



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A073

Análisis estadístico de la variación de niveles de ruido ambiental en Santiago de Chile entre los años 1989 y 2001

Mauricio E. Fuentes Alburquenque^(a).

(a) Unidad de Acústica Ambiental, Secretaría Regional Ministerial de Salud Región Metropolitana. Padre Miguel de Olivares 1229, Santiago, Chile. E-mail: mauricio.fuentes@asrm.cl.

Abstract

Public transportation changes in Santiago City, Chile, as well in 90's as in 2007's beginning, have generated, among other things, the need to assess variations of environmental noise levels. Being near a future acoustic assessment of the new public transportation system, which will be performed in a steady state of that system after modifications required, this work focuses on a comparative analysis of noise levels obtained in studies carried out in Santiago in 1989 and 2001. The analyzed data correspond to four acoustic descriptors: L_d , L_n , L_{dn} and L_{24h} , which were measured in 178 points in a 280 km² study area. Measures of location and spread were compared to determine the variation of noise levels, performing a paired t -test for mean difference. Thus, it was determined that between 1989 and 2001, on average, L_d decreased 1,5 dBA, L_n increased 2,1 dBA, L_{dn} didn't vary significantly and L_{24h} decreased 0,6 dBA, with 95 % confidence intervals of [-2,0, -1,1], [1,6, 2,7], [-0,5, 0,3] y [-1,0, -0,2] respectively. Also noise levels distributions were compared, finding statistical significant differences between both years for L_d , L_n and L_{24h} . Finally, a geographic visualization of noise levels differences between both studies is given.

Resumen

Los cambios en el transporte público en la ciudad de Santiago de Chile, tanto en los 90's como a comienzos de 2007, han generado, entre otras cosas, la necesidad de evaluar las variaciones de los niveles de ruido ambiental. Estando cerca de una futura evaluación acústica del nuevo sistema de transporte público, una vez que entre en régimen estable luego de las modificaciones que ha requerido, este trabajo se centra en un análisis comparativo de los niveles de ruido obtenidos en los estudios efectuados en Santiago en los años 1989 y 2001. Los datos analizados corresponden a cuatro descriptores acústicos: L_d , L_n , L_{dn} y L_{24h} , medidos en 178 puntos en un área de estudio de 280 km². Se compararon las medidas de posición y dispersión para determinar la variación de los niveles de ruido, aplicando la prueba estadística t para la diferencia media de muestras pareadas. De esta forma, se determinó que entre los años 1989 y 2001, en promedio, L_d disminuyó 1,5 dBA, L_n aumentó 2,1 dBA, L_{dn} no varió significativamente y L_{24h} disminuyó 0,6 dBA, con intervalos de confianza del 95 % de [-2,0, -1,1], [1,6, 2,7], [-0,5, 0,3] y [-1,0, -0,2] respectivamente. Se compararon también las distribuciones de los niveles de ruido, determinando que hubo diferencias estadísticamente significativas entre ambos años para L_d , L_n y L_{24h} . Finalmente, se entrega una visualización geográfica de las diferencias de niveles de ruido entre los dos estudios considerados.

1 Introducción

Se ha determinado que la principal fuente de ruido ambiental en las ciudades es el transporte, especialmente el tráfico rodado [1][2]. Particularmente en Santiago, los buses de transporte público son los mayores causantes del ruido en las principales vías de la ciudad. En los últimos 20 años se han sucedido tres sistemas distintos de transporte público de pasajeros, con diferentes recorridos, tecnologías, número de buses, etc., el último de los cuales comenzó a operar en Febrero de 2007. Desde el punto de vista del ruido ambiental, estudios llevados a cabo en los años 1989 y 2001 en la ciudad de Santiago evaluaron la situación acústica existente con los sistemas anteriores, por lo que cobra relevancia el análisis de su evolución pasada para facilitar el correspondiente análisis que habrá que realizar del reciente cambio de sistema.

