



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## Análisis espacio-temporal de los parámetros psico-acústicos en entornos acústicos urbanos usando sistemas IoT en tiempo real

PACS: 43.50.Rq, 43.50.Qp.

Jaume Segura-Garcia<sup>1</sup>, Adolfo Pastor-Aparicio<sup>1</sup>, Jesús López-Ballester<sup>1</sup>, Juan J. Perez-Solano<sup>1</sup>, Santiago Felici-Castell<sup>1</sup>, Máximo Cobos-Serrano<sup>1</sup>, José Montoya-Belmonte<sup>2</sup>, Ana Torres-Aranda<sup>3</sup>, Juan M. Navarro-Ruiz<sup>2</sup>

1 Dpt Informàtica - ETSE – Universitat de València. Avda de la Universitat s/n – 46100 Burjassot (València) – Spain. E-mail: [jsegura@uv.es](mailto:jsegura@uv.es), [apasa3@alumni.uv.es](mailto:apasa3@alumni.uv.es), [jsolano@uv.es](mailto:jsolano@uv.es), [felici@uv.es](mailto:felici@uv.es), [macose2@uv.es](mailto:macose2@uv.es), [grimo@uv.es](mailto:grimo@uv.es)

2 Escuela Politécnica Superior, Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM) – Avda de los Jerónimos, s/n, 30107 Guadalupe (Murcia), Spain. E-mail: [jmontoya3@alu.ucam.edu](mailto:jmontoya3@alu.ucam.edu), [jmnavarro@ucam.edu](mailto:jmnavarro@ucam.edu)

3 Dpto Ing. Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones – EPC – Universidad de Castilla-La Mancha Campus Universitario. 16071 - Cuenca – Spain. E-mail: [ana.torres@uclm.es](mailto:ana.torres@uclm.es)

**Palabras Clave:** *Soundscape, WASN, parámetros psicoacústicos, binaural, IoT*

### ABSTRACT

Sound pleasantness or annoyance perceived in urban soundscapes is a major concern in environmental acoustics. Binaural psychoacoustic parameters are helpful to describe generic acoustic environments, as it is stated within the ISO 12913 framework. In this paper, the application of a Wireless Acoustic Sensor Network (WASN) to evaluate the spatial distribution and the evolution of urban acoustic environments is described. Two experiments are presented using an indoor and an outdoor deployment of a WASN with several nodes using an Internet of Things (IoT) environment to collect audio data and calculate meaningful parameters such as the sound pressure level, binaural loudness and binaural sharpness. A chunk of audio is recorded in each node periodically with a microphone array and the binaural rendering is conducted by exploiting the estimated directional characteristics of the incoming sound by means of DOA estimation. Each node computes the parameters in a different location and sends the values to a cloud-based broker structure that allows spatial statistical analysis through Kriging techniques. A cross-validation analysis is also performed to confirm the usefulness of the proposed system.

### RESUMEN

El agrado o la molestia sonora percibida en un paisaje sonoro urbano es un tema candente en acústica ambiental. Los parámetros psicoacústicos binaurales ayudan a describir entornos acústicos genéricos, tal y como se establece en la ISO 12913. En este artículo, se describe la aplicación de una Red de Sensores Inalámbricos Acústicos (WASN) para evaluar la distribución espacial y la evolución de entornos acústicos urbanos. Se presentan dos experimentos usando un desarrollo de WASN interior y uno exterior con diversos nodos usando un entorno de Internet de las Cosas (IoT) para la recogida de información de audio y calcular los diferentes parámetros de interés, tales como el nivel de presión sonora (SPL), loudness binaural y sharpness binaural. Se registra periódicamente un fragmento de audio en cada nodo con un micrófono binaural y la renderización binaural se realiza explotando las características direccionales estimadas del sonido entrante por medio de estimación DOA. Cada nodo calcula los parámetros en una localización diferente y envía los valores a una estructura intermedia IoT basada en Cloud que permitirá el análisis estadístico espacial a través de técnicas de Kriging.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## 1. INTRODUCCIÓN.

El ruido es un gran problema en grandes ciudades. Se demuestra que afecta al comportamiento humano, la salud e incluso a la comprensión de los niños [1]. Se han realizado diferentes medidas y estudios de este factor ambiental en el pasado [2, 3]. La forma normal de realizar medidas de ruido es recoger muestras de ruido con un sonómetro, sin embargo esta técnica tiene muchos inconvenientes. Por una parte, sólo se toman medidas locales en una malla y por la otra, es muy caro realizarlas debido a los costes del equipo de medida y a los de personal. Además, estos estudios se realizan observando parámetros objetivos, es decir evaluando el nivel de presión sonora equivalente [4]. Sin embargo, trabajos previos han demostrado que la evaluación de parámetros psicoacústicos, como loudness y sharpness, se ajusta mejor a la valoración de la molestia subjetiva producida por el ruido [5, 6]. Se han realizado multitud de estudios en psicoacústica y también se han creado estándares para la evaluación de la molestia subjetiva y el cálculo de parámetros psicoacústicos [7, 8].

En 2014, la Organización Internacional de Estandarización (ISO) introdujo el estándar ISO 12913 sobre paisaje sonoro o *soundscape* [9], siguiendo las recomendaciones de la acción COST Soundscape [10]. El estándar define el paisaje sonoro como: el entorno acústico tal y como lo percibe/n o experimenta/n y/o entiende/n una persona o grupo de personas en el contexto [9]. Este contexto incluye las relaciones entre persona, actividad y lugar, tanto temporal como espacialmente. La interacción entre los diferentes actores en el entorno acústico establece un contexto dinámico que es capaz de influenciar el paisaje sonoro a través de diferentes mecanismos como: (1) la sensación auditiva, (2) la interpretación de la sensación auditiva, y (3) las respuestas al entorno acústico. De esta manera, el paisaje sonoro o *soundscape* se diferencia del entorno acústico (definido como: sonido en el receptor de todas las fuentes sonoras ya modificado por el entorno). En este trabajo, se orienta principalmente el estudio al análisis del entorno acústico, pero como la evaluación se hace a partir de la estimación de la molestia psicoacústica (ya que no se relaciona directamente con la respuesta subjetiva de la gente) por medio del modelo de Zwicker. Aquí no hay calificación específica del sonido por percepción subjetiva, sino que se hace una descripción del entorno a partir de una versión simplificada del modelo de Zwicker. Esto se puede relacionar con la respuesta subjetiva, pero se realizará en un estudio posterior. Otros aspectos que atañen a este estudio están relacionados con el desarrollo de una infraestructura para evaluar el entorno acústico en base a parámetros psicoacústicos binaurales y su análisis espacial y evolución temporal.

