

First Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics
144th Meeting of the Acoustical Society of America
3rd Iberoamerican Congress of Acoustics
9th Mexican Congress on Acoustics

Cancún, México, 2 al 6 de diciembre de 2002

Información espectral en mapas de ruido: un estudio exploratorio¹

Vivian Pasch, Patricia Mosconi, Marta Yanitelli, Susana Cabanellas,
Federico Miyara, Jorge Vazquez

PACS 43.50.Rq

Resumen

Las normas internacionales como las ISO 1996 e ISO 717 y la legislación específica de diversos países incorporan cada vez más el espectro como dato multidimensional indispensable para valorar tanto el comportamiento de materiales como los efectos sobre el ser humano. A pesar de ello, la nueva directiva europea sobre evaluación y gestión del ruido consolida el nivel equivalente ponderado A (con penalizaciones por horario) como el descriptor por excelencia para los mapas de ruido. Considerando a éstos como una potente herramienta de zonificación y de planificación, surge la idea de realizar mapas de ruido que informen el espectro promedio en cada punto en horarios característicos. En este trabajo se fundamenta la conveniencia de contar con este nuevo tipo de herramienta y se argumenta en favor de su factibilidad frente a la opinión general de que su obtención es más costosa y difícil de llevar a cabo. En segundo lugar, se efectúa un estudio exploratorio comparando a) el espectro del tránsito en Rosario, Argentina, con el espectro de tránsito normalizado internacionalmente, y b) el espectro proveniente de la circulación de vehículos por una calle abierta con el correspondiente a los mismos vehículos por una calle con perfil en U.

1. Introducción

La evaluación del ruido con respecto a sus efectos sobre el ser humano se ha venido realizando, desde hace muchos años, por medio del nivel de presión sonora con ponderación A o algunas de sus variantes, como el nivel equivalente, el nivel día-noche, el nivel día-tarde-noche y los niveles estadísticos.

Indudablemente, la amplia disponibilidad de equipos de medición relativamente económicos capaces de entregar en forma directa dichos parámetros, así como el éxito de los mismos para predecir efectos tales como el deterioro auditivo inducido por ruido (ISO, 1990) o, con menor precisión, el grado de molestia (Schultz, 1978; Fidell et al., 1991; Miedema et al., 1998; Miedema et al., 2001), han sido factores de gran peso en la aceptación de dicha escala.

Esto ha llevado, a su vez, a la adopción de ordenanzas y reglamentaciones sobre ruido basadas en la ponderación A, creando una amplia demanda de instrumentos capaces de realizar las mediciones requeridas. Los fabricantes se hicieron eco de ello inundando virtualmente el mercado con este tipo de sonómetros, lo cual ha dificultado cada vez más cualquier intento de apartarse de la tendencia general adoptando otras escalas de valoración.

Un ejemplo patente lo constituye la reciente aprobación de la Directiva 2002/49/CE de la Unión Europea sobre la evaluación y gestión del ruido ambiental, que adopta el nivel

¹ Este trabajo es traducción del presentado en el Primer Encuentro Panamericano/Ibérico de Acústica.

día-tarde-noche y el nivel noche, ambos con ponderación A, como los indicadores oficiales. Uno de los argumentos que sustentan esta decisión es la voluntad de desviarse lo menos posible de las prácticas actuales, a menos que pudiera demostrarse que hay un indicador alternativo con significativas ventajas sobre los tradicionales (Comisión Europea, 2000). Aun habiendo otros indicadores que han demostrado ser mejores en muchos casos (se mencionarán más adelante), no se consideran “prácticos”, otro de los criterios a satisfacer por un indicador para que sea considerado “aceptable”.

Es interesante notar que similares argumentos ya habían sido esgrimidos en importantes investigaciones anteriores, tales como el documento sobre los niveles admisibles publicado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en 1974 (EPA, 1974).

Lamentablemente, este enfoque puede haber obstaculizado el desarrollo y la adopción de indicadores que podrían estar mejor correlacionados con los efectos del ruido que los indicadores tradicionales. También puede haber impedido la puesta a prueba a mediana y gran escala de hipótesis nuevas y revolucionarias. En efecto, en una cuestión tan eminentemente práctica como es la evaluación y el control del ruido comunitario, la ausencia de interés y apoyo oficial frecuentemente desalienta las líneas de investigación no convencionales.

