

# EL RUIDO AMBIENTAL URBANO EN MADRID. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA POBLACIÓN POTENCIALMENTE AFECTABLE

**Antonio Moreno Jiménez y Pedro Martínez Suárez**

Dpto. de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid.  
Madrid

## RESUMEN

El actual funcionamiento de las ciudades está ocasionando una alteración importante de su medio ambiente en múltiples facetas. Una de esas manifestaciones, hasta hace poco olvidada, pero de creciente interés social y político, es la degradación de ambiente sonoro. En este artículo se aborda un análisis de la situación sonora de la ciudad de Madrid y del grado de afección potencial de la población durante el período nocturno, a partir de los datos del Plano acústico de 2001-02. Con ello, el estudio realizado pretende poner en la agenda de la indagación empírica y metodológica este aspecto de la interacción hombre-medio, con fines de evaluación y eventual toma ulterior de decisiones.

**Palabras clave:** ruido ambiental, ciudad, población, evaluación de impacto, SIG.

## ABSTRACT

The urban environmental noise in Madrid. Spatial pattern and quantitative assessment of the potentially affected population.

Present life of cities strongly modifies its environment in many aspects. One of them, largely delayed, but nowadays provoking increasing social and political concern, is the degradation of acoustic environment. In this paper it is tackled an analysis of the sonorous situation in Madrid and the potential affection on population during the night, based on 2001-

---

Fecha de recepción: Mayo de 2005.

Fecha de admisión: Julio de 2005.

02 acoustic map. In this way, the study intends to set in the empirical and methodological research agenda this dimension of man-environment interaction, envisaging assessment, and further decision making.

**Key words:** environmental noise, city, population, impact assessment, GIS.

## I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La creciente preocupación por la contaminación que ha calado en el mundo actual, la atmósfera intelectual y social de nuestro tiempo, permeable cada vez más a conceptos y valores como los de sostenibilidad y calidad ambiental y las dinámicas emergidas en torno a los mismos, los han situado dentro de la esfera de los intereses cognoscitivos, productivos y reproductivos, que movilizan a nuestras sociedades. Hoy en día ya nadie en nuestro entorno renuncia a aspirar a un medio vital de calidad. Como es bien sabido, esa calidad del ámbito donde la población desenvuelve su vida está supeditada a un alto número de componentes y, al respecto, uno de los que ha adquirido una relevancia indiscutible en los ámbitos urbanos es el ruido ambiental (vid. Muscar, 2000, 150-151; García et al., 2001; García Sanz y Garrido, 2003, cap. I).

Por poner dos ejemplos fehacientes de las afirmaciones anteriores baste recordar, en primer lugar, que la Unión Europea ya tomó conciencia del problema del ruido, primero a partir del Informe Dobrás sobre el medio ambiente en Europa (Agencia Europea del Medio Ambiente, 1998), donde se le dedicó una parte del cap. 16 y, sobre todo, con el Libro Verde de la Comisión Europea sobre «Política Futura de Lucha Contra el Ruido», publicado en 1996, en el que se hacía un pronunciamiento nítido sobre la necesidad de aclarar y homogeneizar el marco normativo del ruido (vid. Bento Coelho, 1997).

Y, en segundo lugar, y como corroboración de esa superior gravedad a escala local, puede traerse a colación una cita del responsable de la Unidad de Niveles Sonoros del Ayuntamiento de Madrid (Perera, s.f. b) quien escribía al filo del reciente cambio de milenio que «más del 50% de las denuncias que en temas medioambientales recibe el Ayuntamiento de Madrid tienen como causa las molestias por contaminación acústica»<sup>1</sup>.

El tema del ruido ambiental está adquiriendo así un progresivo protagonismo, que resulta perceptible bajo varias manifestaciones:

- Presencia frecuente de dicha problemática en medios de comunicación.
- Coalescencia de grupos sociales de interés articulados en torno a la red de redes, como los portales de Internet, [www.ruidos.org](http://www.ruidos.org) (España), [www.nonoise.org](http://www.nonoise.org) (EEUU), [www.bruit.org](http://www.bruit.org) (Francia), etc., e intentos de movilización global a través, por ejemplo, de la institucionalización del Día Internacional de la Conciencia del Ruido (28 de abril), según propugna la estadounidense League for the Hard of Hearing ([www.lhh.org](http://www.lhh.org)).

---

<sup>1</sup> Otra significativa huella de los problemas del ruido ambiental en España es la que se refleja en los informes del Defensor del Pueblo. Sobre el particular véase el trabajo de Martín-Retortillo Baquer (1994).

- Creciente aportación de comunicaciones en congresos y foros científico-profesionales, nacionales e internacionales, y de artículos en revistas científicas (v. gr. Applied Acoustics, Journal of the Acoustic Society of America o la española Revista de Acústica).

Nos encontramos, por tanto, con una problemática de una relevancia innegable, que posee una dimensión espacial incontestable y al que la Geografía ha aportado relativamente poco. En efecto, aunque en algunas ciencias el abordaje de los ruidos afloró hace un tiempo por razones de investigación fundamental y aplicada (casos de la Física, la Medicina, la Psicología, la Arquitectura o las Ingenierías), en otras, como la Geografía, la Sociología o la Economía, los estudios sobre el ruido se han caracterizado por su postergación hasta fechas muy recientes.

En Geografía concretamente (y más aún en España), pese a que se cuenta con ciertos antecedentes, algo lejanos, pero encomiables, como el capítulo sobre el ruido urbano de Stevenson (1972) dentro de un temprano manual sobre urbanización y medio ambiente, o el artículo de Barceló Pons (1975), sólo recientemente han aparecido algunas otras aportaciones. Unas son de carácter general, como la de Muscar (2000) o la de Mulero Mendigorri (1999, cap. 5) en un manual sobre medio ambiente en España; otras abriendo embrionarias sendas, como las centradas en la valoración de los impactos potenciales del ruido (Moreno, 1999; Moreno y Hodgart, 2003) y en las limitaciones que ocasionan para los desarrollos residenciales (v. gr. Joerin, Theriault y Musy, 2001), y que apuntan sobre todo hacia la geografía aplicada. En bastantes países los hechos parecen haber transcurrido de forma similar. Como asevera el geógrafo francés Roulier (1999, 2) «el espacio sonoro raramente ha llegado a despertar el interés de los geógrafos», añadiendo como explicación que «el sentido de la vista ha sabido siempre imponer su tiranía en nuestra ‘aprehensión’ del mundo».

No extraña demasiado esa marginación por los geógrafos, que obedece probablemente a razones varias: la escasez de datos, la menor gravedad antaño de los problemas de ruido, la mayor dificultad para aprehender un fenómeno que tiene ciertas singularidades físicas<sup>2</sup>, la inercia de las líneas y tradiciones de investigación, etc.

El presente trabajo realiza una primera aproximación empírica a un caso concreto, para empezar a sistematizar sus rasgos y a explorar métodos que midan el impacto potencial del ruido sobre la población. Varias razones pueden aducirse para justificar esa elección:

- La necesidad permanente de escrutar los problemas ambientales de los ámbitos urbanos por la intensidad que allí revisten y la cifra de ciudadanos afectables (Agencia Europea de Medio Ambiente, 1998, cap. 10).
- Existe una obligatoriedad normativa reciente, con un calendario temporal definido, para disponer de una «contabilidad» de los impactos generados por el ruido (lo que está concitando la emersión de auditorías ambientales sonoras).

---

<sup>2</sup> Roulier (1999, 9) recoge algunas notables: el espacio sonoro es insoluble de su cualificación temporal, es un espacio fragmentado (no homogéneo, ni continuo) y es metabólico (las formas que lo componen aparecen ora como fondo sonoro, ora como figuras sonoras diferenciadas y destacadas).

- Las metas avistadas aquí conciernen a facetas bastante menos investigadas; muchos esfuerzos hasta ahora se han centrado sobre todo en la obtención de datos físicos, que resulta costosa y de rigor francamente mejorable.
- Los métodos para evaluar impactos se han revelado insuficientes y hay al respecto un horizonte pendiente para explorar.

En resumen, el trabajo se incardina en una de las más genuinas tradiciones geográficas y de las modernas ciencias ambientales: el estudio de la relación hombre-medio (Santos, 1995; García Ballesteros, 2000), conjugando la faceta ambiental con la cara socio-demográfica. En tal sentido, coincide con pronunciamientos reiterados acerca de las líneas de desarrollo de la Geografía de la población, que apuestan por el binomio población-medio ambiente y la geodemografía aplicada (vid. Gozávez, 1992, 252; García Ballesteros, 1994, 608; Burriel de Orueta, 2002).

## II. LOS OBJETIVOS DE ESTUDIO Y EL MARCO CONCEPTUAL

Son básicamente dos los objetivos avistados en este artículo. En primer lugar, iniciar la caracterización de la atmósfera sonora de la ciudad de Madrid, a partir de las posibilidades de las nuevas fuentes de datos: ¿cuál es el patrón espacial que el ruido ambiental urbano conforma en Madrid?, ¿qué variaciones y regularidades locales se vislumbran? En segundo lugar, la preocupación indagatoria se centra en aproximarnos a averiguar qué cantidad de población sufre / disfruta qué niveles sonoros. Acotada así nuestra intención, con ello solamente abordamos alguno de los significados que el medio sonoro ofrece en la ciudad (vid. López Barrio, 2001), pero permite ubicar este trabajo bajo el prisma conceptual de la eficiencia, como principio facilitador de juicios de valor sobre ese problema actual.

Una de las metas sociales permanentes estriba en conseguir que el funcionamiento de los sistemas, entre ellos los territoriales, tenga lugar con un grado elevado o máximo de **eficiencia**. Si en el concepto de eficiencia contemplamos, como es exigible, no solo los beneficios sino también los costes, cabe entonces avistar una contabilidad más exacta del «output» del sistema urbano. Dados unos recursos disponibles, maximizar los resultados positivos (beneficios o utilidades «sensu lato») y minimizar los negativos (costes, desutilidades) iría en pos de la meta deseable de eficiencia.