En los estudios de 1989 y 2001 se midieron 178 puntos, en donde cada uno representa una unidad geográfica denominada distrito censal, definida por el Instituto Nacional de Estadísticas INE, en una superficie total de 280 km². Estos puntos fueron los mismos en ambos estudios, por lo que el de 2001 corresponde a una actualización del primero. En ambos estudios se obtuvieron valores, para cada punto, de cuatro descriptores de nivel de ruido ambiental: Nivel Equivalente Día o Diurno L_d , Nivel Equivalente Noche o Nocturno L_n , Nivel Equivalente Día-Noche L_{dn} y Nivel Equivalente 24 horas L_{24h} , determinando la exposición sonora de la población de acuerdo a criterios de salud basados en dichos descriptores [3][4].

Más allá de las discusiones que puedan existir sobre la representatividad espacial y temporal de los estudios, el hecho de haber sido efectuados bajo la misma metodología hace que los resultados de ambos puedan ser comparables para analizar la evolución temporal de la contaminación acústica de la ciudad. Así, el presente trabajo analiza la variación de los niveles de ruido, en donde el principal objetivo es comparar los parámetros estadísticos más importantes de ambas muestras y determinar la significación de las diferencias encontradas.

Cabe aclarar previamente que las conclusiones obtenidas en este trabajo respecto a lo significativo de los resultados se refiere sólo al punto de vista estadístico, ya que para obtener conclusiones en materia acústica, ya sea desde la perspectiva ambiental o de salud pública, se deberán tener en cuenta otros aspectos que aquí no se tratan.

La prueba estadística utilizada para comparar las medias muestrales es la prueba t pareada, que se aplica cuando se tienen dos muestras con igual número de observaciones sobre un mismo grupo de individuos u objetos, en donde las muestras tienen una distribución normal (o aproximadamente normal) y tienen una correlación positiva grande [5][6]. En este caso los objetos son los 178 puntos medidos, y las muestras corresponden a las mediciones de los años 1989 y 2001, por lo que para cada punto existe un par de datos (datos pareados).

Por otro lado, también se establecen para cada descriptor acústico categorías o intervalos, utilizando la prueba χ^2 para determinar si existen diferencias significativas en la distribución de los niveles de ruido dentro de dichas categorías al comparar los resultados de ambos estudios [5].

2 Análisis estadístico

Los puntos de medición corresponden a intersecciones de vías principales y secundarias, con diferencias importantes de tráfico vehicular entre las primeras y las segundas, tanto en intensidad como en composición, por lo que los datos representan los niveles de ruido en vías principales. Lo anterior permite asumir entonces que los puntos muestreados pertenecen al universo de los niveles de ruido existente en las vías principales y, asumiendo a su vez la normalidad de dicho universo, es posible realizar el análisis que sigue. Si bien en el estudio de

1989 se midieron 180 puntos, en el 2001 se midieron sólo 178, por lo que todo el análisis mostrado en este trabajo se realiza con los 178 puntos medidos en ambos estudios, descartando aquellos 2 que sólo fueron muestreados en 1989.

En la Tabla 1 se muestran las medidas de posición y dispersión más importantes para comparar los resultados de los distintos descriptores acústicos obtenidos en ambos estudios. Luego, a través de los datos de la Tabla 1 y la observación gráfica de las distribuciones, se efectúa una comparación entre los resultados para cada descriptor acústico. Otra visión gráfica interesante es la comparación de las distribuciones acumuladas, entregando de una manera distinta la información respecto a cómo se concentran los datos. Finalmente, se estudia cómo se distribuyen los niveles de ruido en categorías escogidas para tales efectos, y se comparan dichas distribuciones determinando si existen diferencias significativas.

También en la Tabla 1 se muestran las diferencias medias o diferencias entre los promedios de cada descriptor obtenidos en ambos estudios, junto a sus respectivos intervalos de confianza del 95 %. La significación estadística de estas diferencias se estudia a través de la prueba *t* pareada, cuyos resultados también son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Medidas de posición y dispersión y diferencias medias de niveles de ruido obtenidos en los estudios de 1989 y 2001.