Podría inclusive argumentarse que la adopción universal de la ponderación A puede haberse resuelto prematuramente, sin suficiente evidencia en su favor. De hecho su aceptación se ha basado en varios conceptos equivocados. Primero, se supuso que los efectos del ruido sobre el ser humano se corresponden con la sensación de sonoridad, lo cual no sucede (basta considerar las molestias causadas por una canilla que gotea de noche). Segundo, se aceptó tácitamente que la respuesta del oído a los tonos puros podía extrapolarse linealmente al caso de tonos múltiples o inclusive ruidos de banda ancha. Tercero, la ponderación A se había introducido originalmente para cuantificar la sonoridad de los sonidos comprendidos entre 24 dB y 55 dB, y sin embargo pasó a utilizarse para medir y evaluar sonidos mucho más intensos (Beranek, 1954, 1961).

La preferencia por indicadores basados en la ponderación A condujo en forma natural a su aplicación en los mapas de ruido. Los mapas de ruido, como importante herramienta de diagnóstico, zonificación y planeamiento, deberían proporcionar la mayor información posible sobre el ruido existente en un área determinada. El objeto de este trabajo es introducir los mapas de ruido espectrales como una alternativa frente a los mapas tradicionales capaz de proporcionar información útil tanto en los proyectos como en la evaluación de situaciones existentes.

2. Relaciones dosis-efecto

Una de las preocupaciones de quienes han investigado los efectos del ruido ha sido la obtención de las denominadas relaciones dosis-efecto, es decir, correspondencias matemáticas o estadísticas entre algún indicador de la exposición (por ejemplo, L_{DN}) y algún indicador del efecto (por ejemplo, el porcentaje de personas altamente molestas). El paradigma que ha prevalecido desde el primer trabajo de este tipo (Schultz, 1978) ha consistido en compatibilizar los resultados de estudios llevados a cabo en diversos lugares para integrarlos en un único metaestudio o síntesis representativa de situaciones variadas. Los estudios de base para esta tarea de síntesis han utilizado generalmente indicadores derivados del nivel sonoro A, y en la mayoría de los casos han considerado el ruido del tránsito.

Dado que los límites impuestos a la emisión sonora de los diversos productos de la tecnología (entre ellos los vehículos) también han utilizado la ponderación A, la industria ha respondido con mejoras tendientes a atenuar las frecuencias medias, por ser éstas las de

mayor incidencia en el nivel sonoro A (y las más fáciles de controlar). Una consecuencia directa de esto es un desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencias, lo que ha llevado a que el ruido de los últimos años sea espectralmente diferente del de 3 ó 4 décadas atrás. Además del hecho de que el ruido de baja frecuencia exhibe un potencial de molestia considerable (Berglund, 1996), la menor performance de las fachadas en cuanto a aislamiento en baja frecuencia podría modificar la forma en que los indicadores basados en la ponderación A se correlacionan con la molestia a lo largo del tiempo.

Aun admitiendo (y con reparos) que la ponderación A guarda una correlación importante con los efectos del ruido sobre el ser humano, la determinación del nivel sonoro ponderado A sólo permitiría predecir los efectos en el propio ambiente en el que fueron medidos. Así, dado que por cuestiones logísticas en la vasta mayoría de los mapas las mediciones o predicciones corresponden a exteriores, en rigor sólo podrían evaluarse los efectos en las personas mientras éstas permanecen en la vía pública. Si el espectro del ruido ambiente exterior y las características de la edificación predominante fueran uniformes en toda el área considerada, existiría una relación funcional bien definida entre el nivel sonoro A afuera y adentro de las viviendas, lo que permitiría correlacionar los efectos con el nivel sonoro A medido en exteriores. Pero en el caso habitual en que tanto el ruido como la edificación (particularmente en lo concerniente a las fachadas) son heterogéneos, no hay una relación unívoca entre el nivel sonoro A exterior e interior.

Todo esto introduce una variable aleatoria que explicaría parcialmente la considerable dispersión que se obtiene en las relaciones dosis-efecto, informada por Miedema (Miedema et al., 2001). Al circunscribir las funciones obtenidas a ciertos tipos específicos de ruido, como el ruido del tránsito, parecería que esta dificultad queda remediada con respecto a la heterogeneidad de las fuentes. Sin embargo, la proporción de vehículos pesados y livianos y la velocidad media de circulación influyen en la distribución espectral de la energía. Subsiste, además, la variabilidad de las condiciones de propagación, que dependen de las características geométricas y materiales de las fachadas, de la distribución de los ambientes de mayor uso, etc.