El énfasis en la dimensión (e indicadores) territorial o ambiental, a la hora de abordar el análisis de un sistema, ha conferido legitimidad para hablar de **eficiencia espacial o ambiental**, conceptos que se manejan en Geografía y otras ciencias sociales desde hace ya algunas décadas. En el caso que nos ocupa se podría hablar de una mejora en la eficiencia ambiental si se consiguiera una menor aficción por contaminación acústica sobre el entorno o los ciudadanos, con nulos o escasos costes.

La fuerte conciencia ambiental que caracteriza a nuestro tiempo ha acuñado un concepto nuevo, la **ecoeficiencia**, para integrar ambas dimensiones semánticas. Tal neologismo emergió en el seno del World Business Council for Sustainable Development, tras la celebración de la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, en la que se consagró el concepto de desarrollo sostenible.

Con la ecoeficiencia se alude a la prevención de la contaminación y la generación de residuos y, en general, cualquier tipo de impacto medioambiental, desde un punto de vista económico, de forma que los esfuerzos ecológicos se traducen en ahorros económicos para la empresa y/o la sociedad. Se trata, pues, de llevar a la práctica la sostenibilidad integrando las variables ambiental, económica y social.

La idea se ha extendido e impulsado por otras organizaciones internacionales (v. gr. el PNUMA y la OCDE) y, en España, la Fundación Entorno inició hace algunos años un programa de Ecoeficiencia con el fin de implantar esa «filosofía» y práctica en las empresas españolas (*Expansión*, 28 octubre de 2003, 18).

En resumen, bajo tales premisas debe valorarse el intento aquí de examinar, con el grado de rigor posible hoy, una cuantificación de la afección acústica potencial recibida por la población. Parece obvio asumir que cuanto más elevadas sean las cifras de «impacto» más indeseable es una situación y, por tanto, cabe afirmar, más ineficiente.

### III. EL ÁMBITO DE ESTUDIO

La delimitación de la porción del territorio a contemplar en una investigación geográfico-ambiental debe sustentarse en una justificación. Al respecto, varios son los criterios procedentes aquí:

- Despliegue espacial del fenómeno: ello abogaría por establecer los límites de manera que el ámbito seleccionado fuese coextensivo con aquél donde el fenómeno ocurre de manera significativa. Las delimitaciones geográficas suelen ser «duras» en el sentido de que dividen abruptamente el espacio, aunque, como es bien sabido, muchos fenómenos responden más a una lógica borrosa, por cuanto manifiestan zonas de transición o gradación paulatina, y no «entienden» de fronteras. Por tal motivo, el perímetro adoptado a menudo adolecerá de una cierta artificialidad.
- Congruencia con los factores que lo determinan y las consecuencias que ocasiona: las interacciones espaciales suelen ser dispares y de desigual alcance territorial, lo que, a menudo, complica la decisión de por dónde delimitar.
- Relevancia desde el punto de vista de la toma de decisiones: en no pocas ocasiones, la pre-existencia de unas demarcaciones político-administrativas implica que ciertos organismos tienen unas funciones o competencias que dan unidad y sentido a las transformaciones e intervenciones (e.g. de planificación o gestión).
- Significado para la sociedad: desde el punto de vista humano muchos fenómenos adquieren una trascendencia desigual, en función de que conciernan o no a personas o a colectivos de cierta cuantía, lo que abogaría por demarcar el ámbito de trabajo atendiendo también a la forma del poblamiento.

Partiendo, inicialmente, del municipio de Madrid (principio de demarcación administrativa), resulta apropiado depurar ese ámbito para poner la atención, sobre todo, en el espacio ocupado por usos del suelo urbano, por cuanto es en él donde la población consume la mayor parte de su tiempo, generando y percibiendo, por tanto, ruido ambiental (criterio de significado social). Por tal motivo, adoptar la delimitación censal denominada como

«núcleo urbano» (la más reciente corresponde a 2001) resulta congruente. Finalmente, como fenómeno ambiental, la contaminación acústica, salvo causas concretas muy conocidas y localizadas (por ejemplo, el ruido de los aviones), no se despliega espacialmente de una forma demasiado extensa, sino que, como se concretará más adelante, sus interacciones (e. g. efectos) se circunscriben a un derredor limitado en torno a la fuente (criterios de despliegue e interacción espacial). Otros procesos contaminantes, como por ejemplo las emisiones de gases o de radiación, pueden, como es sabido, extenderse mucho más ampliamente sobre el territorio.

En resumen, por cuanto antecede resulta, de momento, aceptable contemplar los núcleos de población ubicados dentro del municipio madrileño, como unidades significativas para realizar un análisis del ruido urbano, aunque más adelante se matizará dicha demarcación con criterios complementarios (vid. figura 1).



Figura 1. Límites del municipio de Madrid, de los núcleos urbanos (2001) y de los distritos municipales.

#### IV. EL RUIDO AMBIENTAL Y LA EXPRESIÓN ESTADÍSTICA DE SU INTENSIDAD

Está bien asentada la definición del **ruido** como conjunto de sonidos que en su percepción aparece como indeseable y desagradable, por lo que la catalogación de un sonido concreto como ruido recae, en cierto modo, en la subjetividad individual del sujeto perceptor, y así se ha reconocido por los expertos. Como es bien sabido, otros sonidos pueden generar sensaciones gratificantes o neutras (Barceló, 1975, 2; VVAA, 1991, 9). La complejidad de discernir lo estrictamente calificable como ruido se acrecienta si se tiene en cuenta que, dependiendo de muchas circunstancias (hora del día, lugar donde se está, actividad que se realiza, estado de salud, situación psicológica, etc.), el mismo sonido puede significar algo agradable, indiferente o insoportable, incluso para el mismo individuo.

El sonido, desde el punto de vista físico<sup>3</sup>, se origina a partir de unas perturbaciones mecánicas en un foco emisor que se propagan como movimientos regulares y sistemáticos (ondas sonoras) a través del medio transmisor, y que llegan al oído, donde en virtud de efectos mecánicos afectan a los nervios auditivos, los cuales producen finalmente en el cerebro una determinada sensación (García, 1988, 22-23). Dos rasgos del sonido resultan de superior interés: la frecuencia (alusiva a la composición del mismo y relacionada con la altura tonal, e. g. agudos-graves) y la intensidad (determinada por las variaciones de presión, las frecuencias y la superficie receptora). En nuestro trabajo abordaremos el análisis de la segunda de ellas, cuya medición más conspicua se expresa en decibelios ponderados según la escala (red de compensación) A (dBA), por su buena correlación con la percepción subjetiva humana de dicha variación de presión.

Una importante característica de la llamada polución sonora, como bien resaltó Barceló (1975, 1), es que a diferencia de otros contaminantes, su duración temporal en el ambiente depende de la casi simultánea emisión, de suerte que cesada la producción de ruido, desaparece aquélla. No se genera prácticamente efecto acumulativo por persistencia y por tanto los impactos no se extienden a generaciones venideras.

Como fenómeno continuo en el tiempo que es, el ruido, en un lugar dado, varía de manera instantánea y permanente. Ello suscitó la conveniencia de obtener indicadores representativos para períodos relevantes (por horas, para los lapsos de descanso, etc.), de suerte que permitiesen caracterizar, es decir, describir y valorar, el nivel sonoro para un lugar y un período definido. Dentro de ellos, uno de los más apropiados para los fines aquí buscados es el denominado como **nivel sonoro continuo equivalente** ( $L_{Aeq}$ ). Puesto que el sonido transporta energía, el diseño de la fórmula se basa en imputar al período adoptado como unidad temporal aquel nivel de ruido constante que tuviese la misma energía que el ruido variable ocurrido en el lapso considerado (López Muñoz, 1992, 52). Se percibe claramente su vocación de indicador de centralidad, puesto que tal valor de ruido permanente y homogéneo (i.e. promedio) sería equivalente en contenido de energía al ruido variable registrado en el período.

Partiendo de  $n$  medidas discretas tomadas a intervalos temporales regulares, el indicador se obtendría así (García, 1988, 64; VVAA, 1991, 50; López Muñoz, 1992, 53):

---

3 Sobre este punto resulta bastante asequible el capítulo 1 del manual de VVAA (1991, 9-57).

$$L_{Aeq} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Siendo  $n$  = el número de medidas derivadas del muestreo temporal sistemático,  $L_i$  = medida (dB) en el instante  $i$ . Se trata, por tanto, de una suerte de promedio a partir de las  $n$  medidas o sucesos.

La importancia de este indicador estriba en que la legislación nacional e internacional se apoya fundamentalmente en él para establecer determinaciones de muy diverso tenor (protección laboral, preservación del descanso, salvaguarda para actividades que requieren silencio, etc.).

A efectos de análisis y aplicación práctica procede obtener el indicador anteriormente descrito para períodos significativos. El ciclo diario de la vida humana marca unas horas de vigilia y otros períodos de descanso cuya caracterización sonora resulta relevante. A tal fin se definen el «nivel sonoro continuo equivalente» para las 24 horas ( $L_{Aeq\ 24\ h.}$ ), para el período diurno ( $L_d$ ) y para el nocturno ( $L_n$ ).

La valoración del nivel sonoro en un ambiente dado goza ya de bastantes pronunciamientos desde el punto de vista técnico y normativo. Se suele así discriminar entre diferentes actividades y usos del suelo, en cuanto a niveles admisibles. A efectos de los intereses de este trabajo merece recordar que existe una amplia convergencia en considerar como niveles acústicos ambientales límite en zonas residenciales los 65 dBA para el día y los 55 dBA para la noche. Como tal aparecen en la normativa de la Comunidad de Madrid y en la ordenanza del municipio de Madrid.

## 1. El ruido urbano y su plasmación en mapas acústicos

Las causas que generan sonido son múltiples, unas de origen natural, otras de procedencia humana. Con el tiempo, éstas últimas han ido adquiriendo una importancia creciente, debido sobre todo a las máquinas, dispositivos e instalaciones que la tecnología ha ido desarrollando. Las fuentes de ruido en el ámbito urbano están ya bastante identificadas y analizadas por los expertos. Las más notables son el tráfico rodado (la más destacada con diferencia), el tráfico aéreo y ferroviario, las actividades industriales, la construcción y las obras públicas, las sirenas y alarmas, las actividades colectivas, principalmente de ocio (en interior y al aire libre)<sup>4</sup> y el complejo llamado ruido comunitario, derivado de equipos e instalaciones de las viviendas, otras actividades de las personas, etc. (Stevenson, 1972, 199-221; García, 1988, 75; VVAA, 1991, cap. 3).