Medida	L_d		L_n		L_{dn}		L_{24h}	
	1989	2001	1989	2001	1989	2001	1989	2001
Media (dBA)	75,0	73,5	66,3	68,4	76,1	76,0	72,8	72,2
Interv. confianza 95 % (dBA)	[74,5, 75,5]	[73,1, 73,9]	[65,6, 67,0]	[68,0, 68,8]	[75,6, 76,6]	[75,6, 76,4]	[72,3, 73,2]	[71,8, 72,6]
Mediana (dBA)	75,1	73,7	66,8	68,8	76,3	76,3	72,9	72,4
Moda (dBA)	74,1	76,0	68,0	69,7	78,6	77,3	73,9	74,7
Desviación estándar (dBA)	3,4	2,7	4,4	2,7	3,2	2,7	3,2	2,7
Curtosis	0,79	1,08	0,89	0,94	0,09	1,00	-0,02	1,07
Coef. de asimetría	-0,33	-0,67	-0,36	-0,65	-0,09	-0,66	-0,18	-0,67
Mínimo (dBA)	61,3	62,8	52,5	58,3	67,3	65,7	64,0	61,6
Máximo (dBA)	84,2	79,9	79,7	74,9	85,0	82,5	81,0	78,6
Rango muestral (dBA)	22,9	17,1	27,2	16,6	17,7	16,8	17,0	17,0
Coef. de variación	0,046	0,037	0,067	0,040	0,043	0,036	0,044	0,037
Primer cuartil (dBA)	72,6	71,9	63,8	66,9	73,9	74,5	70,6	70,6
Tercer cuartil (dBA)	77,4	75,2	68,9	70,1	78,4	77,7	75,1	73,9
Rango intercuartílico (dBA)	4,8	3,3	5,2	3,2	4,6	3,2	4,4	3,3
Diferencia media \bar{d} (dBA)	-1,5		2,1		-0,1		-0,6	
Interv. confianza 95 % (dBA)	[-2,0, -1,1]		[1,6, 2,7]		[-0,5, 0,3]		[-1,0, -0,2]	
Prueba <i>t</i> pareada	-6,68		7,85		-0,48		3,22	
Valor <i>p</i>	$3,060 \times 10^{-10}$		$3,727 \times 10^{-13}$		0,635		0,002	

2.1 Nivel de presión sonora equivalente diurno

En la Figura 1.a) se aprecia que en el año 2001 hubo una tendencia de los niveles de ruido a concentrarse en valores un poco más bajos que en 1989, existiendo una disminución notoria en el porcentaje de puntos con niveles de ruido por sobre los 77 dBA. En efecto, la media disminuyó en 1,5 dBA, diferencia significativa según el resultado de la prueba *t* pareada. También se aprecia una menor dispersión de los datos en el segundo estudio, dado por la forma de la curva normal. Esto se desprende también de la Tabla 1, en donde los datos del año 2001 presentan una menor desviación estándar que los del año 1989, así como también un menor rango muestral, y principalmente un menor coeficiente de variación. La mayor curtosis de la curva normal del año 2001 (más puntiaguda) ratifica también la mayor concentración en torno a la media, pero teniendo ambas muestras una mayor concentración en valores mayores a sus respectivas medias (asimetría negativa). A partir de los cuartiles se

observa que en el año 1989 el 50 % de los niveles sonoros se encontraba entre 72,6 y 77,4 dBA, mientras que en el 2001 el 50 % se ubicó entre 71,9 y 75,2 dBA, lo que corrobora la mayor concentración central de los datos y la tendencia de los niveles de ruido a desplazarse hacia valores más bajos.