Además de los indicadores basados en el nivel sonoro con ponderación A, se han propuesto otros indicadores. El nivel con ponderación C, por ejemplo, muestra mejor correlación con la molestia en el caso de ruidos con elevado contenido de baja frecuencia. Investigaciones recientes realizadas por Schomer (Schomer, 2000, 2001, 2002a, 2002b; Schomer et al., 2001) muestran que las métricas para el ruido basadas en la ponderación según el nivel de sonoridad proporcionan una mejor correlación con la molestia.

3. Mapas espectrales de ruido

Uno de los objetivos tradicionales de los mapas de ruido es presentar en forma visual una serie de datos relevantes sobre el ruido medido (o calculado) en una determinada área geográfica. Dichos datos suelen ser, por ejemplo, los niveles equivalentes horarios, diarios o anuales y los correspondientes niveles estadísticos. Para facilitar la interpretación se utilizan generalmente curvas de nivel similares a las de los mapas topográficos. Las zonas comprendidas entre dos curvas de nivel adyacentes pueden colorearse de acuerdo con determinada escala de colores (o de entramados, en el caso de mapas monocromáticos).

Esta forma de presentar la información tiene la virtud de que mediante una rápida inspección visual es posible obtener una imagen bastante ilustrativa de la ubicación y la magnitud de los principales problemas de contaminación acústica. Sin embargo, el costo asociado a la confección de un mapa de ruido es en general suficientemente alto como para que sea recomendable dar otras aplicaciones a la información recogida. Por ejemplo,

establecer una base para la zonificación acústica y la planificación urbana, procurando preservar las zonas de bajo ruido (a veces llamadas *santuarios acústicos*) o concentrar actividades ruidosas en zonas poco sensibles.

Otra aplicación muy interesante es la de proporcionar datos cuantitativos y cualitativos útiles para el proyecto edilicio y de infraestructura urbana. Ahora bien, en todo proyecto en el que se deban evaluar los efectos del ruido, inclusive luego de mediatizado por las condiciones de transmisión y propagación, se requiere conocer el espectro sonoro. En efecto, tanto la interacción del sonido con el ambiente acústico en el que se genera, propaga y recibe (y sus componentes) como sus efectos sobre el ser humano, dependen de la distribución espectral de su energía. La aplicación de criterios de ingeniería también requiere, casi invariablemente, el uso de información espectral.

Con la introducción de técnicas computacionales para manejo de grandes masas de datos, el mapa tradicional se ha ido transformando paulatinamente en un *sistema de información geográfica* (geographic information system, GIS), es decir, una base de datos en soporte informático con información de todo tipo asociada a cada punto relevante de una determinada área geográfica. Un aspecto central de estos sistemas es la posibilidad de establecer conexiones e interrelaciones entre diversas variables, en muchos casos modelizables mediante simples relaciones matemáticas. Por ejemplo, pueden vincularse el porcentaje de personas altamente molestas con el nivel de ruido, o con la cantidad de vehículos por hora que circulan por la arteria más cercana (Miedema, 2001). El mapa deja de ser, entonces, un elemento estático para pasar a constituir una fuente de información interactiva que permite el aprovechamiento y reciclado de la misma información básica con diversos fines.

La información espectral se adapta muy bien a su incorporación en un GIS. Siendo una propiedad multidimensional, su representación directa en un mapa exigiría el uso de un estrato diferente para cada banda del espectro, dificultando la integración mental de la información. Al cargar dicha información en un GIS, por el contrario, la información puede aprovecharse con otros fines. Por ejemplo, la aplicación de cualquiera de las ponderaciones frecuenciales existentes o propuestas, el cálculo del nivel de sonoridad por medio de la Norma ISO 532, o la estimación de los niveles interiores a partir del conocimiento de las propiedades aislantes de las fachadas y los elementos de éstas.