El planteamiento más extendido para obtener una imagen del ruido urbano con fines de diagnóstico de situaciones y de ordenación acústica ambiental se ha encaminado hacia la elaboración de los llamados mapas acústicos<sup>5</sup>. Como antecedentes de esta fuente (García, 1988, 78-80; García, sf, 128) se citan los mapas sonoros de Toulouse y de Dortmund de la década

4 Varios estudios de caso en España se hallan incluidos en la publicación oficial de *Tecniacústica 2000*.

5 Ocasionalmente, por algún autor, se ha usado la expresión «catastro acústico» para denotar específicamente la inclusión de la zonificación acústica del territorio (i.e. las zonas según los niveles máximos de inmisión admisibles). Vid. por ejemplo Majó Torrent y Puig Godes (2000).



de los sesenta y los primeros trabajos de medición de los niveles sonoros en Madrid por parte del Instituto de Acústica del CSIC a partir de 1967. En los años setenta y ochenta se elaboró ya un sistema cartográfico, apoyado en ordenador, con tal finalidad en Montreal, y con él se realizó un estudio de curvas isofónicas, de la relación entre ruido y molestias expresadas por los residentes, de la correlación entre ruido y rasgos socioeconómicos de las diferentes zonas de la ciudad, etc. El mapa sonoro pionero en España fue el de Valencia (basado en registros de campo entre 1979-1981) en el que se tomaron datos en 380 sitios separados 250 m. aproximadamente, que cubrían la casi totalidad del área urbana consolidada y más del 90 % de la población (estimación). Con posterioridad, otras ciudades españolas han ido incrementando el conjunto de las que poseen esta fuente de datos ambientales.

## **2. El mapa de ruido de Madrid como fuente**

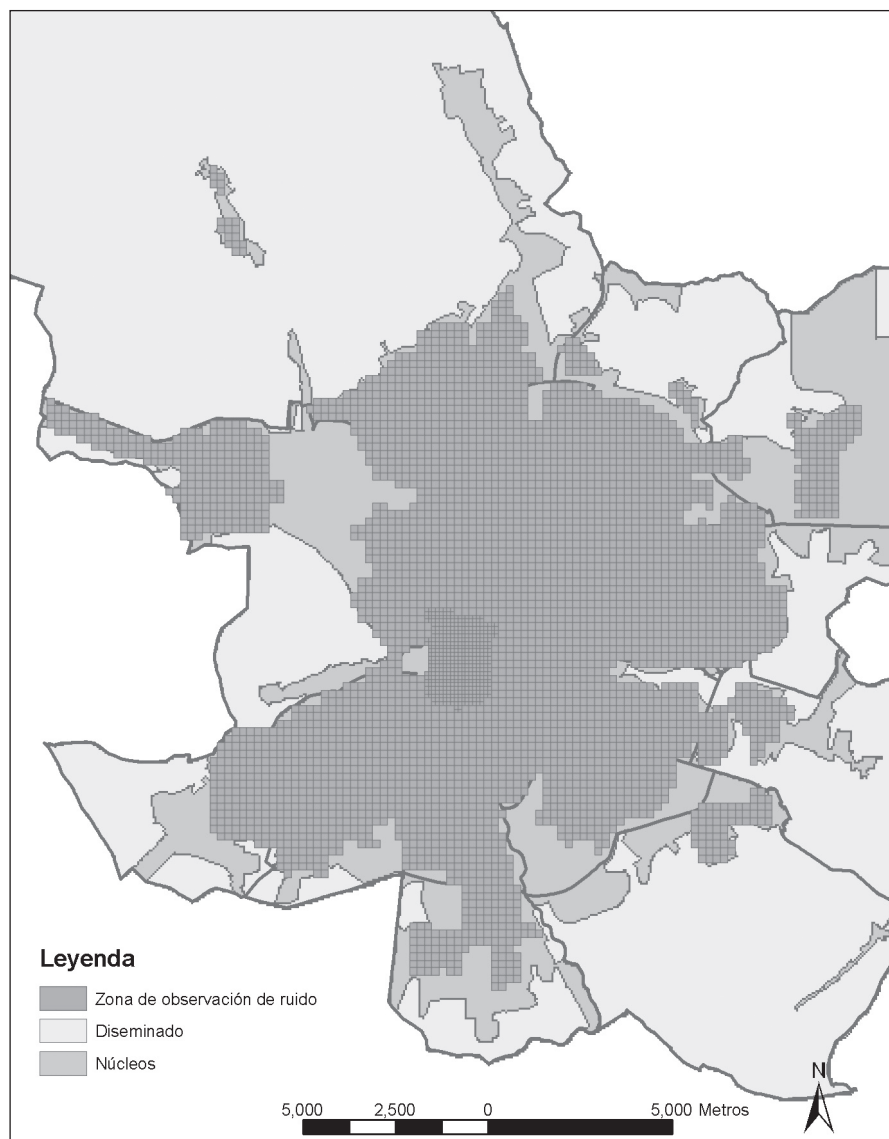
En la capital madrileña, tras unos estudios pioneros y otros específicos de los niveles sonoros en el aeropuerto de Madrid-Barajas (en 1971 y en 1980, generando el mapa acústico de dicha instalación), en 1985-86 se acometió la elaboración del primer plano acústico de la ciudad, con objeto de tener una aproximación tentativa a esa dimensión ambiental (Perera, 2001, 18-19), si bien su cobertura, tanto temporal, como espacial, fue sólo parcial. En 1998 se llevó a cabo otro estudio sonoro cubriendo esta vez sólo el distrito Centro (Perera et al., 2000).

Dentro de las iniciativas contempladas en el 1<sup>er</sup> Plan Estratégico para la Reducción de la Contaminación Acústica (PERCA, 2001-2003) de Madrid se acometió la ejecución de un nuevo plano acústico. Al igual que en el mapa anterior, para la selección de puntos para el registro de datos se usó una cuadrícula básica de 200 x 200 m., pero se complementó con subcuadrículas de 100 x 100 m. para el distrito de Centro y de 400 x 400 m. para áreas más despejadas (zonas verdes, por ejemplo). La toma de datos de campo recurrió en esta ocasión a medidas en continuo de 24 h. en puntos centrales y medidas en continuo de 5 minutos en puntos secundarios y posterior transformación de los mismos en valores para 24 horas. En total se realizaron medidas sobre casi 4400 puntos, finalizando los trabajos en 2001.

La cobertura espacial del mapa acústico de 2001-02 se extiende a la parte más significativa del término municipal. Los datos que para esta investigación ha sido posible disponer corresponden a la zona cubierta por las cuadrículas de 200 y 100 m. y su transcripción espacial se muestra en la figura 2. En síntesis, la porción más significativa del casco urbano y, especialmente, las zonas residenciales, están contempladas en el plano acústico, lo que posibilita un análisis adecuado de la relación entre ruido y población, según aquí se avista.

Los datos básicos recogidos en la fuente usada son  $L_{Aeq}$  para las 24 horas,  $L_{Aeq}$  para el período diurno ( $L_d$ ) y  $L_{Aeq}$  para la noche ( $L_n$ ). A partir de ellos se ha obtenido otro indicador sintético, el denominado  $L_{dn}$ . En esta fuente, el período diurno comprende de 7 a 23 horas (salvo festivos, que es de 8 a 23) y el nocturno de 23 a 7 h. (excepto festivos, en que se extiende hasta las 8).

Como una valoración somera de la fuente cabe señalar la novedad de contar con una cobertura amplia y sistemática de la ciudad que abre la puerta a estudios y aplicaciones muy relevantes, el problema de la coexistencia de fracciones de muestreo espacial distintas, que pueden ocasionar sesgo en los resultados analíticos y en las conclusiones (el conocido



**Figura 2.** Zona cubierta por el Plano acústico de Madrid 2001-02 (cuadrículas de 100 y 200 m.), sobre el fondo de los núcleos urbanos y del límite municipal.

problema de la unidad espacial modificable), el redondeo de los citados indicadores de ruido (en dBA) a valores enteros, la imputación sin más de los registros de campo a puntos equidistantes (100 ó 200 m.) cuando las circunstancias a menudo fuerzan a que la regularidad en la separación no sea factible, el soporte informático adoptado en origen y que requirió una reconversión a un SIG estándar (ArcGIS), etc.

## V. LOS NIVELES SONOROS URBANOS EN MADRID: UNA PRESENTACIÓN SINTÉTICA

### 1. Examen a-espacial

A la hora de realizar la descripción y síntesis estadística de los niveles sonoros urbanos a partir de datos como los disponibles en el mapa acústico conviene plantear previamente la elección apropiada de los indicadores estadísticos. Las magnitudes sonoras convencionales (dB) no admiten las operaciones aritméticas habituales, por lo que aplicar estadísticos como la media o la desviación típica a los indicadores acústicos resulta poco apropiado, ya que implican tales tipos de operaciones. En su lugar, el uso de estadísticos como la mediana o los percentiles parece más legítimo y respetuoso con la naturaleza de los datos. Tal será la pauta que aquí seguiremos a continuación, donde se realizará una caracterización sumaria de los niveles acústicos de la capital madrileña, usando los indicadores acústicos más reconocidos (basados en el nivel sonoro continuo equivalente,  $L_{Aeq}$ ), para el conjunto de la ciudad.