En el contexto de la planificación urbana moderna y de las Smart Cities, los sistemas IoT están recibiendo una creciente atención debido a su capacidad de monitorizar diferentes zonas problemáticas en centros de población [11, 12]. Por lo general, estos problemas están relacionados con el medio ambiente, pero también con eHealth, Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) y otras áreas tecnológicas emergentes con altas demandas [13-15].

Este trabajo se centra en la implementación de un sistema basado en Internet de las Cosas orientado a recoger información psicoacústica binaural de entornos interiores y exteriores. Como el modelo de molestia propuesto usa únicamente loudness y sharpness como parámetros principales, se han hecho algunas simplificaciones. Con el fin de explicar el funcionamiento de estos parámetros en los entornos considerados, se han hecho análisis espaciales y temporales de las medidas para comprobar la validez del modelo de estadística espacial propuesto usando kriging.

El artículo se organiza como sigue: la sección 2 presenta un breve estado del arte, la sección 3 presenta la metodología teórico-práctica usada para desarrollar los experimentos, tanto en entornos interiores como exteriores, con análisis estadístico espacial (mediante el método de kriging), discutiendo también consideraciones sobre el hardware, el software y procesado de señal. También se describe el procedimiento para obtener el loudness y sharpness binaural. En la sección 4, se presentan los resultados y se discuten. Finalmente, la sección 5 resume las conclusiones principales de este trabajo.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## 2. ESTADO DEL ARTE.

Diferentes investigadores han implementado sistemas de monitorización de ruido ambiental evaluado la molestia asociada. El uso de WASNs para la monitorización de ruido fue el principal objetivo de los trabajos [16, 17]. En [18], los autores usaron una WASN con motas Tmote-Sky y Tmote Invent (Tml), para monitorización de ruido de tráfico usando el nivel equivalente ( $L_{eq,T}$ ) y contando el número de vehículos y su tipo. En ese desarrollo, la frecuencia de muestreo se estableció en 8Khs. Como conclusión importante, los autores establecen que la Tmote-Sky tenía un ruido propio excesivo haciéndola inapropiada para la recogida de medidas sonoras, mientras que Tml ofrecía buenas características de audio. En esa investigación, no se ofrece ningún procedimiento de calibración. En [19, 20], los autores desarrollan una WASN en Ostrobathnia (Finlandia). En estas referencias, los autores evaluaron diferentes tests para determinar el impacto del ruido. Midieron el  $L_{eq,T}$  con  $T=125ms$ , usando una frecuencia de muestreo de 33 kHz, con 14 nodos calibrados (MicaZ de Crossbow –ahora MEMSIC- con un circuito de adquisición al uso para permitir un rango dinámico de 60 dB), y sincronizado durante 96h, obtuvieron buenos resultados. Otros trabajos como [21-23] usaron teléfonos móviles para monitorizar la contaminación sonora. Aunque los autores obtuvieron resultados interesantes, en este artículos hay una falta de información sobre las condiciones de registro lo que implica una menor precisión en la medida del ruido.

De las referencias anteriores, podemos observar trabajos similares orientados a la descripción del paisaje sonoro. En [25, 26], los autores centran la descripción del paisaje sonoro en la evaluación de los niveles de ruido y parámetros psicoacústicos a partir de registros recogidos en paseos. Sin embargo, ninguno de ellos incluye un análisis basado en la molestia psicoacústica binaural, que probablemente debería ser más precisa desde el punto de vista psicoacústico en seres humanos.

En la literatura científica, la evaluación de la molestia psicoacústica (PA) está basada principalmente en el trabajo de Zwicker & Fastl [27]. Otros autores han intentado afrontar esta investigación teniendo en cuenta la percepción subjetiva combinada con parámetros psicoacústicos específicos [28]. El loudness es un factor importante que afecta la molestia psicoacústica percibida de un sonido [27, 29]. Este parámetro se define como la intensidad subjetiva de un sonido, la cual califica sonidos en rango desde silencioso a ruidoso. Está relacionado principalmente con la amplitud percibida de un sonido. Hay algunos modelos para evaluar este parámetro que da una estimación numérica del nivel de sonoridad basado en algunas características del sonido. Los modelos más conocidos son los de Zwicker [27] y Moore [30], que están estandarizados en las 2 partes de la ISO 532 [8]. Están basados en un estímulo monoaural y pasan a través de varias etapas de filtrado que son similares a los filtros naturales del oído, simulando el sistema auditivo. Recientemente, nuevas investigaciones en psicoacústica han demostrado que el loudness monoaural no es suficiente para evaluar el loudness acústico y se desarrollaron diferentes modelos para el loudness binaural [28, 31]. La implementación del modelo de Zwicker [32] ha permitido una perspectiva computacional para la monitorización del loudness. En un trabajo previo [33], se ha desarrollado un sistema de monitorización del loudness binaural usando el modelo de Zwicker y usando síntesis binaural por medio de una combinación de HRTFs y procesado de arrays microfónicos.

En [34], los autores evaluaron el ruido ambiental con una aplicación móvil y mostraban los resultados en un mapa usando el método de kriging. En [35], los autores midieron valores de SPL durante períodos de 5 minutos con una WASN y también realizaron validación cruzada espacial usando el método de kriging en una pequeña ciudad. En [36], los autores implementaron un sistema orientado a calcular parámetros psicoacústicos en el servidor a partir de fragmentos de registros de audio. En [33], los autores implementaron un sistema *edge-computing* usando diferentes nodos Raspberry Pi 3 (Rpi3) con el fin de realizar una evaluación del rendimiento cuando se calcula el loudness binaural directamente sobre los nodos Rpi3.