Tal como sucede en el caso de las métricas basadas en la ponderación A, la información espectral debe ser ponderada en el tiempo para resultar útil a los efectos de confeccionar mapas de ruido. La magnitud más fundamental a informar es el nivel equivalente de cada banda de interés, $L_{eq,Bi}$, pero también pueden ser útiles con fines de investigación las distribuciones estadísticas de cada banda, dada a través de los niveles estadísticos por banda, $L_{n,Bi}$

4. Problemas vinculados a la recolección de datos

Los mapas de ruido espectrales presentan varias dificultades si se los compara con las técnicas estándar utilizadas en los mapas tradicionales. En primer lugar se presenta el problema de la instrumentación. Mientras que los mapas tradicionales pueden obtenerse a partir de mediciones efectuadas con medidores de nivel sonoro integradores relativamente económicos, en principio la obtención de información espectral requeriría el empleo de un analizador de espectro con integración simultánea en todas las bandas. Aunque a esta altura (año 2002) el costo de estos instrumentos ya no es prohibitivo, no se trata de un instrumento de aplicación generalizada y la mayoría de los municipios no lo poseen ni planean adquirirlo. Su falta de disponibilidad es un problema y deben considerarse otras alternativas que no exijan inversiones importantes

Una interesante opción es el uso de un sonómetro convencional con salida de audio calibrada (AC) conjuntamente con un grabador digital. La señal se graba digitalmente y se analiza ulteriormente por computadora con un programa apropiado. Se han ensayado varios equipos y soportes de grabación, tales como DAT, Minidisc y disco rígido. Probablemente los resultados más confiables se obtienen con el uso de un grabador a disco rígido portable, dado que se obtiene en forma directa un archivo en formato wav que puede ser transferido directamente a la computadora para el procesamiento subsiguiente. Es interesante hacer notar que el costo combinado de un sonómetro, un grabador digital y una computadora, es mucho más bajo que el costo de un analizador de espectro, con la ventaja de que constituye una estación de trabajo enormemente más versátil y abierta.

Con respecto al software para el análisis espectral, hay varias posibilidades que van desde programas freeware de propósito general, como el GNU-Octave, hasta costosos paquetes comerciales como Matlab. También hay varios programas de edición digital de sonido con facilidades para el cálculo de espectro.

El consumo de tiempo también es un problema, particularmente en el caso de grandes áreas con una gran cantidad de sitios a relevar. El trabajo asociado con cada sitio específico puede subdividirse en varias tareas: la fracción de tiempo de entrenamiento asociado (disminuye al aumentar el número de puntos), la selección del punto de medición, las mediciones de campo y la recogida de información contextual, la carga de los datos y señales a una computadora, el procesamiento de la señal y la documentación.

El entrenamiento del personal y la selección de las ubicaciones no difieren esencialmente de lo que es típico en los mapas no espectrales. Las mediciones de campo involucran la grabación digital de la señal y un tono de calibración. Aunque hacen falta ulteriores investigaciones para obtener el tiempo de estabilización para las varias bandas y umbrales de error aceptables, los resultados preliminares sugieren que es similar al tiempo requerido para la estabilización del nivel equivalente ponderado (ver figura 1).

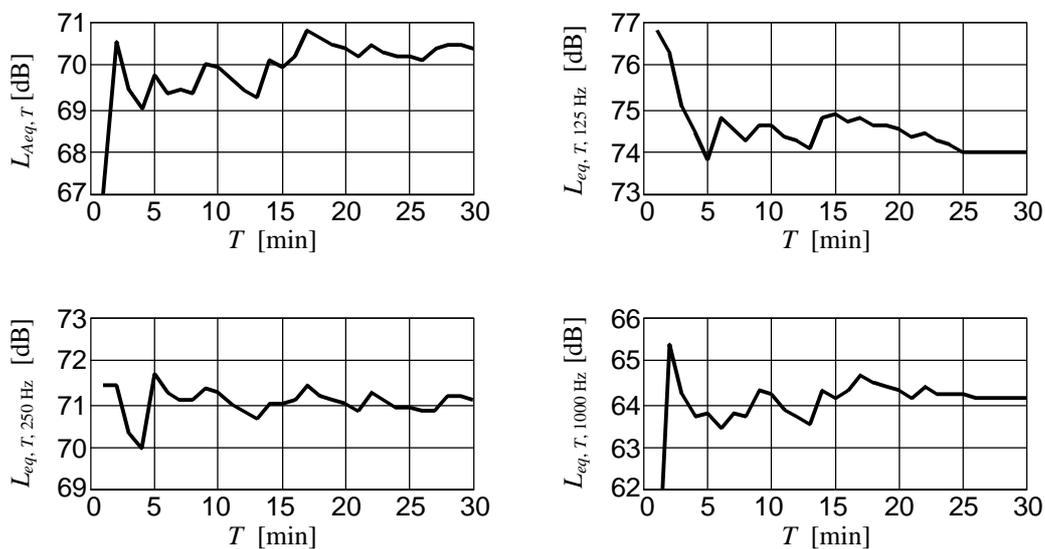


Figura 1. Ejemplo de tiempo de estabilización de los niveles equivalentes con ponderación A y en las bandas de 125 Hz, 250 Hz, and 1000 Hz.