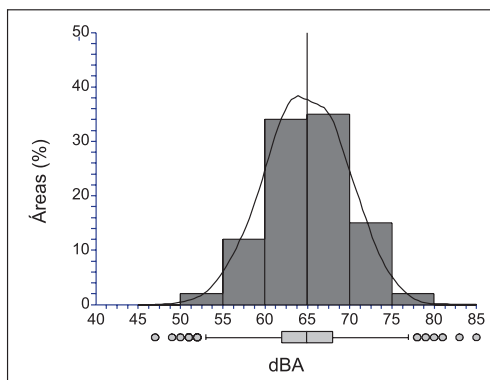
Como punto de partida para ofrecer una descripción de la realidad acústica madrileña destaca que la **mediana** del  $L_{Aeq\ 24\ h}$  queda escasamente por debajo del nivel de 65 dBA, establecido por organismos internacionales como la OCDE y la OMS (cuadro 1) como referencia no deseable de superar. Para el período diurno el indicador coincide con ese umbral, lo que implicaría que en la mitad de las unidades espaciales tratadas el ruido estaba por encima del valor deseable para zonas residenciales durante el día. Para la noche la mediana, 59 dBA, superaba ampliamente el máximo recomendado (55 dBA) para dichas áreas. Esta primera constatación debe ser tomada con cierta cautela, tanto aquí, como en el resto de este documento, por cuanto no todos los puntos muestrales coinciden con zonas residenciales. La no disponibilidad aún del mapa de áreas acústicas limita la posibilidad de formar un juicio exacto a partir de los datos citados<sup>6</sup>. Obviamente, aplicar a todo el ámbito urbano los umbrales propios de zonas residenciales implica un juicio peor que el debido.

Examinando otros estadísticos de posición como el **cuartil 1** se constata que, para la noche, dicho índice coincide con el umbral máximo admisible normativamente para zonas residenciales (55 dBA), esto es, las tres cuartas partes de las unidades espaciales se sitúan por encima, lo que no parece un dato muy positivo. Respecto a los valores más altos, detectados por el **percentil 90**, resulta destacable que un 10 por ciento de las unidades supere en 11 dBA el nivel máximo establecido.

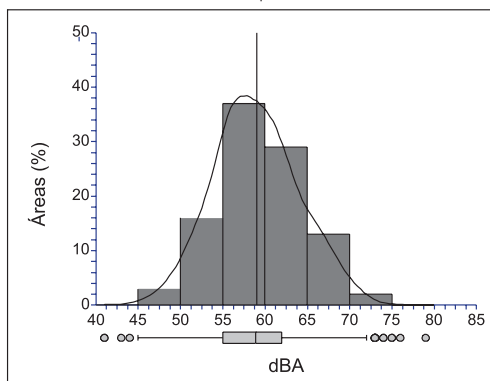
Las variaciones en los indicadores, a tenor de los estadísticos elegidos, la amplitud semi-intercuartil y la total, se muestran prácticamente similares, tanto en el conjunto del día como en los dos tramos, día y noche, relevantes. En cualquier caso merece reseñarse que la amplitud de los niveles de ruido ambiental es notable y que, además, los valores máximos son bastante elevados, casi duplicando a los mínimos; ello denota desigualdades intraurbanas acusadas.

---

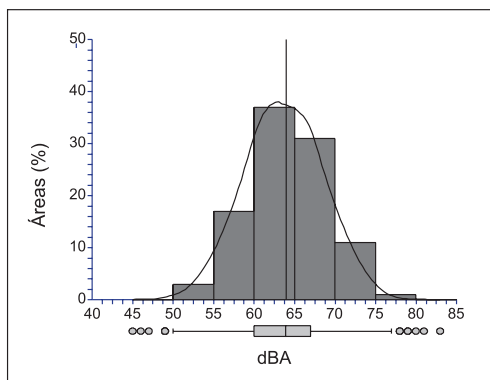
<sup>6</sup> Debe añadirse al respecto que en el documento del Ayuntamiento de Madrid (s.f.) sobre el Nuevo Plano Acústico 2001-2002, tras descontar las zonas donde no era aplicable (industriales o dotacionales), se cifraban en 71,78 por ciento los puntos donde se cumple el requisito de estar por debajo de 65 dBA en el indicador  $L_{Aeq\ 24\ h}$  horas.



$L_{Aeq \text{ día}}$



$L_{Aeq \text{ noche}}$



$L_{Aeq \text{ 24h}}$

**Figura 3.** Distribución de los niveles sonoros 2001-2002 para el período diurno, nocturno y las 24 horas en Madrid. Junto al histograma se muestra la línea de densidad y el diagrama de caja. La línea vertical discontinua ubica la mediana. Fte. Elaboración propia.

La visión se puede completar con la inspección de la distribución gráfica de los índices sonoros que se muestra en la figura 3. La línea de densidad en los tres casos no está demasiado lejos de la forma gaussiana, si bien las distribuciones para la noche y las 24 horas exhiben una ligera asimetría. Las frecuencias aparecen notablemente concentradas en los dos intervalos centrales y disminuyen hacia ambas colas.

**Cuadro 1**

ESTADÍSTICOS DE LOS INDICADORES DE RUIDO DEL PLANO ACÚSTICO 2001-02 DE MADRID

	$L_{Aeq \text{ día}}$	$L_{Aeq \text{ noche}}$	$L_{Aeq \text{ 24 h.}}$
Mediana	65	59	64
$Q_1$	62	55	60
$Q_3$	68	62	67
$P_{10}$	59	52	57
$P_{90}$	71	66	70
$A_g$	3	3,5	3,5
Mínimo	47	41	45
Máximo	85	79	83
Amplitud total	38	38	38

N = 4397. Fte. Elaboración propia.

## 2. Examen espacial

La «imagen sonora» que, en su transcripción espacial (cartográfica), ofrece la ciudad permite otra significativa apreciación de la realidad. La inspección de los niveles de ruido para las 24 horas por cuadrículas (figura 4), en una aproximación sintética, desvela varios hechos destacados:

- Una propensión de la contaminación sonora a ser más severa en buena parte de los distritos interiores, aunque en algunos periféricos afloran así mismo manchas de ruido destacado.
- Una asociación bastante consistente entre grandes vías de transporte automovilístico (e. g. la orbital M-30) y ejes interiores importantes (e.g. C/ Raimundo F. Villaverde y Reina Victoria) con niveles sonoros altos, si bien aparecen algunas anomalías de difícil explicación. Una de ellas se detecta en un tramo oriental de la mencionada M-30 (con ruido sorprendentemente bajo).
- Unos contrastes espaciales importantes, apareciendo, como hemos dicho antes, manchas con valores bajos y otras con niveles ostensiblemente altos.
- Unas variaciones a cortas distancias a veces considerables. Con cierta frecuencia afloran cuadrículas con cifras bajas o altas, adyacentes a otras con valores contrapuestos.

Tal fenómeno es algo peculiar del sonido, y consustancial con las fuertes perturbaciones que sufre en su difusión por el medio urbano.

Las últimas observaciones suscitan la pregunta de en qué grado y con qué signo aflora la autocorrelación espacial en este indicador. Como es bien sabido, se trata de aprehender con dicho concepto, en qué medida la similitud / disimilitud de los valores de la variable está en relación con la proximidad / lejanía de las unidades estadísticas espaciales (puntos, áreas, etc.). De esta manera, la autocorrelación resulta positiva cuando hay tendencia clara a que los valores de los lugares próximos sean más similares, negativa cuando ocurre lo contrario (los lugares más próximos tienden a ser más disímiles) y nula cuando el patrón de similitud / disimilitud en los valores resulta aleatorio espacialmente.

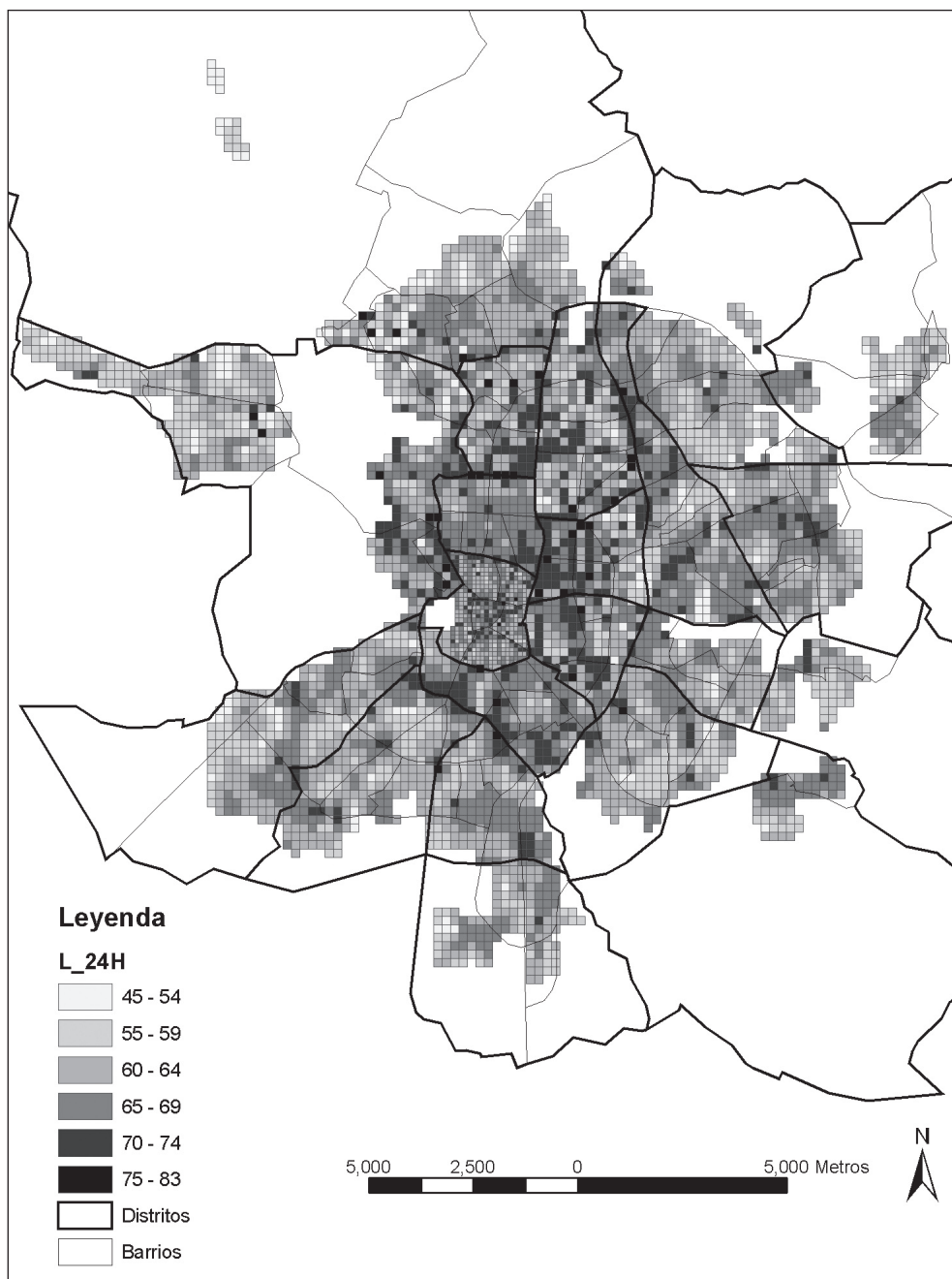
La averiguación de la misma puede realizarse con varios estadísticos (vid. Goodchild, 1986). En nuestro caso se ha elegido uno muy apropiado para el tipo de datos (una «lattice» o cuadrícula o retícula regular): la I de Moran. El estadístico varía entre +1 y -1 y mide la similitud entre valores como una covarianza, en tanto que la proximidad espacial puede ser expresada de diversas maneras (adyacencia, distancia, una función de la distancia, una banda de proximidad, etc.). La resolución del supuesto, realizada con las cuadrículas reseñadas y para dos tipos de indicadores de proximidad espacial (vid. Odland, 1988, 29-33) se muestra en el cuadro 2.