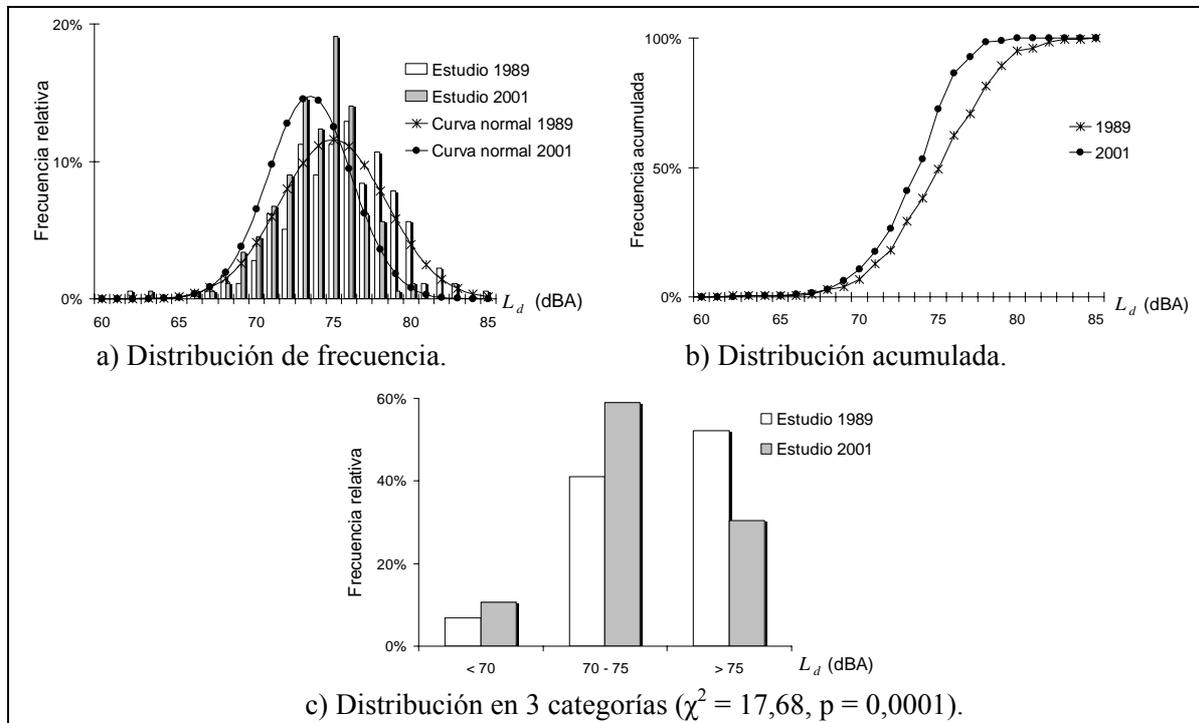


Figura 1. Distribuciones de niveles equivalentes diurnos para los años 1989 y 2001.



Figura 2. Mapa de diferencias de niveles equivalentes diurnos entre los años 1989 y 2001.

En definitiva, los niveles diurnos muestran una tendencia a concentrarse en valores más bajos en el 2001. Así, por ejemplo, en la Figura 1.b) se observa que mientras en 1989 el 50 % de los niveles superaba los 75 dBA, en el 2001 sólo el 30 % se encontraba sobre dicho valor.

Si se establecen categorías como, por ejemplo, las mostradas en la Figura 1.c), se aprecia que, consecuentemente con todo lo dicho y mostrado antes, los niveles para ambos años muestran diferencias en sus distribuciones, con una tendencia a concentrarse más en las categorías más bajas en el año 2001 respecto a 1989. Esta diferencia se evidencia en el resultado obtenido en la prueba χ^2 , mostrado también en la Figura 1.c).

En la Figura 2 se tiene una visión espacial de las variaciones de los niveles diurnos entre ambos estudios, pudiendo ver en el mapa que en la mayor parte (87 %) de los distritos censales el nivel diurno se mantuvo, es decir, varió en el rango de -5 a 5 dBA. Sin embargo, y en concordancia con el análisis anterior, hubo más distritos en los que disminuyó el nivel (11 %) que aquellos en los que aumentó (2 %).

2.2 Nivel de presión sonora equivalente nocturno

A diferencia de los niveles de ruido diurnos, los niveles nocturnos muestran una tendencia a concentrarse en valores más altos en el 2001 con respecto a 1989, tal como se observa en la Figura 3.a). La media aumentó en 2,1 dBA, diferencia significativa según el resultado de la prueba t pareada. Se aprecia una notable disminución en la dispersión de los datos, con un coeficiente de variación 0,067 en 1989 y un 0,040 en 2001. Sin embargo, 1989 presentó valores máximos más altos que los máximos del 2001. De los cuartiles mostrados en la Tabla 1 se tiene que en 1989 el 50 % de los niveles se encontraba entre 63,8 y 68,9 dBA, mientras que en el 2001 el 50 % se encontraba en un rango mayor, entre 66,9 y 70,1 dBA, ratificando la tendencia al aumento. Asimismo, de la Figura 3.b) se tiene, por ejemplo, que en 1989 el 67 % de los puntos medidos tenían niveles nocturnos sobre 65 dBA, mientras que en 2001 los puntos con estas características aumentaron al 90 %.

