During Exposure to Natural and Urban Environments. *Journal of Environmental Psychology*, 201-230.
- Ünal, A., De Waard, D., Epstude, K., Steg, L. (2013). Driving with music: Effects on arousal and performance. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 52-65.
- Vallet, M., Vincent, B., Oliver, D. (2000). La gêne due au bruit des avions autour des aéroports. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. *Missions Bruit 2000*, tomo 1.
- Van Egmond, R. (2008). Impact of sound on image-evoked emotions. *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, 6
- Van Kempen, I., Babisch, W. (2013). Noise and health in vulnerable groups: a review. *Noise Health*, 153-159.
- Van Leeuwen, T. (1999). *Speech, Music, Sound*. Macmillan Education.
- Van Reterghem, T. (2019). Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise. *Urban Forestry Urban Greening*, 133-144.
- Viollon, S., Lavandier, C., Drake, C. (2002). Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. *Applied Acoustics*, 493-511.
- Völker, S., Kistemann, T. (2011). The impact of blue space on human health and well-being - Salutogenetic health effects of inland surface waters: A review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 449-460.
- Wallin, N., Merker, B., Brown, S. (2000). *The Origins of Music*. MIT Press.
- Wang, M., Liao, Y., Lundgren, S., Chen, F. (2020). How drivers respond to visual vs. auditory information in advisory traffic information systems. *Behaviour Information Technology*, 1308-1319.
- Ward, W., Cushing, E., Burns, E. (1976). Effective quiet and moderate TTS: Implications for noise exposure standards. *The Journal of Acoustical Society of America*, 160 - 165
- Warm, J., Parasuraman, R., Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, 433-441.
- Wasano, K., Kaga, K., Ogawa, K. (2021). Pattenrs of hearing changes in women and men from denarians to nonagenarians. *The Lancet Regional Health - Wester Pacific*, 8.

- Watanabe, T., Moller, H. (1990). Low Frequency Hearing Thresholds in Pressure Field and in Free Field. *Journal of Low frequency Noise, Vibration and Active Control*, 106-115.
- Waterhouse, J., Hudson, P., Edwards, B. (2010). Effects of music tempo upon submaximal cycling performance. *Scandinavian Journal of Medicine Science in Sports*, 8
- Watts, G. R., Pheasant, R. J., Horoshenkov, K. V., Ragonesi, L. (2009). Measurement and subjective Assessment of Water Generated Sounds. *Acta Acustica United With Acustica*, 1032-1039.
- Watts, G. (2018). Tranquility trails for promoting well-being in urban areas. *Acoustic Bulletin*, 52-60.
- Webster, F. A. (1951). The influence of interaural phase on masked thresholds, I. The role of interaural time-deviation. *The Journal of Acoustic Society of America*, 452-462.
- Wenz, G. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1936 - 1956
- WHO. (2011). Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. *WHO Regional Office for Europe*, 106
- WHO. (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region. *WHO Regional Office for Europe*, 126
- WHO. (2009). Night noise guideline for Europe. *WHO Regional Office for Europe*, 184
- Wilkie, S., Stavridou, A. (2013). Influence of environmental preference and environment type congruence on judgements of restoration potential. *Urban Forestry Urban Greening*, 163-170.
- Wininger, S., Pargman, D. (2003). Assessment of Factors Associated with Exercise Enjoyment. *Journal of Music Therapy*, 57-73.
- Winn, Z. (2022). Reversing hearing loss with regenerative therapy. *MIT News Office*, Publicación online
- Woodside, J. (2008). La historicidad del paisaje sonoro y la música popular. *Revista Transcultural de Música*, 1-17.
- Xiao, J., Qin, Y., Wang, Y., Hai-Qiong, L. (2014). Research on the Relationship between the Driver's Temperament and Driving Behavior. *Chinese Journal of Ergonomy*, 23-27.
- Xie, H., Qiu, W., Heyer, N., Zhang, M., Zhang, P., Zhao, Y., y otros. (2016). The use of kurtosis-adjusted cumulative noise exposure metric in evaluating the hearing loss risk for complex noise. *Ear and Hearing*, 312-323.
- Yamada, S., Ikuji, M., Fujikata, S., Watanabe, T., Kosaka, T. (1983). Body sensation of low frequency noise of ordinary persons and profoundly deaf persons. *Journal of Sound and Vibration*, 32-36.

- Yamashita, S., Sugawara, J. (2006). Effects of music during exercise on RPE, heart rate and the autonomic nervous system. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 425-430.
- Yang, W., Kang, J. (2005). Acoustic confort evaluation in urban open public spaces. *Applied Acoustics*, 211-229.
- Yorkston, E. (2010). Auxiliary auditory ambitions: assessing ancillary and ambient sounds. *Sensory Marketing: Research on the Sensuality of Products*, 157-167.
- Zampini, M., Guest, S., Spence, S. (2003). The role of auditory cues in modulating the perception of electric toothbrushes. *Journal of Dental Research*, 929-932.
- Zatorre, R. (1988). Pitch perception of complex tones and human temporal-lobe function. *The Journal of Acoustical Society of America*, 566-572.
- Zatorre, R., Baum, S. (2012). Musical Melody and Speech Intonation: Singing a Different Tune? *Plos Biology*.
- Zatorre, R., Belin, P., Penhune, V. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 37-46.
- Zhang, Z., Shrestha, M., (2003) Quality User-defined Cursor Reading Control-Tonality Metric IMM, DTU Brüel&Kjaer
- Zhao, S., Heittola, T., Virtanen, T. (2020). Active learning for sound event detection. Cornell University *axXiv preprint arXiv:2002.05033*, 1-12.
- Zhao, Y., Qiu, W., Zeng, L., Cheng, X., Davis, R., Hamernik, R. (2010). Application of the kurtosis statistic to the evaluation of the risk of hearing loss in workers exposed to high-level complex noise. *Ear and Hearing*, 527-532.
- Zhu, X., Kim, J., Song, W., Murphy, W., Song, S. (2009). Development of a noise metric for assessment of exposure risk to complex noises. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 703-712.
- Zollinger, S., Dorado-Correa, A., Goymann, W., Forstmeier, W., Knief, U., Bastidas, A., y otros. (2019). Traffic noise exposure depresses plasma corticosterone and delays offspring growth in breeding zebra finches. *Conservation Physiology*, 1 - 15



**SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**

[secretaria@sea-acustica.es](mailto:secretaria@sea-acustica.es)

[www.sea-acustica.es](http://www.sea-acustica.es)