**Cuadro 2**  
ÍNDICES DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL DEL  $L_{Aeq\ 24\ h}$ .

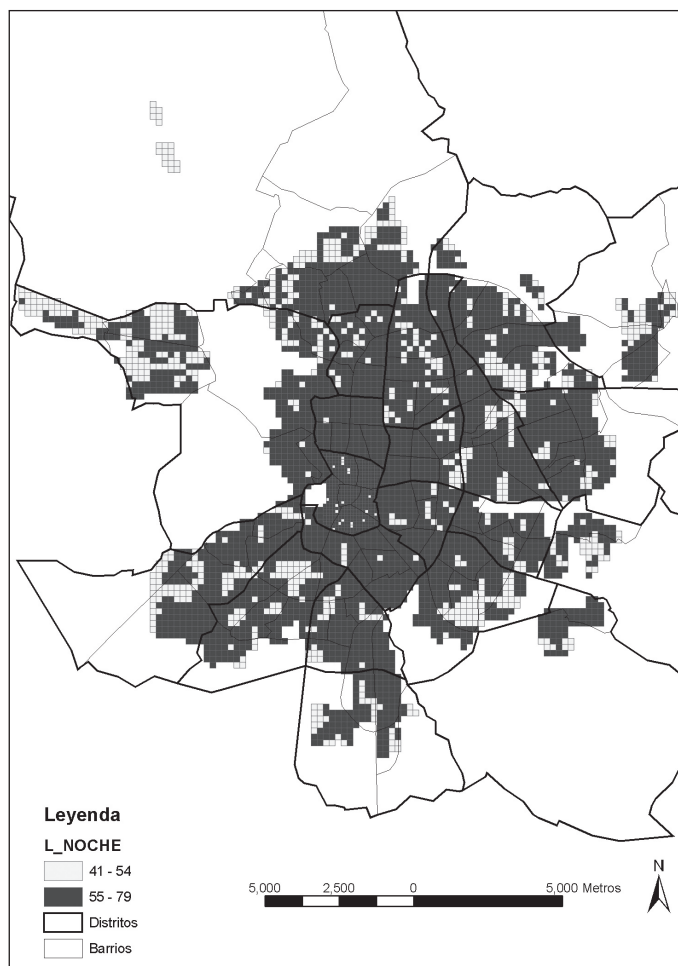
Índice o ponderación de la proximidad	I de Moran	Test de la $H_0 =$ autocorrelación nula en población
Distancia euclidiana	0,068	$Z = 155,38$ $\alpha = 0$ (existe autocorrelación en la población)
Distancia euclidiana al cuadrado	0,236	$Z = 77,29$ $\alpha = 0$ (existe autocorrelación en la población)

Antes de discutir el resultado conviene recordar que la difusión espacial del ruido es fuertemente dependiente de la distancia, pero no de una manera lineal, sino logarítmica (vid. al respecto Harris, 1977, cap. 3; García, 1988, 27-30; y VVAA, 1991, 24-32), y que los obstáculos pueden alterar notoriamente dicha difusión a través de procesos como la absorción, reflexión, refracción y difracción. Por tales razones, la similitud de los niveles acústicos tenderá a aflorar sobre todo entre lugares «muy» próximos.

El valor del índice cuando se usa la distancia euclidiana apunta a una distribución próxima a la aleatoriedad, lo cual ya es muy revelador. En esencia, lo que el primer valor del índice nos dice es que, con una cuadrícula construida con unidades espaciales de 100 y 200 m. (i.e. distantes como mínimo esos valores), el efecto de la proximidad en materia acústica apenas emerge en un medio tan «rugoso» como es el intraurbano. Pese a ello, y dado el tamaño de la muestra, el test de hipótesis permite afirmar la existencia de autocorrelación espacial en la población, aunque muy baja, como se deduce de su proximidad al valor 0.



**Figura 4.** Niveles sonoros ( $L_{Aeq 24h}$ ) por cuadrículas según el Plano acústico de Madrid 2001-02. Fte. Elaboración propia sobre datos del Ayuntamiento de Madrid.



**Figura 5.** Cuadrículas clasificadas en dos categorías (menos de 55 dBA y 55 y más) a partir del indicador  $L_{Aeq\ noche}$ , según el Plano acústico de Madrid 2001-02. Fte. Elaboración propia sobre datos del Ayuntamiento de Madrid.

El segundo ensayo de cálculo, adoptando como ponderación de la proximidad la distancia al cuadrado, arroja un valor también significativo: ahora el cariz positivo se impone algo más. ¿A qué obedece ello? La respuesta, evidentemente, nos remite al efecto de las nuevas ponderaciones en la fórmula, las cuales ocasionan que las unidades espaciales (cuadrículas) más inmediatas o adyacentes pesen mucho más en la I de Moran, en tanto que las más distantes pesen ahora bastante menos. De manera más clara, el uso de las distancias al cuadrado permite aproximarse mejor al descenso no lineal (i.e. más intenso) del ruido con la distancia y con la rugosidad del espacio urbano, haciendo posible entonces emerger la intrínseca autocorrelación espacial del fenómeno acústico en las cortas distancias.



En conclusión, los estadísticos de autocorrelación espacial permiten hacer aflorar, con estas unidades espaciales, la existencia débil, pero significativa, de tal rasgo para distancias muy cortas en el mapa del ruido ( $L_{Aeq\ 24\ h}$ ).

En aras de una apreciación más significativa del ambiente sonoro madrileño merece la pena un cierto desglose temporal. Durante el período diurno un 52,8 por ciento de las cuadrículas alcanzaba en el  $L_{Aeq\ día}$  un valor  $\Rightarrow 65\ dBA$ <sup>7</sup>. Incidiendo sobre el período de descanso nocturno, por ser el más sensible y crítico para la población, y con la finalidad de proveer una imagen más simple y nítida, en la figura 5 se han dicotomizado los valores de ruido en dos categorías del  $L_{Aeq\ noche}$ : los que cumplen el requisito de calma y los que, por el contrario, superan el umbral normativo (55 dB). Queda de manifiesto en el mapa la abrumadora mayoría de cuadrículas donde el valor registrado iguala o excede dicho umbral (un 81,3 por ciento<sup>8</sup>). Adicionalmente se constata que los distritos centrales incumplen la regla casi en su totalidad, en tanto que en los periféricos aparecen con algo más de abundancia las zonas de sosiego, aunque en general sigue prevaleciendo el ambiente ruidoso.

## VI. HACIA UNA CUANTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN RESIDENTE SEGÚN EL AMBIENTE SONORO URBANO

### 1. Antecedentes y planteamiento

Entre las determinaciones establecidas por la Directiva europea 2002/49/CE, y que las regulaciones españolas incorporan, se halla la de medir la población afectada por los diferentes niveles de ruido. Se trata de acercarse al conocimiento del grado de malestar social derivado del ruido exterior. Ello se plantea indirectamente, por cuanto, al tratarse de una apreciación subjetiva, dicho malestar *sensu strictu* cabría evaluarlo, más exactamente, a partir de las manifestaciones y repercusiones individuales, por ejemplo, como se ha introducido en el último Censo de Población de 2001 o mediante estudios predictivos cuya capacidad explicativa resulta todavía limitada (vid. Herranz Pascual y López Barrio, 2000).

El asunto reviste una complejidad importante y se cuenta con algunos intentos y aproximaciones que, como antecedentes comparativos para el ensayo aquí realizado, procede reseñar someramente. Fontanet y Alsina (1996) abordaron en Barcelona, mediante una encuesta a 400 personas y toma de datos de campo, el examen de las diferencias nocturnas en exposición al ruido debidas a la ubicación de la vivienda, distinguiendo las situaciones de vivienda interior, exterior y altura respecto al nivel de calle. En el caso de la ciudad de Birmingham (Hinton, s.f.), se elaboró un ambicioso y detallado mapa acústico en 1999, basado en una retícula de 10 x 10 m. (con 3,3 millones de puntos con datos). A la hora de evaluar la exposición de la población al ruido se apoyaron, por un lado, en una estimación del nivel sonoro en las fachadas de los edificios, a partir de una interpolación desde los puntos de la malla, que tenía en cuenta la orientación de la fachada (8 orientaciones principales) y el período (día

7 Dado que los datos en la fuente están redondeados a unidades de dBA, si se incluyesen sólo las cuadrículas estrictamente superiores a 65 dBA (i.e. 65 y más) el porcentaje ascendería a 45,2.