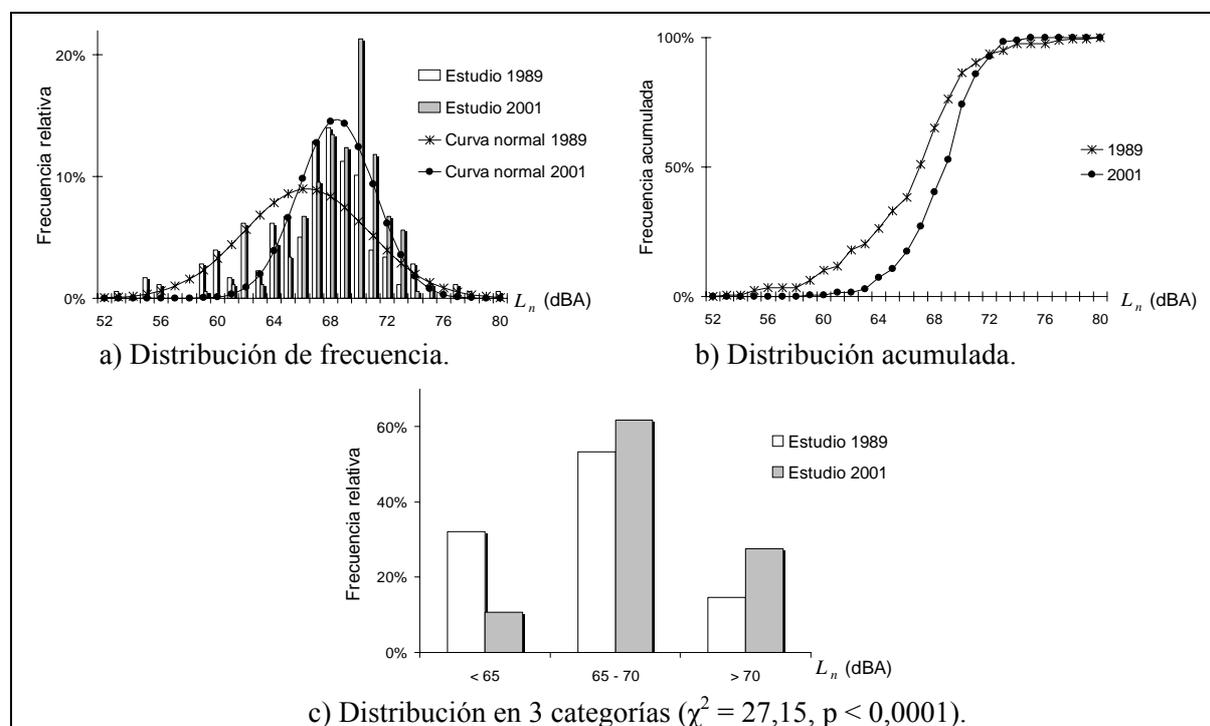


Figura 3. Distribuciones de niveles equivalentes nocturnos para los años 1989 y 2001.

Del mismo modo, la distribución de los niveles en categorías presenta diferencias entre ambos estudios, de acuerdo al resultado de la prueba χ^2 , tal como se muestra en la Figura 3.c). En efecto, en el año 2001 aumentó el número de puntos con niveles de ruido en las 2 categorías superiores, es decir, hay más puntos con un nivel nocturno sobre 65 dBA

En la Figura 4, por su parte, se puede apreciar geográficamente que, si bien la mayor parte de los distritos (80 %) presenta variaciones de nivel nocturno entre -5 y 5 dBA, en una mayor cantidad (17 %) dichos niveles aumentaron en más de 5 dBA en comparación con aquellos en donde los niveles disminuyeron en más de 5 dBA (3 %).



Figura 4. Mapa de diferencias de niveles equivalentes nocturnos entre los años 1989 y 2001.