En este artículo, se hace una mejora de un trabajo anterior [33] con el loudness binaural, incorporando al modelo el cálculo del sharpness binaural. Además, se evalúa una versión

simplificada del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker (asumiendo condiciones específicas), principalmente para evaluar la distribución espacial de la molestia subjetiva en entornos interiores y exteriores.

### 3. METODOLOGÍA.

La implementación de una WASN para evaluar una versión simplificada del modelo de molestia subjetiva basada en un framework de Internet de las Cosas (IoT), debe considerar diferentes aspectos: (a) la implementación hardware y software de los nodos para el cálculo de los parámetros psicoacústicos, (b) la configuración del framework IoT, y (c) la validación cruzada de resultados y su análisis mediante estadística espacial.

#### 3.1. Binaural Sharpness

A partir del modelo de Zwicker, el sharpness [37] se define como el centroide del espectro que puede ser calculado [38] usando la ecuación (1)

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24Bark} L'(z) \cdot g'(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24Bark} L'(z) \cdot dz} \quad (1)$$

donde para  $z < 14$ ,  $g'(z) = 1$  y para  $z > 14$ ,  $g'(z) = 0,00012 \cdot z^4 - 0,0056 \cdot z^3 + 0,1 \cdot z^2 - 0,81 \cdot z + 3,51$ .  $L'(z)$  es el loudness específico, que depende de la frecuencia en escala Bark (es decir,  $z$ ).

En [33], se describe el procedimiento para obtener el loudness binaural. En este trabajo, el cálculo del sharpness binaural también se implementa con el fin de evaluar una versión simplificada del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker. Como el loudness específico se ha obtenido para las bandas de tercio de octava, se calcula el sharpness del canal izquierdo y derecho usando la función de peso  $g'(z)$  descrita en la ecuación (1) para calcular el valor del sharpness en cada canal. A fin de calcular el sharpness binaural, aplicamos la misma proporción que en el cálculo del loudness binaural (ver ecuación (2)) [28].

$$SB = \frac{3}{4} \cdot (S_i + S_d) \quad (2)$$

#### 3.2. Simplificaciones del modelo de Zwicker

Suponemos, en este caso, que se seleccionan ubicaciones donde el ruido ambiental tiene pocas componentes tonales y que provoquen una baja intermodulación. En este caso, el modelo de molestia podría ser simplificado reduciendo las componentes de Fluctuation Strength (F) y Roughness (R) y haciendo que el término  $w_{FR} \sim 0$  en el modelo de molestia de Zwicker [27]. Con esta simplificación la ecuación (3) representa la PA de Zwicker.

$$PA = L_5 \cdot (1 + w_s) \quad (3)$$

donde  $L_5$  es el percentil 5 para el loudness, y  $w_s$  es  $(S - 1,75) \cdot 0,25 \cdot \log_{10}(L_5 + 10)$  si el sharpness es  $S > 1,75$  y 0 si  $S \leq 1,75$ .

En este punto, la simplificación es necesario, ya que de momento, el cálculo del loudness y el sharpness binaural es muy costoso computacionalmente (entre 5 y 6s para 1 segundo de registro de audio) en los nodos Rpi3. El uso de más parámetros en el modelo colapsaría la capacidad de cálculo del nodo para usos de monitorización.

La molestia psicoacústica binaural (BPA) se introduce como la PA pero usando los parámetros binaurales (i.e., loudness y sharpness binaural) para calcular esta molestia binaural.

#### 3.3. Implementación Hardware y Software

El dispositivo sensor y de cálculo se compone de dos subsistemas: el subsistema de adquisición y el core de procesado. El core de procesado se basa en una Raspberry Pi [39] y el subsistema de adquisición se compone del array de cuatro micrófonos de una cámara Sony PlayStation3 Eye (PS3-Eye). El array de micrófonos de la PS3-Eye permite registrar cada canal usando 16bits y una frecuencia de muestreo de 16kHz, con un SNR de 90dB y un consumo de 500 mAh. Diversos investigadores han usado este dispositivo, principalmente debido a su cámara, p.e. para sistemas de seguimiento de ojos [40] o para la mejora de displays multitáctiles [41], pero también para el mapeo de fuentes sonoras [42]. En este trabajo, se usa para la captura de audio del dispositivo sensor acústico. La distancia entre los micrófonos

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

externos es de 62mm, y los micrófonos intermedios tiene polaridad invertida. Los dispositivos se han ubicado en dos diferentes entornos (uno interior y otro exterior).

La parte del core de procesado del nodo es una Rpi3 Modelo B, que se usa en las etapas de adquisición y publicación. Las características técnicas de la Rpi3 incluyen una CPI ARMv8 con quad-core de 64bits y 1,2GHz, 1GB de RAM, una GPIO de 40 pines, 4 puertos USB, un puerto HDMI, un puerto Ethernet 10/100MB y WLAN 802.11n integrada, además de Bluetooth Low Energy (BLE). Por otra parte, los puertos USB y los pines GPIO son una buena solución, ya que proporcional a la Rpi la posibilidad de tener una serie de periféricos disponible, tales como antenas WiFi, módulos ZigBee, micrófonos, cámara y conexiones con otros dispositivos, p.e. Arduino. Para su alimentación se eligió una conexión Power-Over-Ethernet (PoE) [43], en la que un cable Ethernet proporciona tant alimentación eléctrica como conexión de datos a la Rpi3.

El diseño del dispositivo se realizó de acuerdo con el modelo mostrado en la Figura 1 [33]. En la sección software, la plataforma Rpi3 utiliza un sistema operativo basado en Linux (Raspbian) que permite su programación en lenguajes de alto nivel, como Python. Las tareas del algoritmo desarrollado son: adquisición y ventaneo de la señal de audio, síntesis binaural, cálculo de parámetros psicoacústicos binaurales (loudness y sharpness binaurales), creación de señales monoaurales, etapa de filtrado en tercios de octava, cálculo de SPL, almacenamiento, publicación y procesado de los resultados. También se almacena una copia de los diferentes parámetros evaluados en la memoria interna de la Rpi3.