8 Dado el redondeo a unidades enteras de dBA en los datos de la fuente, si se incluyesen sólo las cuadrículas estrictamente superiores a 55 dBA (i.e. 56 y más) el porcentaje ascendería a 74,66.

o noche); y, por otro, en información demográfica (recopilada a partir del registro electoral y de datos de escolaridad) a nivel de edificio residencial, representados como puntos en un SIG. Mediante la ejecución de búsquedas temáticas en el SIG fue factible entonces averiguar con agilidad la cifra de población expuesta, en cada edificio y período, a determinados niveles de ruido, así como los totales para la ciudad o subzonas. El proyecto evidenció la notable potencia de la conjunción entre SIG y otros programas específicos (LIMA) para el modelado del ruido en medio urbano. Sus principales limitaciones derivan de no haber discernido la cifra de habitantes por períodos y de que los datos demográficos usados padecían de omisiones, por no ser un censo de toda la población.

A la hora de evaluar los impactos del ruido, en ese proceso de interacción hombre-medio, una vez establecidos unos períodos relevantes según el ciclo diario de la vida humana, la pregunta a responder es ésta: ¿qué cantidad de población se halla sometida o inmersa en qué ambiente acústico (nivel de ruido exterior), en qué lugar y durante qué periodo? La variabilidad espacio-temporal de los niveles sonoros y la movilidad espacio-temporal de la población obligan a abordar la cuestión en términos de coincidencia espacio-temporal y es especialmente apropiada para aplicarla a la evaluación de externalidades, como postuló Moreno (1995).

Nuestra aproximación parte de considerar las tres dimensiones críticas de la interacción hombre-ruido ambiental: la actividad, el lugar y el tiempo. La primera, por cuanto el nivel sonoro conveniente o insoportable para cada una de ellas difiere; la segunda y la tercera, porque referencian las inmisiones sonoras y la población (en cantidad) en las dimensiones espacial y temporal. A expensas de un abordaje más completo, que se está avistando en el marco de un proyecto más amplio donde se inscribe este trabajo, para el caso que aquí nos ocupa se ha adoptado una aproximación parcial a la cuestión, en aras de alcanzar unos resultados significativos.

En tal sentido se ha seleccionado, por su especial interés, la actividad de descanso diario (sueño) cuya adscripción espacio-temporal está bastante bien definida: con escaso riesgo de error puede afirmarse que se realiza sobre todo en el lugar de residencia y durante la noche. Dicho período nocturno está, correlativamente, bien delimitado y caracterizado acústicamente para cada lugar del espacio urbano madrileño.

Por todo ello, la viabilidad del análisis parece razonable, si bien la referenciación espacio-temporal de la población merece ser comentada, teniendo en cuenta los rasgos de las fuentes demográficas usuales. En general, éstas se caracterizan por:

- Una georreferenciación espacial según divisiones estadísticas varias. En Madrid se publican por municipios, núcleos urbanos, distritos, barrios, secciones y sectores urbanos y con adscripción según el lugar de residencia. Aunque estas desagregaciones presentan ya ciertas posibilidades, no resultan totalmente satisfactorias para confrontarlas con un fenómeno tan variable espacialmente como el sonido ambiental, que demandaría más desagregación (no solo por edificio, sino incluso por planta). De momento, el máximo grado de detalle corresponde habitualmente a las secciones censales.
- Referenciación temporal: la adscripción al domicilio personal es la regla y ello permite aprehender acertadamente la población (toda o algunos grupos) cuando realiza

en él ciertas actividades habituales. Por ejemplo, dormir (de noche), comida, labores domésticas (por un subconjunto demográfico como amas de casa), ocio (ver TV), etc. Quizá de todas ellas, la que suscita más consenso y exactitud ante la eventualidad de concretar cifras de población, de acuerdo con la tríada actividad-lugar-tiempo, sea la del descanso diario.

Podría asumirse razonablemente que las estadísticas demográficas habituales son apropiadamente representativas de la tríada: descanso-noche-domicilio. En virtud de ello y de la conveniencia de garantizar el reposo humano, cuya prioridad como objetivo social y político es incontestable, la decisión en este trabajo de centrarse en esa triada parece justificada. Queda pendiente el análisis para otras tríadas. Como corolario se colige la idoneidad de usar los datos del Censo de Población de 2001.

Complicada resulta sin embargo la cuestión de confrontar las unidades espaciales que adoptan las fuentes de información para el ruido y la población. En el mapa acústico los datos, originalmente puntuales, se han «extrapolado» y aplicado a cuadrículas regulares; en el Censo de Población las unidades más desagregadas son los polígonos irregulares correspondientes a las secciones censales. En el apartado siguiente se presenta y justifica el procedimiento seguido y los resultados alcanzados.

## **2. Hacia un procedimiento para estimar la población afectable por ruido urbano excesivo**

Es bien sabido que el seccionado censal posee una justificación puramente instrumental, al servicio de la gestión de las convocatorias electorales, por lo que su aplicación a cualquier otro campo ineludiblemente adolece de desajustes, de gravedad desigual, pero habitualmente minusvalorados. La toma de conciencia del «problema de la unidad espacial modificable» ha ido poco a poco calando en la comunidad académica, ante la evidencia de las consecuencias graves que se pueden derivar de ignorar tal condicionante; no obstante, las posibilidades de avance real por este lado sólo se ampliarán cuando sea posible diseñar y elegir la zonificación más apropiada para el estudio de cada proceso o fenómeno. De momento, en la mayoría de las situaciones, el investigador habrá de contentarse con asumir, conscientemente o no, las implicaciones del uso de unas unidades estadísticas espaciales que le vienen dadas.

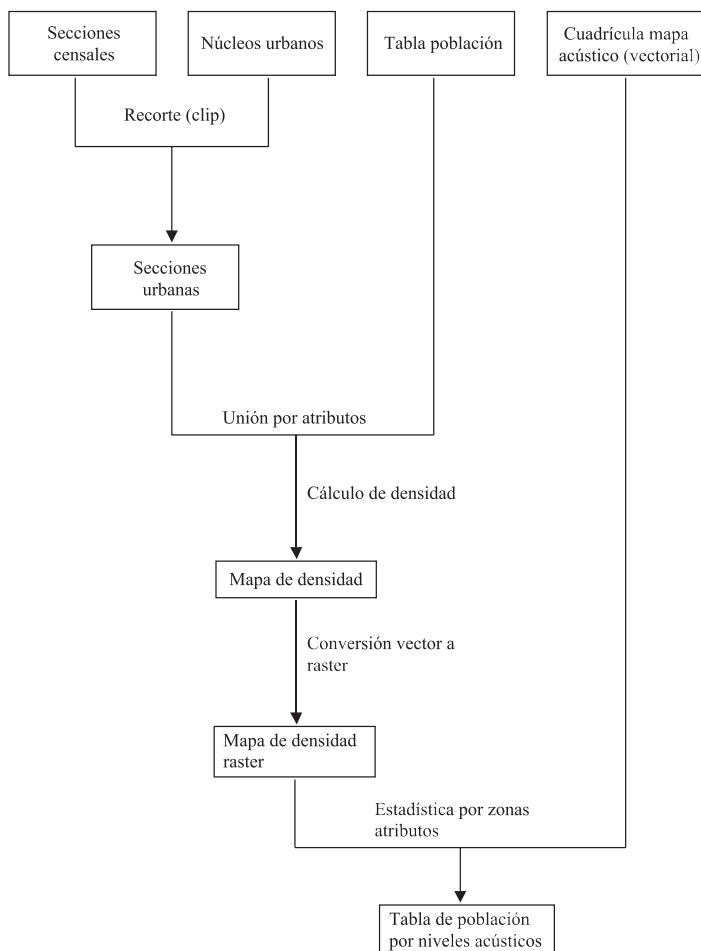
En el presente estudio, y en aras del rigor, se ha intentado en lo posible paliar los efectos negativos inherentes al uso de las secciones censales, en tanto que el soporte espacial de la información demográfica, cuya incompatibilidad con los puntos (cuadrículas) del mapa acústico resulta evidente. Veamos la resolución que aquí se ha dado a esta dificultad.

En cuando a la partición espacial de las secciones censales su uso conlleva un cierto número de asunciones y de fuentes de inexactitud:

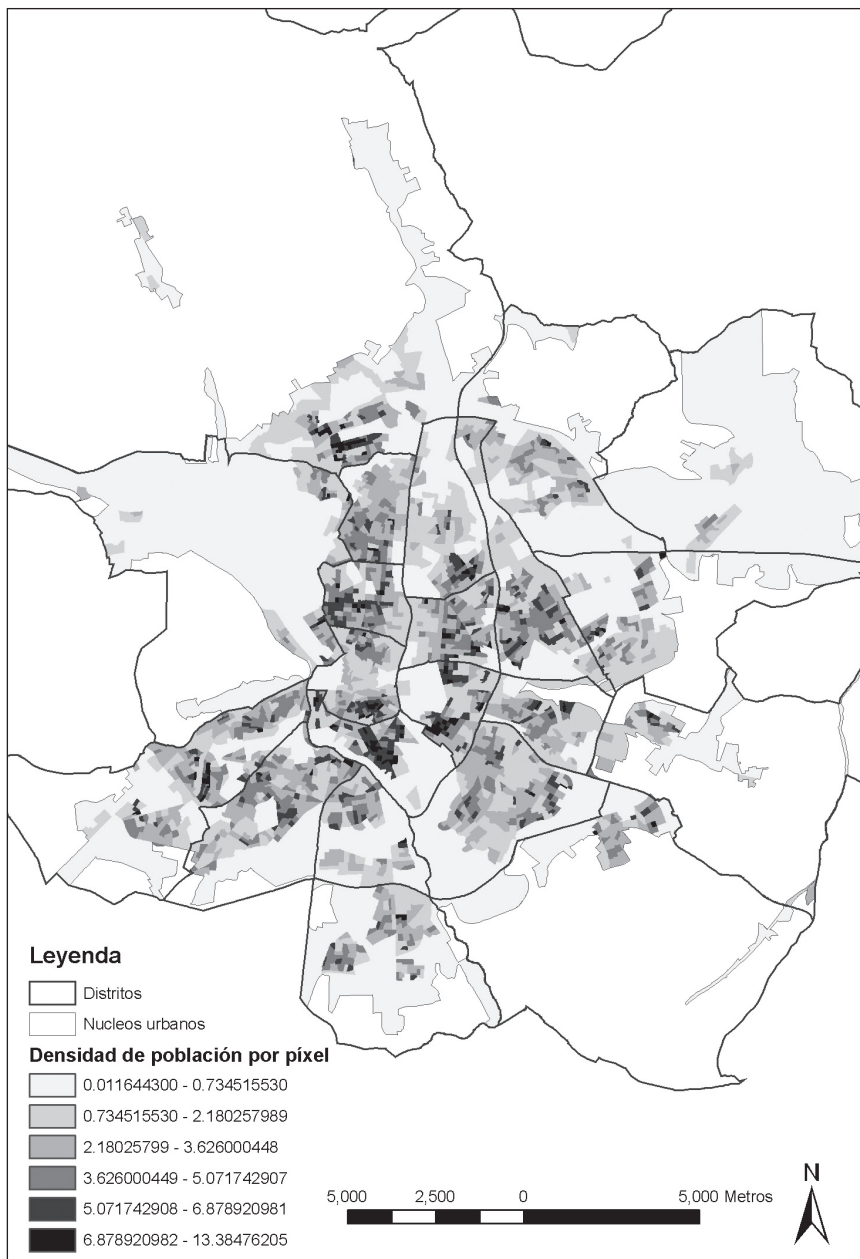
- El seccionado cubre exhaustivamente el territorio, lo que ocasiona que extensas áreas despobladas o con escasos habitantes (el concepto de «diseminado» en el nomenclátor) se agreguen e incluyan junto a zonas urbanas consolidadas. Este problema afecta de forma general a las secciones periféricas de los municipios y núcleos de población.