2.3 Nivel de presión sonora equivalente día-noche

De la Tabla 1 se puede ver que la media muestra una disminución de 0,1 dBA de 1989 al 2001, la cual no es estadísticamente significativa según el resultado de la prueba t pareada. Sin perjuicio de ello, en el año 2001 los niveles sonoros tienen una menor dispersión, dado por la desviación estándar, los valores extremos, el rango muestral, la curtosis de las curvas normales y, especialmente, por el coeficiente de variación. En efecto, tomando los cuartiles 1 y 3, se puede apreciar que en 1989 el 50 % de los puntos presentó niveles de ruido entre 73,9 y 78,4 dBA, mientras que en 2001 este intervalo se redujo a niveles de ruido entre 74,5 y 77,7 dBA. Sin embargo, este aumento en la concentración de los valores no es homogéneo, ya que, tal como se aprecia en la Figura 5.a), aparentemente en el año 2001 el porcentaje de ocurrencia disminuye para niveles menores a 75 dBA, pero por sobre este valor dicho porcentaje aumenta para varios valores de nivel de ruido. Esta mayor concentración en valores por sobre la media se refleja en el coeficiente de asimetría, que es de -0,09 para 1989 y de -0,66 para 2001. No obstante, la comparación de la distribución acumulada de la Figura 5.b) muestra la diferencia que se produce antes y después de la mediana (que es igual en ambos estudios), donde se aprecia que, si bien con diferencias pequeñas, en general los niveles se concentran en valores más altos en 1989 que en 2001. Este hecho aparentemente

contradictorio se debe a que en 1989 los valores máximos fueron mayores a los valores máximos del 2001.

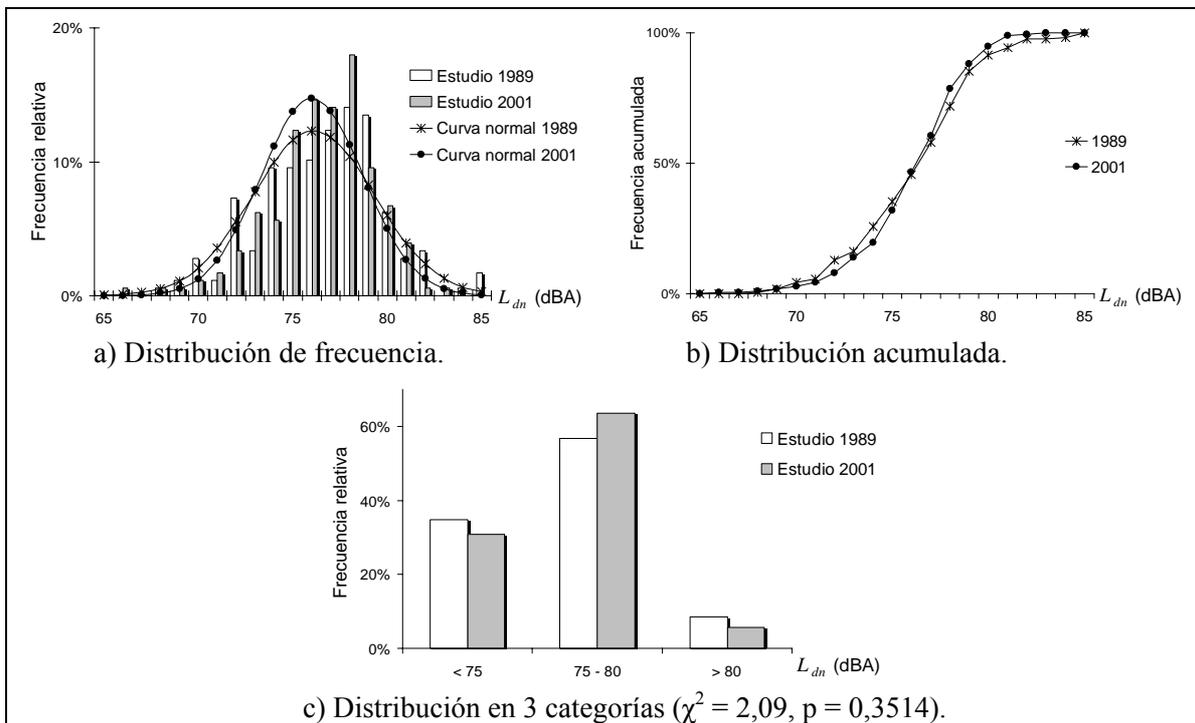


Figura 5. Distribuciones de niveles equivalentes día-noche para los años 1989 y 2001.



Figura 6. Mapa de diferencias de niveles equivalentes día-noche entre los años 1989 y 2001.