Primero, se realiza la etapa de adquisición, registrando el audio con el array microfónico en fragmentos de 1 segundo. A continuación, se estima la dirección de llegada (DOA) para un conjunto de bins de frecuencia obtenidos al procesar la entrada de audio a partir de los dos micrófonos centrales del array en el dominio de la STFT [33,44,45]. En la siguiente etapa, se realiza la síntesis binaural para crear una señal que imite la respuesta del sistema auditivo humano usando HRTFs y la información del DOA obtenida en la etapa anterior. Seguidamente, se calculan el loudness y el sharpness binaural a partir de la señal binaural sintetizada. Finalmente, los resultados se suben a un servicio basado en Cloud (llamado ThingSpeak) para almacenamiento y publicación de datos. Este servicio permite el procesado de datos usando el API de ThingSpeak y permitiendo la conexión con Matlab. Esta conexión permite calcular el PA, basándonos en la aproximación explicada en la sección 3.1 mediante la ecuación (3) y finalmente, los resultados son analizados en RStudio para investigar la correlación temporal y espacial entre los diferentes nodos. A continuación, se analiza la estadística espacial del entorno usando el método de kriging [46,47], con el objetivo de evaluar las zonas más molestas. Este análisis se hace mediante la determinación de la PA interpolada en diferentes ubicaciones entre los nodos y considerando el error de este método.

En la referencia [30], los autores describen en detalle el procedimiento de calibración de los nodos para la medida del SPL y del loudness y sharpness binaural.

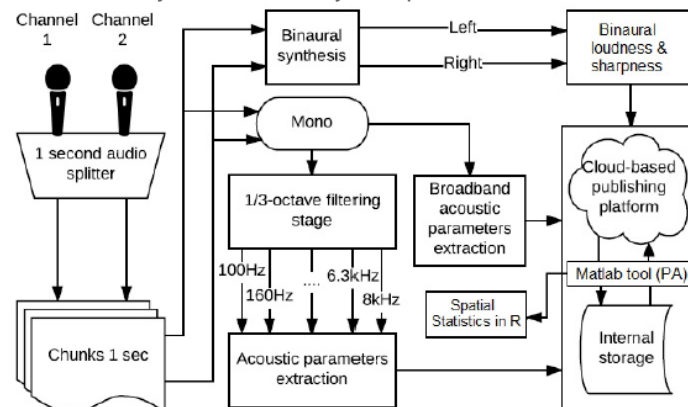


Figura 1. Diagrama de las etapas del algoritmo: adquisición, evaluación del loudness y sharpness, procesado binaural, cálculo de SPL, y publicación, almacenamiento y procesado (cálculo de PA y procesado estadístico espacial) de los resultados

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección, se evalúa el funcionamiento de la WASN, llevando a cabo los dos experimentos que hemos mencionado anteriormente (uno en entorno interior y otro en exterior). Los experimentos planeados para este trabajo consideran un entorno interior que corresponde a la colocación de 4 nodos en diferentes oficinas del Dpto de Informática de la ETSE en la Universitat de València y un entorno exterior que corresponde a la ubicación de 5 nodos en diferentes fachadas de casas en una zona residencial de Murcia cercana a una autovía.

En la Figura 2, se observa la configuración de ThingSpeak para los canales de datos en el entorno interior, recogiendo SPL, los canales izquierdo y derecho para el loudness (L), el loudness binaural (BL), canales izquierdo y derecho para el sharpness (S) y el sharpness binaural (BS).

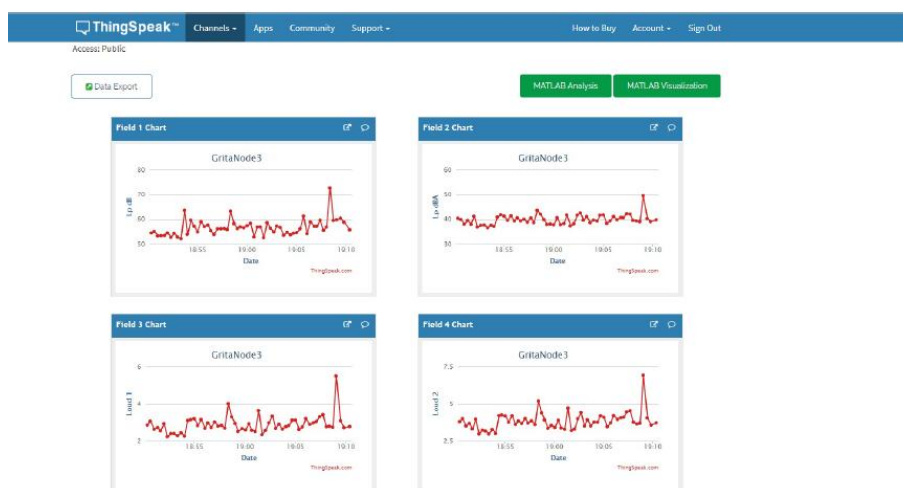


Figura 2: Detalle de la configuración de los canales en la plataforma ThingSpeak

##### 4.1. Medidas en el entorno interior

Los nodos considerados en este experimento fueron colocados en diferentes oficinas en la tercera planta del primer bloque de la ETSE. Se seleccionaron dos despachos (uno con un profesor y actividad fluida de estudiantes durante unas pocas horas y otro con un profesor solo trabajando), la secretaria del departamento y un laboratorio con un estudiante trabajando durante varias horas. Aunque la actividad era diferente en cada localización, no era demasiado alta, por tanto los niveles de ruido y los valores de molestia psicoacústica calculados tenían baja variabilidad. Se conectaron a Internet todos los nodos y cada nodo se enlazó a un canal diferente en la plataforma de ThingSpeak durante 8 horas. La Figura 3a muestra la ubicación de los 4 nodos desde la parte superior del edificio.

La Tabla 1 muestra los valores estadísticos (promedio y desviación estándar) para cada nodo de las medidas en el entorno interior. La Tabla 2 muestra la matriz de correlación del loudness binaural, sharpness binaural y SPL

Tabla 1: Resumen de los valores estadísticos (promedio y desviación típica) para el SPL, loudness binaural y sharpness binaural en el entorno interior.