- Las áreas urbanas con usos no residenciales (e.g. industriales, parques, equipamientos etc.) distorsionan también, en función de su tamaño, la exactitud de la georreferenciación de la población.
- Las cifras de población se imputan estadísticamente al conjunto del área de la sección correspondiente.

Por tales razones, la representación y análisis de los datos por los polígonos del seccionado ocasiona unos importantes errores en ciertas zonas. Las vías paliativas básicamente han sido dos: algunos autores han diseñado técnicas para corregir «a posteriori» tal rasgo. La llamada interpolación basada en centroides, propuesta por Bracken (1989) y Martín (1989), aplica un procedimiento para «repartir» sobre una cuadrícula raster el valor, e.g. de



**Figura 6.** Modelo cartográfico mostrando la secuencia de operaciones para estimar la cifra de residentes por niveles acústicos.



**Figura 7.** Mapa de densidad de población por píxeles (habitantes por 100 m<sup>2</sup>) para las secciones urbanas del municipio de Madrid. El espacio periférico (en blanco) es el excluido por no formar parte de los núcleos urbanos. Fte. Elaboración propia a partir del Censo de Población de 2001. Nota: Intervalos según el criterio de divisiones naturales.



**Figura 8.** Detalle del mapa de densidad de población por píxeles (en habitantes por 100 m<sup>2</sup>) y de la malla del mapa acústico (centro de Madrid). Los cuadrados con su perímetro grueso corresponden a los que durante la noche tienen un nivel sonoro de 55 dBA o superior. Fte. Elaboración propia a partir del Censo de Población de 2001 y Plano acústico 2001-02.

población, asignado a un punto representativo del polígono, habitualmente el centroide (vid. Bosque Sendra, 1992, 393-4). Otra conocida vía estriba en eliminar de los polígonos del seccionado aquellas partes de uso no residencial, lo que requiere disponer de un mapa de usos del suelo bastante fiable.

En este trabajo, y tras sopesar las implicaciones de ambas vías se ha adoptado una aproximación acorde con la segunda fórmula, aunque imperfecta y parcial. En función de las disponibilidades de información se ha corregido la geometría del seccionado excluyendo del mismo las zonas consideradas censalmente como no urbanas. Más concretamente, y puesto que en las operaciones censales se obtiene también una delimitación de los «núcleos urbanos» de cada municipio, la opción avistada consistió en detraer de las secciones aquella parte excluida de los núcleos urbanos, por lo que al seccionado resultante se calificará aquí de «secciones urbanas». La población fue asignada en su totalidad al ámbito urbano de las secciones, lo que origina el error, no grave en el caso de Madrid, de que la población en diseminado se imputa espacialmente a la parte urbana de la sección. En cualquier caso, se es consciente de que la vía operativa adoptada posee un frente de mejora para aproximaciones ulteriores al tema de estudio.

La segunda cara del problema concierne a la incompatibilidad con la georreferenciación espacial de los datos del ruido. Asumiendo la imputación a cada cuadrícula de los valores sonoros del punto muestral que contiene, el reto a resolver estribaba en cómo computar (estimar) la cuantía de población inmersa en un ambiente sonoro como el que caracteriza cada cuadrícula. De forma sucinta, se procedió primero a calcular la densidad (cifra) de habitantes para unas unidades espaciales convenientes (píxeles de 100 m<sup>2</sup> de resolución) y, después, a totalizar la población de dichos píxeles que estaba contenida en cada cuadrícula del mapa del ruido. El modelo cartográfico de la figura 6 describe la secuencia del tratamiento realizado a tal fin con un sistema de información geográfica (ArcGIS). De esta forma, y para las categorías de niveles sonoros relevantes, se pudo estimar la cifra de población afectable (figuras 7 y 8).

### **3. Análisis de los resultados**

El tratamiento de la geoinformación con ArcGIS arrojó unos resultados cuantitativos que se presentan en el cuadro 3. Antes de comentarlos procede advertir que las cifras de población totalizadas según nivel de  $L_{Aeq\text{ noche}}$  no deben estrictamente interpretarse como residentes que sufren o disfrutan de tal nivel sonoro. Más bien, y enunciado con mayor rigor, expresan la magnitud de población que vive en zonas cuyo punto-dato más cercano supera o no el nivel acústico indicado. Como se señaló anteriormente, dada la alta variabilidad intraurbana del ruido, no cabe aseverar que tales residentes tengan realmente ese nivel de ruido.

Con tal reserva en mente cabe extraer dos conclusiones de las cifras contenidas en el cuadro. Por un lado, que el volumen de población pernoctando en zonas con ruido excesivo es muy alto, casi alcanzaría los 2,4 millones. Por otro, que la cifra relativa resulta también claramente desmedida (las 4/5 partes aproximadamente)<sup>9</sup>. Tales guarismos, recuérdese, alu-

<sup>9</sup> Si por razón del redondeo de los datos disponibles se usa como nivel los 56 dbA, la cifra estimada de población en las zonas con ese ruido o más bajaría a 2.205.590 (75,05 % del total) y la población con 55 dbA y menos subiría a 622.917 (21,20 %).

den al grado de eficiencia con la que opera el subsistema socio-ambiental definido en torno a la interacción de actividades humanas productoras de ruido – actividad de descanso durante la noche.

### Cuadro 3

#### POBLACIÓN SEGÚN EL NIVEL ACÚSTICO NOCTURNO EN EL NÚCLEO URBANO DE MADRID

Ámbito	Población	Porcentajes
Total municipio	2.938.723	100
Zona cubierta por mapa acústico	2.828.511	96,25
Zona con $L_{Aeq\ noche} \geq 55$ dBA	2.370.120	80,65
Zona con $L_{Aeq\ noche} < 55$ dBA	458.391	15,60

Fte. Estimación propia a partir de los datos provisionales del Censo de Población de 2001. Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

## VII. CONCLUSIONES

El presente análisis de los niveles de intensidad sonora de Madrid ha puesto de relieve, por un lado, que los mismos muestran un patrón espacial con un cierto número de rasgos significativos: valores a veces muy altos, tendencia a un mayor ruido en las zonas interiores, variabilidad notable, autocorrelación positiva baja (resultado de la difusión del sonido en la rugosa geometría urbana). Y por otro que la atmósfera acústica que prevalece en esta ciudad no es particularmente favorable: tanto durante el día, como por la noche se registra un elevado número de puntos en los que se superan los niveles recomendables. El examen centrado en el período más sensible, la noche, ha puesto de manifiesto cuánta mejora queda por hacer en ese sentido. Desde el punto de vista, por tanto, de la eficiencia puede decirse que el sistema intraurbano madrileño, en su funcionamiento corriente, está generando un coste importante en materia de degradación del ambiente sonoro. La calidad acústico-ambiental del mismo, que constituye en sí mismo un bien público<sup>10</sup>, se halla en un nivel poco deseable y por tanto requerirá de esfuerzos para su recuperación y mantenimiento dentro de unos estándares convenientes. En algún país (Holanda) esta preocupación ha suscitado ya la identificación de áreas rurales de silencio como espacios a proteger (Borst y Miedema, sf).

A la luz de lo anterior no extraña que la estimación contable realizada con la tecnología SIG arroje también un ingente número de madrileños pernoctando en zonas donde el dato muestral registrado más próximo para el nivel acústico es superior al conveniente. Los datos estimados, que expresan una afección potencial elevada, derivada del subsistema de interacción entre emisores de ruido y actividad de descanso en Madrid, no pueden por menos que valorarse como preocupantes. Bien es cierto que las circunstancias de ubicación de muchas de las viviendas y dormitorios (calles secundarias, en altura, situación hacia patios interio-

10 Véanse al respecto las consideraciones jurídicas elaboradas por Beato Espejo (1996 a y b).



res, etc.) harán que, en la fachada propiamente dicha donde están los afectables, el ruido sea menor, por lo que hasta tanto no se disponga de una georreferenciación más precisa de la población dentro del edificio, la conclusión debe tomarse con cierta cautela y no suscitar alarmas desmedidas.

El procedimiento adoptado, que explota las posibilidades de los datos generalmente disponibles en las fuentes estadístico-demográficas habituales, conduce a una estimación de la población cuya bondad o exactitud es difícil de precisar, pero cuya obtención habría sido prácticamente imposible sin el concurso de la tecnología SIG.