El tiempo requerido para la carga de datos a la computadora depende fuertemente del soporte de grabación utilizado. Cuando la señal se transfiere en la forma de audio digital o analógico (en este último caso para su redigitalización en una placa digitalizadora de sonido), la carga requiere un tiempo equivalente a la duración de la señal. Si la señal

fue grabada en disco rígido, el tiempo es bastante menor. Por ejemplo, la transferencia a través de una conexión USB toma la mitad del tiempo grabado.

Finalmente, el tiempo consumido en el análisis por computadora depende del algoritmo y de las prestaciones de la computadora. En este trabajo sólo se han utilizado técnicas de transformada rápida de Fourier (FFT), pero existen otros algoritmos de estimación espectral muy eficientes. Utilizando FFT en un procesador Pentium 4 de 1,5 GHz el tiempo para realizar una transformada rápida de 4096 puntos (suficiente para describir la señal en forma espectralmente tan detallada como puede percibirla el oído) es menos de la mitad de la duración de la ventana analizada.

5. Ejemplos

Con el fin de poner en práctica las ideas expresadas anteriormente, se eligieron dos sitios ubicados a unos 100 m uno de otro con la característica de que la circulación vehicular era prácticamente la misma. La diferencia radicaba en que el primer punto tenía un perfil abierto (la calle atravesaba una plaza) mientras el segundo poseía un perfil transversal en U (figura 2).

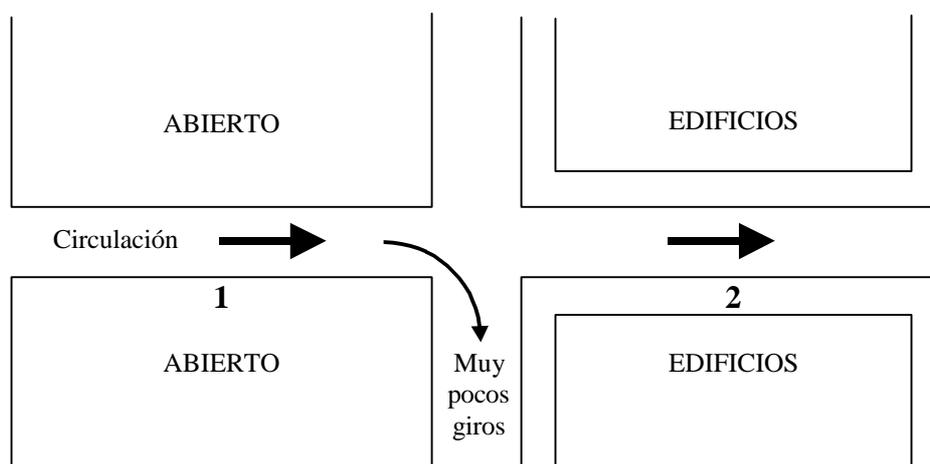


Figura 2. Ubicación esquemática de los puntos de medición.

El ruido fue grabado en ambos sitios simultáneamente por medio de dos sistemas idénticos constituidos por un sonómetro integrador de precisión clase 1 (Rion NL-15) y un grabador a disco rígido (Creative Nomad).

El diagrama a la izquierda de la figura 3 muestra el espectro de bandas de octava del ruido registrado en la calle con perfil en U. También se incluyen los límites estadísticos $\pm \sigma$. A la derecha se comparan los espectros en ambas ubicaciones (perfil abierto y en U). Como puede observarse, el ruido es más intenso en el segundo caso debido a la presencia de superficies reflectoras.