	Loc. Interior 1	Loc. Interior 2	Loc. Interior 3	Loc. Interior 4
SPL (dBA)	35,61 (0,60)	38,98 (1,99)	33,75 (2,99)	34,13 (2,80)
Loudness Binaural	1,97 (1,01)	1,98 (0,39)	1,89 (1,44)	1,68 (1,36)
Sharpness Binaural	1,76 (0,10)	1,81 (0,05)	1,82 (0,15)	2,02 (0,13)

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

**Tabla 2:** Correlación de Pearson para SPL, loudness binaural y sharpness binaural en el entorno interior.

	Loc. Interior 1			Loc. Interior 2		
	Ldbin	shrpbin	SPL	Ldbin	shrpbin	SPL
Ldbin	1,00	0,91**	0,85**	1,00	-0,90**	0,96**
shrpbin	0,91**	1,00	0,75**	-0,90**	1,00	-0,86**
SPL	0,85**	0,75**	1,00	0,96**	-0,86**	1,00
	Loc. Interior 3			Loc. Interior 4		
	Ldbin	shrpbin	SPL	Ldbin	shrpbin	SPL
Ldbin	1,00	0,37*	0,89**	1,00	-0,20	0,92**
shrpbin	0,37*	1,00	0,19	-0,20	1,00	-0,44**
SPL	0,89**	0,19	1,00	0,92**	-0,44**	1,00

p = nivel de significación; \*: p<0,05; \*\*: p<0,01

#### 4.2. Medidas en el entorno exterior

El entorno exterior corresponde a una urbanización cercana a una autovía. Por tanto, el ruido del tráfico es considerable. Los puntos de medida se localizaron en dos líneas diferentes de edificios. Los edificios de esta segunda línea (apartado de la autovía) están más protegidos del ruido de tráfico, pero estos edificios están cerca de una zona peatonal donde algunos niños estuvieron jugando durante unas pocas horas. En esta localización se ubicaron 5 nodos en distintas fachadas de las casas de la urbanización. Los nodos 1 y 2 se ubicaron a nivel de piso, los nodos 3 y 4 se ubicaron en el segundo piso y el nodo 5 se ubicó en el primer piso. Todos ellos en la fachada de la casa correspondiente. La Figura 3b muestra la localización de estos nodos.



**Figura 3:** Ubicación de los puntos de medida en el entorno interior (a) y en el entorno exterior

La Tabla 3 muestra los valores estadísticos para cada nodo de las medidas externas. La Tabla 4 muestra la matriz de correlación del loudness binaural, sharpness binaural y SPL.

**Tabla 3:** Resumen de los valores estadísticos (promedio y desviación típica) para el SPL, loudness binaural y sharpness binaural en el entorno exterior.

	Loc. Exterior 1	Loc. Exterior 2	Loc. Exterior 3	Loc. Exterior 4	Loc. Exterior 5
SPL (dBA)	38,54 (4,84)	50,09 (12,45)	39,73 (1,93)	51,74 (1,24)	53,72 (14,02)
Loudness Binaural	4,53 (2,40)	12,83 (14,91)	4,95 (0,74)	11,34 (0,98)	17,39 (15,95)
Sharpness Binaural	1,74 (0,23)	1,85 (0,40)	1,53 (0,09)	1,44 (0,08)	2,04 (0,18)

#### 4.3. Análisis estadístico espacial (método de Kriging)

La estadística espacial permite el uso de diversos métodos. Los métodos más comunes son: Distancia Inversa Ponderada (IDW), spline y kriging. IDW es un método de interpolación determinista simple e intuitivo basado en el principio de que los valores de muestra más cercanos al lugar de predicción tienen más influencia en el valor de predicción que los valores de muestra más alejados. La mayor desventaja de IDW es el efecto "diana" y la superficie de rebordeada. Spline es también un método de interpolación determinista que se ajusta a la función matemática a través de datos de entrada para crear una superficie lisa. Kriging es un método basado en la autocorrelación espacial [46].

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

**Tabla 4:** Correlación de Pearson para SPL, loudness binaural y sharpness binaural en el entorno exterior.

	Loc. Exterior 1			Loc. Exterior 2		
	Ldbin	shrpbin	SPL	Ldbin	shrpbin	SPL
ldbin	1,00	0,15	0,86**	1,00	0,87**	0,97**
shrpbin	0,15	1,00	0,40**	0,87**	1,00	0,89**
SPL	0,86**	0,75**	1,00	0,97**	0,89**	1,00
	Loc. Exterior 3			Loc. Exterior 4		
	Ldbin	shrpbin	SPL	Ldbin	shrpbin	SPL
ldbin	1,00	0,63**	0,96**	1,00	0,26**	0,21
shrpbin	0,63**	1,00	0,58**	0,26**	1,00	0,96**
SPL	0,96**	0,58**	1,00	0,21	0,96**	1,00
	Loc. Exterior 5					
	Ldbin	shrpbin	SPL			
ldbin	1,00	0,30	0,88**			
shrpbin	0,30	1,00	-0,02			
SPL	0,88**	-0,02	1,00			

p = nivel de significación; \*: p<0,05; \*\*: p<0,01

La PA calculada a partir de las mediciones del loudness y el sharpness binaural establece un valor en relación a diferentes localizaciones con sus coordenadas GPS, longitud y latitud. Llamando  $Y(x)$  a la PA calculada con el modelo de Zwicker simplificado en la ubicación  $x$ , este conjunto de datos se define como  $\{Y(x), x \in D\}$ , donde  $D$  son todas las localizaciones del conjunto modelado, siguiendo la técnica de kriging [47].