En cuanto a la distribución en categorías de niveles de ruido, ésta no presenta diferencias significativas entre ambos años, tal como lo refleja la prueba χ^2 y la gráfica mostrada en la Figura 5.c). De todos modos es posible observar una disminución entre 1989 y 2001, aunque poco significativa, de los puntos con niveles de ruido en las categorías extremas, aumentando los puntos en la categoría central.

Una visión geográfica dada por la Figura 6 entrega resultados acordes con los anteriores. Así, por ejemplo, se tiene que en el 93 % de los distritos censales el nivel día-noche se mantuvo (varió entre -5 y 5 dBA), mientras en el 3 % disminuyó en más de 5 dBA y en el 4 % aumentó en más de 5 dBA.

2.4 Nivel de presión sonora equivalente 24 horas

Existe una disminución de 0,6 dBA entre las medias de ambos estudios, resultado estadísticamente significativo según el resultado de la prueba t pareada. En el segundo estudio los datos presentan una menor dispersión, reflejado en una menor desviación estándar, una mayor curtosis y, especialmente, un menor coeficiente de variación. De los cuartiles 1 y 3 se tiene que en 1989 el 50 % de los niveles de ruido se encontraba entre 70,6 y 75,1 dBA, mientras en el 2001 la mitad de los puntos presentó niveles entre 70,6 y 73,9 dBA. Lo anterior concuerda con la comparación mostrada en la Figura 7.a), donde se observa que los niveles de ruido se desplazan hacia la parte más central (cercano a la media) en el 2001, teniendo valores muy menores o nulos en los extremos, especialmente en el extremo superior.

Las distribuciones acumulativas de la Figura 7.b) muestran que ambas son casi idénticas hasta el primer cuartil aproximadamente, luego del cual los niveles de ruido del 2001 muestran una concentración en valores más bajos. Así, por ejemplo, en 1989 un 25 % de los puntos tenían niveles de ruido sobre 75 dBA, mientras en 2001 sólo un 12 % estaban por sobre dicho valor.