La figura 4 compara el ruido registrado en la ubicación con perfil U y el ruido del tráfico normalizado según la Norma Internacional ISO 7171-1 (desplazado de manera que coincidiera con el ruido grabado en 1 kHz). Nótese que por razones de coherencia con los argumentos anteriores, se ha quitado la ponderación A del ruido de tráfico normalizado. También se muestra el espectro del ruido de fondo, obtenido por promediación de los 5 s más silenciosos de cada periodo de 5 minutos.

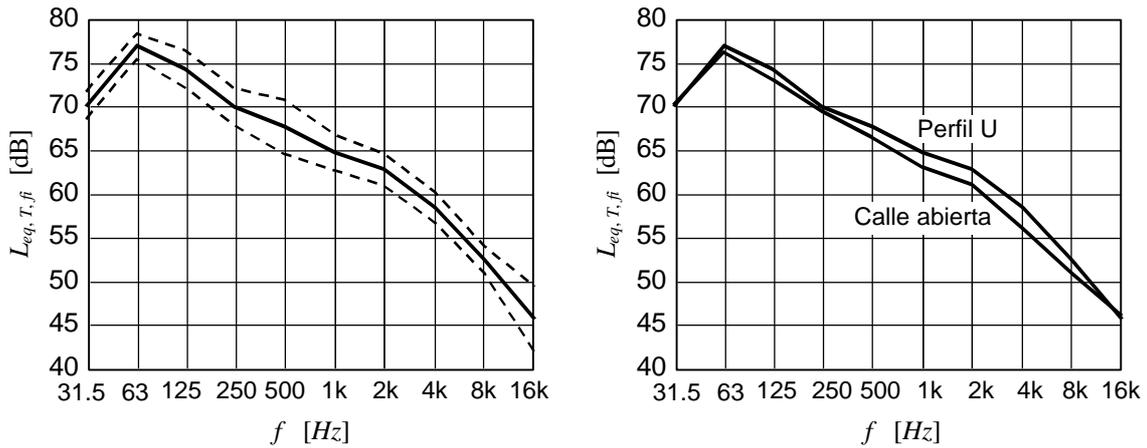


Figura 3. Izquierda: Espectro de octavas del tráfico en el sitio con perfil en U; Las líneas de trazos representan los límites de un desvío estándar en más y en menos. **Derecha:** Comparación entre los espectros de un perfil U y una calle abierta.

Aunque la diferencia observada entre el ruido del tráfico normalizado y el realmente medido no es demasiado grande, es suficientemente importante como para sugerir que el ruido del tráfico en diferentes países pueden exhibir diferencias espectrales significativas. Esto es particularmente cierto en el caso de las naciones en desarrollo, debido a la insuficiencia de controles y/o legislación y al estiramiento de la vida útil de los vehículos de tecnologías superadas.

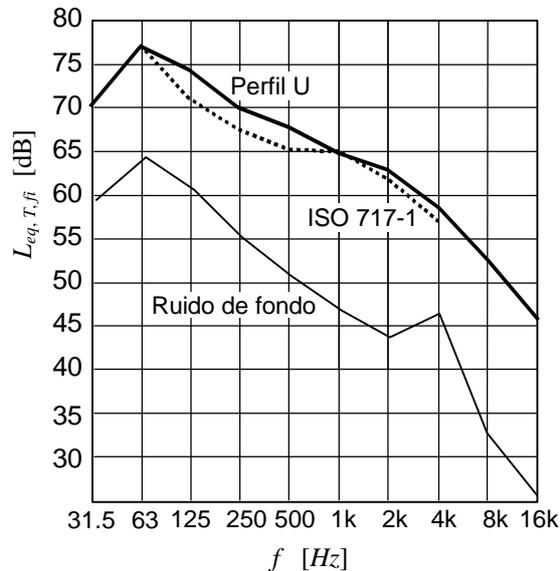


Figura 4. Comparación entre el espectro del ruido grabado en la ubicación con perfil U y el espectro del ruido del tránsito normalizado definido en la Norma Internacional ISO 717-1 sin ponderar. La curva de abajo es el espectro del ruido de fondo. La protuberancia sobre los 4 kHz se debe al canto de los pájaros.

6. Perspectivas de investigación futura

Sería muy interesante adoptar o desarrollar modelos para el cálculo de los espectros de ruido a partir de descriptores tales como el flujo de tráfico, su constitución (tipo de vehículos, proporción entre pesados y livianos) y las características acústicas del entorno (perfil transversal de la calle, tipo de pavimento). Los parámetros a utilizar en dichos modelos deberían ser actualizados con frecuencia para acomodar los modelos a las mejoras técnicas en materia de emisión de ruido.