En este contexto, el objetivo de este modelo propuesto es la predicción de  $Y(x_0)$  en cualquier localización  $x_0$ , en especial aquellas que estén en el conjunto de validación. Los informes de molestia contienen información del conjunto de covariables incluido. Por tanto,  $Y(x)$  viene modelado como una función de tendencia de las covariables que mejor se adaptan al proceso que explica su variabilidad a grandes trazos más un cierto error aleatorio que se explica por la variabilidad a corto plazo, es decir,

$$Y(x) = \mu(x) + \delta(x) \quad (4)$$

donde  $\mu(x)=E[Y(x)]$  y  $\delta(x)$  es un proceso Gaussiano estacionario con promedio cero, cuya caracterización de la dependencia espacial viene dada por el variograma [48]:

$$2\gamma(h) = Var[Y(x+h) - Y(x)] = Var[\delta(x+h) - \delta(x)] \quad (5)$$

donde  $Var$  es la varianza y  $h$  es un offset. Este variograma representa la función principal del método de kriging, que presenta diferentes procedimientos tales como el kriging simple, kriging ordinario, kriging universal, kriging indicador, co-kriging, etc, dependiendo de los diferentes aspectos estadísticos considerados en el conjunto de covariables. El kriging ordinario es el más comúnmente usado y se usa para estimar un valor en un punto de una región para la que el variograma es conocido, usando datos en la vecindad de la ubicación de la estimación y también puede usarse para estimar un valor en bloque [49]

En este estudio, el variograma se ha calculado usando kriging ordinario y un modelo esférico, con el paquete estadístico RStudio para el ajuste del variograma [50]. La Figura 4a muestra la distribución espacial de la BPA en el entorno interior y la Figura 4b muestra la distribución espacial de la BPA en el entorno exterior. El mapa muestra la evaluación de la ecuación 3 con el método de kriging mostrando los puntos entre los puntos de medida. También las Figuras 5a,b muestran que el error de estimación de kriging se mantiene acotado en la región entre los puntos de medida por debajo del 25% y crece a medida que los puntos estimados están en la parte externa y lejos del centroide del punto de medida

La Figura 5 muestra la distribución de error relativo obtenida en la estimación kriging. La estimación del rango de error absoluto para la BPA en el entorno interior (ver Figura 5a) es [0.0064, 0.1082] que es razonablemente bajo y está por debajo del BPA obtenido en las medidas. El mayor error se centra en la región fuera del edificio donde no se han hecho medidas. Para el entorno exterior (ver Figura 6b), el rango de error estimado es [0.9525, 24.2659] que es el rango mayor comparado con la BPA obtenida de las medidas. El error mayor se localiza en la zona próxima a la autopista.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

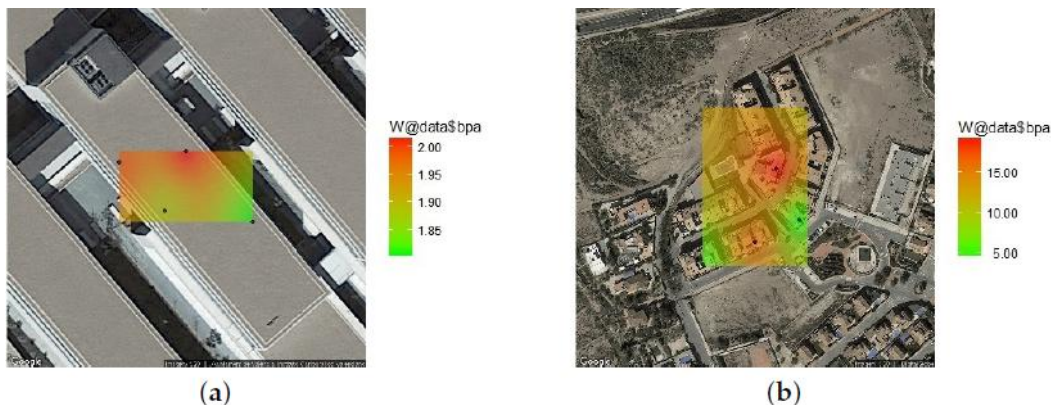


Figura 4: Predicción estadística espacial de BPA (con el método de kriging esférico) para el entorno interior (a) y exterior (b)

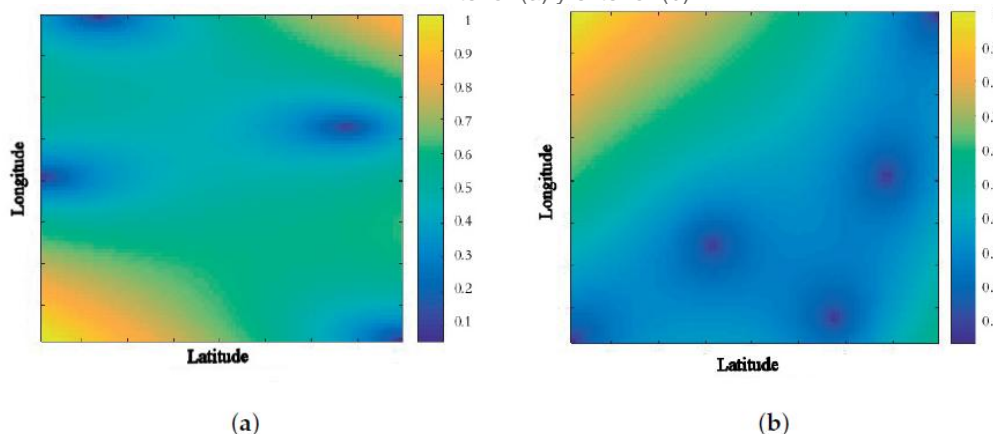


Figura 5: Distribución estadística espacial del error relativo producido en la estimación por el método de Kriging usando valores medios de BPA en los nodos para el entorno interior (a) y exterior (b)

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha desarrollado un sistema IoT para la recogida de información de diferentes entornos acústicos (interiores y exteriores). Los nodos del sistema recogen información de audio y calculan los parámetros psicoacústicos (loudness y sharpness) realizando una síntesis binaural al considerar HRTF. En el entorno interior, los nodos se colocaron en diferentes despachos del Departamento de Informática de la Universitat de València y en el entorno exterior los nodos fueron ubicados en el exterior de diversas casas en una zona residencial de Murcia.

A partir de los parámetros psicoacústicos binaurales recogidos y el SPL, se realiza un análisis estadístico. Se realiza la correlación entre estos parámetros, mostrando que el loudness binaural y el SPL correlan bien en casi todas las localizaciones (interiores y exteriores, al 99% de nivel de significación). También el sharpness binaural funciona bien con el SPL, pero con menores valores del coeficiente de Pearson.