Las particularidades inherentes a la variabilidad espacio-temporal del ruido y a la movilidad poblacional reclaman, para una evaluación más rigurosa del impacto potencial, mejoras en la información en dos direcciones: por un lado una mayor densidad de puntos muestrales para el registro sonoro en la ciudad, dado que la rugosidad de la misma prácticamente anula la aplicabilidad al ruido de los métodos de interpolación, justificados tradicionalmente por el ahorro costes en la toma de datos de campo y la razonable calidad de los datos estimados. Por otro lado, y en el caso de la población, se requiere poder acceder, sin perjuicio de la observancia del secreto estadístico, a datos que informen con mucha mayor exactitud del lugar donde cada ciudadano se encuentra. Aparte de la disponibilidad de cifras demográficas por edificios y plantas, cabe, en un escenario más a medio plazo, avistar a una auténtica base de datos espacio-temporal de la población, apoyada en la tecnología GPS/LBS, que permita cuantificar con el rigor apropiado, las cifras de personas que están en cada ambiente sonoro. Se precisa pues avanzar hacia una aproximación microgeográfica, es decir, abordar esa interacción a una escala espacial muy superior a la habitual. En ese camino probablemente se producirá una convergencia con los estudios muestrales de dosimetría acústica que registran el ruido mediante sensores portados por los individuos (García, 2004).

## BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (1998): *Medio ambiente en Europa. El Informe Dobrás*. Editores D. Stanners y Ph. Bourdeau. Luxemburgo y Madrid. Oficina de Publicaciones de las Comunidades Europeas y Ministerio de Medio Ambiente (ed. original 1995).
- BARCELÓ PONS, B. (1975): «Aproximación a una geografía del ruido», *Estudios Geográficos*, 138-139, págs. 1-29.
- BEATO ESPEJO, M. (1996a): «El medio ambiente como bien jurídico colectivo. El ruido callejero como actividad molesta. Derecho a un ambiente silencioso y pacificador», *Revista de Derecho Urbanístico y Medio Ambiente*, 148, págs. 115-146.
- BEATO ESPEJO, M. (1996b): «El medio ambiente como bien jurídico colectivo. El ruido callejero como actividad molesta. Derecho a un ambiente silencioso y pacificador (continuación)», *Revista de Derecho Urbanístico y Medio Ambiente*, 149, págs. 851-893.
- BENTO COELHO, J. L. (1997): «Acústica ambiental, políticas europeas y espacio ibérico», *Tecniacústica 97. XXVIII Jornadas Nacionales de Acústica y Encuentro Ibérico de Acústica. Conferencias invitadas y comunicaciones*. Calvo-Manzano, A. y Santiago, J. S. (Eds.), número extraordinario de la *Revista de Acústica*, vol. XXVIII, Madrid, Sociedad Española de Acústica, págs. I-V.

- BERGLUND, B. et al. (2000, Eds.): *Guidelines for community noise*. Ginebra, World Health Organisation.
- BORST, H.C. y MIEDEMA, H.M.E. (s.f.): *Assessment of noise in silence preservation areas (RURIS)*, 4 pp. [http://www.inro.tno.nl/en/OG/PublicHealth/environment/ruris\\_en.html](http://www.inro.tno.nl/en/OG/PublicHealth/environment/ruris_en.html)
- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de información geográfica*. Madrid, Rialp.
- BRACKEN, I. (1989): «The generation of socio-economic surfaces for public policymaking», *Environment and Planning B, Planning and Design*, 16, 3, págs. 307–325.
- BURRIEL DE ORUETA, E. L. (2002): «Análisis geodemográfico y planificación territorial en España», *Estudios Geográficos*, 248-249, págs. 443-469.
- FONTANET, R. y ALSINA, R. (1996): «Metodología utilizada para la evaluación de diferentes parámetros en la renovación del Mapa Sónico de Barcelona», en *Tecniacústica 96. Jornadas nacionales de acústica. Conferencias invitadas y comunicaciones*. Calvo-Manzano, A., Perera, P. y Santiago, J. S. (eds.). Número extraordinario de la *Revista de Acústica*, Madrid, Sociedad Española de Acústica, págs. 19-22.
- GARCÍA, A. (s.f.): «Realización de mapas acústicos», en Perera, P. (Coor.): *Jornadas internacionales sobre contaminación acústica en las ciudades, Madrid 2002*. Madrid, Ayuntamiento de Madrid, págs. 127-130.
- GARCÍA, A. (1988): *La contaminación acústica*. Valencia, Universidad de Valencia.
- GARCÍA, A. (2004): «La exposición cotidiana al ruido ambiental», *Revista de Acústica*, 35, 3-4, págs. 36-41. <http://www.ia.csic.es/sea/revista/VOL35-34/05.pdf>
- GARCÍA, A. et al. (2001): *Environmental urban noise*. Ashurst, Southampton, Wit Press.
- GARCÍA BALLESTEROS, A. (1994): «La geografía de la población en el último decenio del siglo XX», *Estudios Geográficos*, 217, págs. 593-615.
- GARCÍA SANZ, B. y GARRIDO, F. J. (2003): *La contaminación acústica de nuestras ciudades*. Barcelona, Fundación «La Caixa», col. Estudios Sociales, nº 12.
- GOODCHILD, M. (1986): *Spatial autocorrelation*. Norwich, GeoAbstracts, CATMOG 47.
- GOZÁLVEZ PÉREZ, V. (1992): «Notas sobre el estado actual de la investigación en Geografía de la población», *Saitabi*, 42, págs. 251-261.
- HARRIS, C. M. (1977, Dir.): *Manual para el control del ruido*. Madrid, Instituto de Estudios de Administración Local.
- HERRANZ PASCUAL, K. y LÓPEZ BARRIO, I. (2000): «Modelo de impacto del ruido ambiental», en *Tecniacústica 2000, XXXI Congreso Nacional de Acústica, etc.*, Nº especial de la *Revista de Acústica*, vol. XXXI, Madrid, Sociedad Española de Acústica. Publ. CD-ROM, 7 pp.
- HINTON, J. (s.f.): «Developments since the production of noise maps of the city of Birmingham», en Perera, P. (Coor.): *Jornadas internacionales sobre contaminación acústica en las ciudades, Madrid 2002*. Madrid, Ayuntamiento de Madrid, págs. 121-125.
- JOERIN, F., THERIAULT, M. y MUSY, A. (2001): «Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment», *International Journal of Geographical Information Science*, 15, 2, págs. 153-174.
- LÓPEZ BARRIO, I. (2001): «El significado del medio ambiente sonoro en el entorno urbano», *Estudios Geográficos*, 244, págs. 447-466.
- LÓPEZ MUÑOZ, G. (1992): *El ruido en el lugar de trabajo*. Madrid, Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

- MAJÓ TORRENT, M. y PUIG GODES, O. (2000): «Elaboración de catastros de ruido en Catalunya», *Tecniacústica 2000, XXXI Congreso Nacional de Acústica, etc.*, N° especial de la *Revista de Acústica*, vol. XXXI, Madrid, Sociedad Española de Acústica. Publ. CD-ROM.
- MARTÍN, D. (1989): «Mapping population data from zone centroid locations», *Transactions of the Institute of British Geographers, New Series*, 14, págs. 90-97.
- MARTIN-RETORTILLO BAQUER, L. (1995): «El ruido en el "informe" del defensor del pueblo sobre 1994», *Revista de Estudios de la Administración Local y Autonómica*, 265, págs. 85-115.
- MORENO A. (1995): «La medición de externalidades ambientales: un enfoque espacio-temporal», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 15, págs. 485-496.
- MORENO, A. (1999): «En busca de la localización óptima para instalaciones perjudiciales: propuesta de modelos y resolución con sistemas de información geográfica», *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 27, págs. 99-116.
- MORENO, A. y HODGART, R. L. (2003): «Modelling a single type of environmental impact from obnoxious activities in urban areas: implementing locational analysis with geographical information systems», *Environment and Planning A*, 35, 5, págs. 931-946.
- MULERO MENDIGORRI, A. (1999): *Introducción al medio ambiente en España*. Barcelona, Ariel.
- MUSCAR BENASAYAG, E. (2000): «El ruido nos mata en silencio», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, págs. 149-161.
- ODLAND, J. (1988): *Spatial autocorrelation*. Newbury Park, Sage.
- PERERA, P. (s.f. a, Coor.): *Jornadas internacionales sobre contaminación acústica en las ciudades, Madrid 2002*. Madrid, Ayuntamiento de Madrid.
- PERERA, P.(s.f. b): *Contaminación acústica y política municipal*. 7 p.  
[www.cofis.es/actividad/publica/articulos/11/fys11\\_7.pdf](http://www.cofis.es/actividad/publica/articulos/11/fys11_7.pdf)
- PERERA, P. et al. (2000): «Estudio de niveles sonoros ambientales en el distrito Centro de Madrid», *Tecniacústica 2000, XXXI Congreso Nacional de Acústica, etc.*, N° especial de la *Revista de Acústica*, vol. XXXI, Madrid, Sociedad Española de Acústica. Publ. CD-ROM, 7 pp.
- PERERA, P. (2001, Coor.): *Libro blanco de la contaminación acústica en el municipio de Madrid*. Madrid, Ayuntamiento de Madrid.
- ROULIER F, (1999): «Pour une géographie des milieux sonores», *Cybergeo Revue Européenne de Géographie*, 71, 12 pp.  
[www.cybergeo.presse.fr/paysenvi/texte/roulier.htm](http://www.cybergeo.presse.fr/paysenvi/texte/roulier.htm),
- SANTOS, M. (1995): «A questão do meio ambiente: desafios para a construção de uma perspectiva transdisciplinar», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 1, págs. 695-705.
- STEVENSON, G. M. (1972): «Noise and the urban environment», en Detwyler, T., Marcus, M. et al. (Eds.): *Urbanization and environment*. Belmont, Duxbury Press, págs. 195-228.
- VVAA (1991): *El ruido en la ciudad. Gestión y control*. Madrid, Sociedad Española de Acústica, 540 pp.