A efectos de describir el ruido en áreas con bajo flujo vehicular es necesario también modelizar el ruido de fondo. Una inspección de la figura 3 sugiere que el espectro del ruido de fondo podría ser una versión atenuada del ruido del tráfico en las áreas circundantes más otras fuentes de ruido locales tales como pájaros, perros, personas, negocios, industria.

7. Conclusión

Se ha argumentado que la forma tradicional de concebir los mapas de ruido, es decir, informar la distribución geográfica de algún tipo de indicador de exposición con ponderación A, puede no ser adecuada. En su lugar se ha propuesto la idea de incluir información espectral detallada, y se discutió su factibilidad práctica generalizada mediante la incorporación de la grabación digital y el análisis por computadora. Finalmente, se ha ensayado en dos ubicaciones todo el proceso para obtener el espectro promedio.

Referencias

- Beranek, Leo L.: "Acoustics". McGraw Hill. New York, USA, 1954. Edición en castellano, "Acústica". Editorial Hispano Americana S.A. Buenos Aires, Argentina, 1961.
- Beranek, Leo L.: "Acoustical Measurements". American Institute of Physics. Cambridge (U.S.A.), 1993.
- Berglund, Birgitta; Hassmén, Peter; Job, R. F. Soames. "Sources and effects of low-frequency noise". Journal of the Acoustical Society of America 99 (5), May 1996, pp 2985-3002.
- Comisión Europea. "Position paper on EU noise indicators". Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. Luxemburgo, 2000.
- EPA (US Environmental Protection Agency): "Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety". US Environmental Protection Agency, 550/9-74-004, Washington DC, USA, March 1974.
- Fidell, S.; Barber, D.S.; and Schultz, T.J.: 1991. "Updating a Dosage-effect Relationship for the Prevalence of Annoyance due to General Transportation Noise". Journal of the Acoustical Society of America, vol 89. pp. 221-233.
- Fletcher, H.; Munson, W. A.: "Loudness, its definition, measurement and calculation". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 5, pp. 82-108, 1933.
- Harris, C. "Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control". Acoustical Society of America. Woodbury, New York, USA, 1998.
- ISO 532:1975 "Acoustics - Method for calculating loudness level"
- ISO 1996-1:1982 Acoustics - Description and measurement of environmental noise - Part 1: Basic quantities and procedures
- Miedema, Henk M. E.; Vos, H.: "Exposure-response relations for transportation noise". Journal of the Acoustical Society of America 104 (6), December. 1998.
- Miedema, Henk M. E.; Oudshoorn, Catharina G. M. "Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and their Confidence Intervals". Environmental Health Perspectives. Vol 109 No 4. April 2001.
- Miyara, Federico. "¿Ruido o señal? La otra información. En defensa del registro digital del ruido urbano". Cuarta Jornada Regional sobre Ruido Urbano. Montevideo, 14/07/01
- Schomer, Paul D.: "Loudness-Level Weighting for Environmental Noise Assessment". Acustica. Vol 86 (2000). pp 49-61
- Schomer, Paul D.: "Use of the New ISO 226 Equal Loudness Contours as a Filter to Assess Noise Annoyance". Internoise 2001. The Hague, Holland. August 27-30, 2001
- Schomer, Paul D.; Suzuki, Yoiti; Saito, Fumitaka: "Evaluation of loudness-level weightings for assessing the annoyance of environmental noise". Journal of the Acoustical Society of America 110 (5) Pt 1, Nov 2001 pp 2390-2397.
- Schomer, Paul D.: "Further Results Using Loudness-Level Weighting to Assess Noise Annoyance". Internoise 2002. Dearborn, Miami, USA. August 19-21, 2002
- Schomer, Paul D.: "Alternative Methods to A-Weighting for Environmental Noise Assessment". Internoise 2002. Dearborn, Miami, USA. August 19-21, 2002
- Schultz, T. J.: "Synthesis of social surveys on noise annoyance". Journal of the Acoustical Society of America 64 (2), Aug. 1978.
- Stevens, S. S.: "Procedure for Calculating Loudness: Mark VI". Journal of the Acoustical Society of America, Vol 33, No 11, November, 1961, pp 1577-1585