De la versión simplificada del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker, se calculan los valores de BPA para determinar la molestia subjetiva en cada localización de nodo tanto en el entorno interior como el exterior.

Finalmente, se realiza un análisis estadístico espacial en ambos entornos usando la técnica de Kriging Ordinario. El error de la estimación de Kriging se mantiene acotado dentro de la región entre los puntos de medida por debajo del 25% y crece fuera de esta región. También se ha hecho un pequeño estudio subjetivo. De acuerdo con los resultados, el modelo BPA ha sido



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

validado en ambos entornos. Se necesita trabajar más en la validación espacial de la evaluación subjetiva.

Actualmente, se está trabajando en la implementación completa del modelo de molestia psicoacústica de Zwicker, añadiendo algoritmos para la determinación del Roughness y la Fluctuation Strength a la implementación del modelo binaural.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad por su soporte económico, que ha permitido la realización de esta investigación, gracias a los proyectos BIA2016-76957-C3-1-R y TIN2016-78799-P También quieren agradecer a todas aquellas personas que han dado acceso a sus casa o puestos de trabajo para las medidas.

## REFERENCIAS

1. World Health Organization. Burden of Disease From Environmental Noise-Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe. Available online: [http://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/e94888.pdf?ua=1](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888.pdf?ua=1) (accessed on 18 February 2018).
2. Barrigón-Morillas, J.M.; Gómez-Escobar, V.; Vaquero, J.M.; Méndez-Sierra, J.A.; Vélchez-Gómez, R. Measurement of noise pollution in Badajoz city, Spain. *Acta Acust. United Acust.* 2005, 91, 797–801.
3. European Environment Agency. Noise in Europe 2014; EEA Report No 10/2014; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2014.
4. The London Road Traffic Noise Map. Available online: <http://www.londonnoisemap.com> (accessed on 1 February 2017).
5. Aletta, F.; Kang, J.; Axelsson, Ö. Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. *Landsc. Urban Plan.* 2016, 149, 65–74
6. Fastl, H. The psychoacoustics of sound-quality evaluation. *Acta Acust. United Acust.* 1997, 83, 754–764.
7. International Organization for Standardization. Acoustics—Assessment of Noise Annoyance by Means of Social and Socio-Acoustic Surveys; ISO TS 15666:2003; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2003.
8. International Organization for Standardization. Acoustics—Methods for Calculating Loudness—Part 1: Zwicker Method; Part 2: Moore-Glasberg Method; ISO 532:2017; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2017.
9. International Organization for Standardization. Acoustics—Soundscape—Part 1: Definition and Conceptual Framework; ISO 12913-1:2014; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.
10. Soundscapes of European Cities and Landscapes. Available online: [http://soundscape-cost.org/documents/COST\\_TD0804\\_E-book\\_2013.pdf](http://soundscape-cost.org/documents/COST_TD0804_E-book_2013.pdf) (accessed on 16 February 2018)
11. Marsal-Llacuna, M.L.; Colomer-Llinàs, J.; Meléndez-Frigola, J. Lessons in urban monitoring taken from sustainable and livable cities to better address the Smart Cities initiative. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2015, 90, 611–622.
12. Panagiotou, C.N.; Zygouras, N.; Katakis, I.; Gunopulos, D.; Zacheilas, N.; Boutsis, I.; Kalogeraki, V.; Lynch, S.; O'Brien, B. Intelligent Urban Data Monitoring for Smart Cities. In Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery (ECML/PKDD-16), Riva del Garda, Italy, 19–23 September 2016.
13. Rghioui, A.; Sendra, S.; Lloret, J.; Oumnad, A. Internet of Things for Measuring Human Activities in Ambient Assisted Living and e-Health. *Netw. Protoc. Algorithms* 2016, 8, 15–28.
14. Solanas, A.; Patsakis, C.; Conti, M.; Vlachos, I.S.; Ramos, V.; Falcone, F.; Postolache, O.; Perez-Martinez, P.A.; Di Pietro, R.; Perrea, D.N. Smart health: a context-aware health paradigm within smart cities. *IEEE Commun. Mag.* 2014, 52, 74–81.
15. Ji, Z.; Ganchev, I.; O'Droma, M.; Zhao, L.; Zhang, X. A Cloud-Based Car Parking Middleware for IoT-Based Smart Cities: Design and Implementation. *Sensors* 2014, 14, 22372–22393, doi:10.3390/s141222372.
16. Santini, S.; Vitaletti, A. Wireless sensor networks for environmental noise monitoring. In Proceedings of the 6th GI/ITG KuVS Workshop Wireless Sensor Networks, Aachen, Germany, 16–17 July 2007; pp. 98–101.
17. Santini, S.; Ostermaier, B.; Vitaletti, A. First experiences using wireless sensor networks for noise pollution monitoring. In Proceedings of the 3rd ACM Workshop Real-World Wireless Sensor Network (REALWSN), Glasgow, UK, 1–4 April 2008; pp. 61–65.
18. Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D. Telos: Enabling ultra-low power wireless research. In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Los Angeles, CA, USA, 24–27 April 2005; pp. 364–369.
19. Hakala, I.; Kivelä, I.; Ihalainen, J.; Luomala, J.; Gao, C. Design of low-cost noise measurement sensor network: Sensor function design. In Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, Venice, Italy, 18–25 July 2010; pp. 172–179.
20. Kivelä, I.; Gao, C.; Luomala, J.; Hakala, I. Design of noise measurement sensor network: Networking and communication part. In Proceedings of the 5th International Conference on Sensor Technologies and Applications, Côte d'Azur, France, 21–27 August 2011; pp. 280–287.
21. Santini, S.; Ostermaier, B.; Adelman, R. On the Use of Sensor Nodes and Mobile Phones for the Assessment of Noise Pollution Levels in Urban Environments. In Proceedings of the 6th International Conference on



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

Networked Sensing Systems (INSS 2009), Pittsburg, CA, USA, 17–19 June 2009.