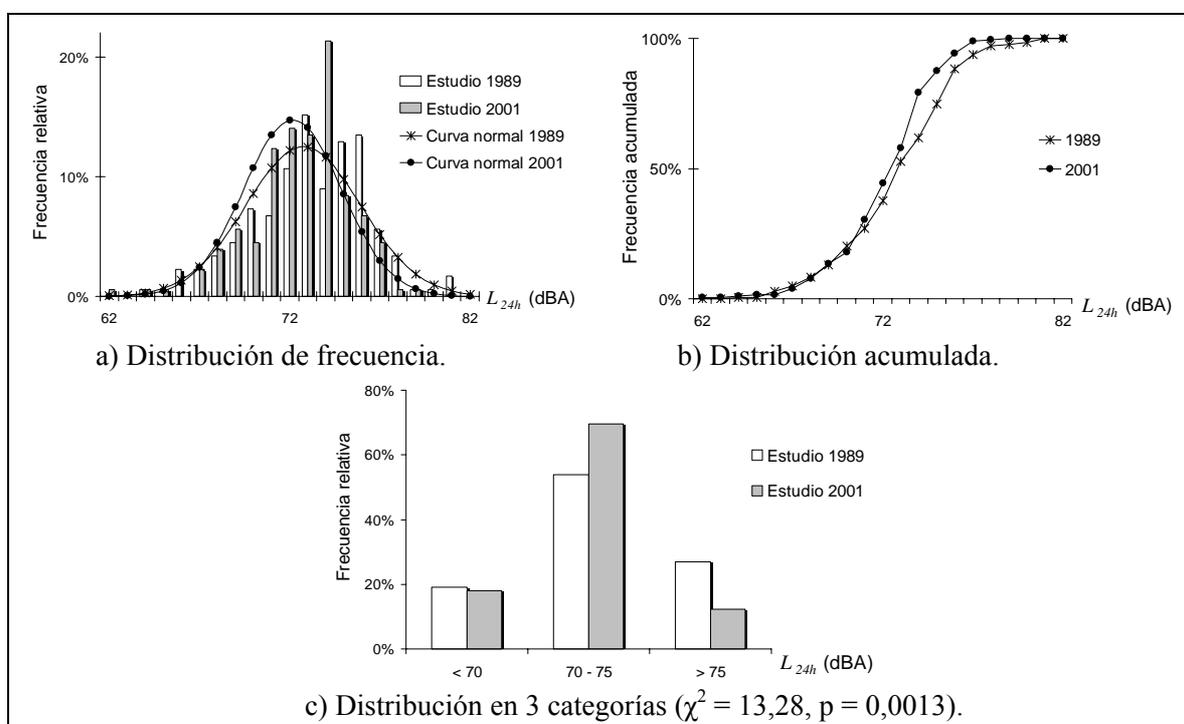


Figura 7. Distribuciones de niveles equivalentes 24 horas para los años 1989 y 2001.

Finalmente, en concordancia con lo anterior, la Figura 7.c) muestra cómo disminuyó una parte importante (15 % aproximadamente) de los niveles sobre 75 dBA que había en 1989, pasando a concentrarse en la categoría entre 70 y 75 dBA en 2001. El número de puntos de la categoría inferior no sufrió una variación significativa. De todos modos, el resultado de la prueba χ^2 evidencia una diferencia entre ambos años.

En la Figura 8 se muestra el mapa con las diferencias de niveles 24 horas entre ambos estudios. En la gran mayoría (96 %) de los distritos censales los niveles de ruido variaron en un rango de -5 a 5 dBA, mientras el 6 % restante varió en más de 5 dBA, tanto en disminución (3 %) como en aumento (3 %).



Figura 8. Mapa de diferencias de niveles equivalentes 24 horas entre los años 1989 y 2001.

3 Conclusiones

Se analizó la variación de los niveles de ruido ambiental obtenidos en los estudios realizados en Santiago en los años 1989 y 2001, para cuatro descriptores acústicos: L_d , L_n , L_{dn} y L_{24h} . Esto se realizó mediante la comparación de varios parámetros estadísticos, con una visualización gráfica, y la aplicación de la prueba t para la diferencia media de muestras pareadas, las que en este caso correspondieron a las mediciones efectuadas en los mismos 178 puntos en ambos estudios. Así, se encontró que entre los años 1989 y 2001, en promedio, L_d disminuyó 1,5 dBA, L_n aumentó 2,1 dBA, L_{dn} no varió significativamente y L_{24h} disminuyó 0,6 dBA, con intervalos de confianza del 95 % de [-2,0, -1,1], [1,6, 2,7], [-0,5, 0,3] y [-1,0, -0,2] respectivamente.

Para cada descriptor acústico se realizó una comparación descriptiva de las medidas de posición y dispersión más relevantes, con apoyo de una visualización gráfica de las distribuciones, encontrando tendencias cualitativas acordes con las diferencias medias. Para los cuatro descriptores acústicos se encontró en el año 2001 una menor dispersión de los niveles con respecto a 1989. En ambos años los niveles mostraron una mayor frecuencia en valores por sobre la media (asimetría negativa). Particularmente, y acorde a las diferencias

medias encontradas, la distribución de los niveles L_d , L_n y L_{24h} presenta diferencias significativas entre ambos años, no sucediendo lo mismo para el nivel L_{dn} .

Se complementó el trabajo con una visualización geográfica de las diferencias de niveles de ruido encontradas entre ambos estudios, obteniendo resultados acordes con el análisis estadístico.

Referencias

- [1] Office of Noise Abatement and Control, U.S. Environmental Protection Agency (1977). "The Urban Noise Survey". Washington D.C., USA.
- [2] Harris, Cyril M. (1995). "Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido". 3ª Ed. McGraw-Hill, Madrid, España.
- [3] Intendencia de la Región Metropolitana, Gobierno de Chile (1989). "Estudio Base de Generación de Niveles de Ruido del Gran Santiago". Santiago, Chile. www.seremisaludrm.cl
- [4] Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente, Ministerio de Salud, Gobierno de Chile (2001). "Estudio Actualización de Niveles de Ruido del Gran Santiago 1989-2001". Santiago, Chile. www.seremisaludrm.cl
- [5] Montgomery, Douglas C.; Runger, George C. (1994). "Applied Statistics and Probability for Engineers". 1st Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- [6] Gutiérrez, Humberto; de la Vara, Román (2004). "Análisis y Diseño de Experimentos". Mc-Graw-Hill, México.