22. Maisonneuve, N.; Stevens, M.; Niessen, M.E.; Hanappe, P.; Steels, L. Citizen noise pollution monitoring. In Proceedings of the 10th Annual International Conference on Digital Government Research: Social Networks: Making Connections between Citizens, Data and Government, Puebla, Mexico, 17–21 May 2009; pp. 96–103.
23. Maisonneuve, N.; Stevens, M.; Niessen, M.E.; Steels, L. Noise-Tube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones. In Information Technologies in Environmental Engineering (Environmental Science and Engineering); Athanasiadis, I., Rizzoli, A.E., Mitkas, P.A., Gómez, J.M., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2009; pp. 215–228.
24. Directive of the European Parliament. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Off. J. Eur. Communities L 2002, 189, 12–25.
25. Aletta, F.; Kang, J. Soundscape approach integrating noise mapping techniques: A case study in Brighton, UK. *Noise Mapp.* 2015, 2, 1–12.
26. Aumond, P.; Can, A.; De Coensel, B.; Botteldooren, D.; Ribeiro, C.; Lavandier, C. Modeling Soundscape Pleasantness Using perceptual Assessments and Acoustic Measurements Along Paths in Urban Context. *Acta Acust. United Acust.* 2017, 103, 430–443.
27. Zwicker, E.; Fastl, H. *Psychoacoustics: Facts and Models*; Springer Science and Business Media: Berlin, Germany, 2013.
28. Moore, B.C.; Glasberg, B.R. Modeling binaural loudness. *J. Acoust. Soc. Am.* 2007, 121, 1604–1612.
29. Fastl, H. Loudness and annoyance of sounds: Subjective evaluation and data from ISO 532 B. INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc. 1985, 1403–1406.
30. Moore, B.C.; Glasberg, B.R.; Baer, T. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *J. Audio Eng. Soc.* 1997, 45, 224–240.
31. Sivonen, V. P. Directional Loudness Perception: The Effect of Sound Incidence Angle on Loudness and the Underlying Binaural Summation. Ph.D. Thesis, The Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2006.
32. Zwicker, E.; Fastl, H.; Widmann, U.; Kurakata, K.; Kuwano, S.; Namba, S. Program for calculating loudness according to DIN 45631 (ISO 532B). *J. Acoust. Soc. Jpn. E* 1991, 12, 39–42.
33. Noriega-Linares, J.E.; Rodríguez-Mayol, A.; Cobos-Serrano, M.; Segura-García, J.; Felici-Castell S.; Navarro, J.M. AWireless Acoustic Array System for Binaural Loudness Evaluation in Cities. *IEEE Sens. J.* 2017, 17, 7043–7052, doi:10.1109/JSEN.2017.2751665.
34. Zuo, J.; Xia, H.; Liu, S.; Qiao, Y. Mapping Urban Environmental Noise Using Smartphones. *Sensors* 2016, 16, 1692, doi:10.3390/s16101692.
35. Segura García, J.; Pérez Solano, J.J.; Cobos Serrano, M.; Navarro Camba, E.A.; Felici Castell, S.; Soriano Asensi, A.; Montes Suay, F. Spatial Statistical Analysis of Urban Noise Data from a WASN Gathered by an IoT System: Application to a Small City. *Appl. Sci.* 2016, 6, 380.
36. Segura-García, J.; Felici-Castell, S.; Pérez-Solano, J.J.; Cobos-Serrano, M.; Navarro, J.M. Low-Cost Alternatives for Urban Noise Nuisance Monitoring Using Wireless Sensor Networks. *IEEE Sens. J.* 2015, 15, 836–844, doi:10.1109/JSEN.2014.2356342
37. Swift, S.H.; Gee, K.L. Extending sharpness calculation for an alternative loudness metric input. *J. Acoust. Soc. Am.* 2017, 142, EL549–EL554, doi:10.1121/1.5016193
38. Von Bismarck, G. Sharpness as an Attribute of the Timbre of Steady State Sounds. *Acustica* 1974, 30, 159–172.
39. Upton, E.; Fingleton, G. *Raspberry Pi User Guide*, 3rd ed.; John Wiley and Sons Ltd.: Chichester, UK, 2014.
40. Huang, C.W.; Jiang, Z.S.; Kao, W.F.; Huang, Y.L. Low-cost and high-speed eye tracker. In *Intelligent Technologies and Engineering Systems*; Springer: New York, NY, USA, 2013; pp. 421–427.
41. Roth, V.; Schmidt, P.; Guldenring, B. The IR ring: Authenticating users' touches on a multi-touch display. In Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, New York, NY, USA, 3–6 October 2010; pp. 259–262.
42. Su, D.; Vidal-Calleja, T.; Valls-Miro, J. Towards Real-Time 3D Sound Sources Mapping with Linear Microphone Arrays. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 29 May–3 June 2017; doi:10.1109/ICRA.2017.7989196.
43. Mendelson, G. All You Need To Know About Power over Ethernet (PoE) and the IEEE 802.3af Standard. Available online: <http://kondorsecurity.com/store/media/pdf/PoEandIEEE8023af.pdf> (accessed on 15 November 2017).
44. Cobos, M.; Spors, S.; Lopez, J.J. A sparsity-based approach to 3D binaural sound synthesis using time-frequency array processing. *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2010, doi:10.1155/2010/415840.
45. Cobos, M.; Lopez, J. J.; Martínez, D. Two-microphone multi-speaker localization based on a Laplacian Mixture Model. *Digit. Signal Process.* 2011, 21, 66–76, doi:10.1016/j.dsp.2010.04.003.
46. Isaaks, E.H.; Srivastava, R.M. *An Introduction to Applied Geostatistics*; Oxford University Press: New York, NY, USA, 1989, ISBN 978-0195050134.
47. Cressie, N. *Statistics for Spatial Data*; John Wiley: New York, NY, USA, 1993.
48. Dibalasi, A.; Bowman, A.W. On the use of the variogram in checking for independence in spatial data. *Biometrics* 2001, 57, 211–218.
49. Wackernagel, H. Ordinary kriging. In *Multivariate geostatistics: An Introduction with Applications*, 3rd ed.; Springer: Berlin, Germany, 2003; pp. 79–88, doi:10.1007/978-3-662-05294-5.
50. The R Project for Statistical Computing. Available online: <http://www.r-project.org/> (accessed on 3 December 2017).