

# Introducción al ruido ambiental. Conceptos y fundamentos básicos

## Introduction to Environmental Noise. Basic Concepts and Fundamentals

Ignacio Soto Molina<sup>1,2\*</sup>

### Resumen

En el presente artículo se realiza un recorrido por los elementos básicos para introducir al lector en el estudio del ruido ambiental, explicando los fundamentos físicos del estudio del sonido, el ruido, la gestión del ruido ambiental y los métodos de evaluación.

Se comienza por la descripción de las propiedades físicas de las ondas mecánicas, y de las ondas sonoras en particular. Se describe la percepción del sonido por parte de los seres humanos, y se distingue entre los conceptos “sonido” y “ruido”. Se hace una descripción sucinta de la regulación europea y española del ruido ambiental y se exponen los índices y métricas más utilizados en modelización y medición de ruido ambiental.

Se pretende así introducir el estudio del ruido ambiental, que se irá desarrollando en sucesivos artículos de esta temática.

**Palabras clave:** onda, sonido, ruido ambiental, acústica.

### Abstract

*This article exposes the basic elements to introduce the reader to the study of environmental noise. The physical foundations of the study of sound, noise, environmental noise management, and the most common evaluation methods are explained. It begins with the description of the physical properties of mechanical waves, and sound waves. The perception of sound by human beings is described, and a distinction is made between “sound” and “noise” concepts.*

*A brief description of both European and Spanish regulations of environmental noise is made. The most used indices and metrics in modelling and measurement of environmental noise are exposed.*

*It is intended, in short, to introduce the study on the environmental noise topic, which will be developed in successive articles.*

**Keywords:** Mechanical wave, sound, environmental noise, acoustics.

## 1. EL SONIDO COMO FENÓMENO FÍSICO

El sonido es la propagación de una **onda mecánica** en un medio elástico, que puede ser sólido, líquido o gaseoso.

Dicha onda es la expresión del transporte de energía y cantidad de movimiento, mediante la oscilación de las partículas del medio de propagación, alrededor de un punto denominado “punto de equilibrio”.

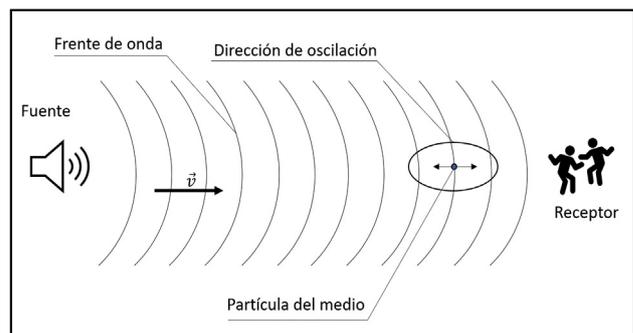
El origen de dicha onda es la vibración o movimiento de un cuerpo en el espacio, que produce una perturbación en el medio, que se traslada a través de éste. Por tanto, para que exista sonido, debe existir una **fente**, y un **medio de propagación**.

Los sonidos, como el resto de las ondas mecánicas y, a diferencia de las ondas electromagnéticas, alimentadas por campos eléctricos y magnéticos, no pueden propagarse en el vacío (ausencia de medio de propagación), requiriendo de la existencia de partículas que puedan excitarse y vibrar.

El tercer elemento necesario para medir o para sentir el sonido es el **receptor**. Dicho receptor pueden ser los seres vivos que disponen de órganos auditivos, o los instrumentos de medida del sonido, como los sonómetros.

Dentro del grupo de las ondas mecánicas, podemos distinguir varios tipos, destacando las transversales y las longitudinales. Se denominan ondas transversales a aquellas que se propagan mediante el movimiento de las partículas del medio perpendicular al vector de la velocidad de la onda, mientras que son **longitudinales** aquellas ondas en las que esta propagación se produce por un movimiento de las partículas paralelo a dicho vector.

**El sonido es una onda longitudinal**, ya que el **movimiento de las partículas** del medio (aire o agua normalmente) es **paralelo al vector de velocidad** de la onda. Es decir, las partículas del medio **vibran de forma perpendicular al frente de propagación** de la onda.



**Figura 1.** Esquema de propagación de ondas mecánicas longitudinales (Fuente: elaboración propia).

\* E-mail: ignacio.soto@cedex.es

<sup>1</sup> Investigador en ruido ambiental, del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA-CEDEX).

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

### 1.1. Propiedades físicas de las ondas

De forma general, la ecuación que gobierna la propagación de una onda en una función seno (o coseno), que tiene la siguiente expresión general:

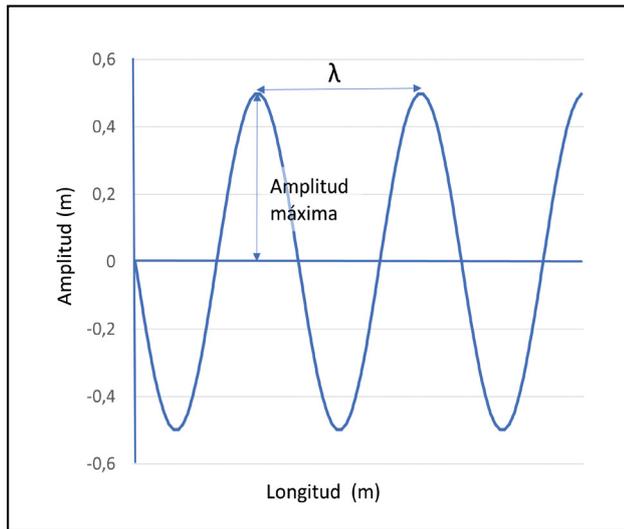
$$y(x, t) = A * \text{sen}(\omega t - kx + \Phi) \quad [1]$$

$$\omega = 2\pi * f = \frac{2\pi}{T} \quad [2]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad T = \frac{1}{f} \quad [3]$$

Donde:

- A: amplitud de la onda (m)
- $\omega$ : velocidad angular (rad/s)
- k: número de onda (rad/m)
- f: frecuencia (Hz o  $s^{-1}$ )
- T: periodo (s)
- $\lambda$ : longitud de onda (m)
- $\omega t - kx$ : fase
- $\Phi$ : constante de fase (rad)



**Figura 2.** Representación de una onda  $y(x,t)$  (Fuente: elaboración propia).

Así, las propiedades principales que podemos distinguir son:

- Amplitud (A): es el valor máximo del movimiento de una onda (A). Es decir, la separación máxima de la partícula, debido a la perturbación, medida desde su posición de equilibrio.
- Elongación: separación de la posición de equilibrio inferior a la amplitud, en un punto del espacio.
- Frecuencia (f): es el número de oscilaciones -pulsaciones- por segundo, de una partícula del medio. Se mide en hercios (Hz). Las frecuencias más bajas se corresponden con lo que habitualmente llamamos sonidos “graves”; las frecuencias más altas se corresponden con lo que llamamos “agudos”.
- Periodo (T): es el tiempo transcurrido para que un punto (una partícula del medio) realice una oscilación completa desde su posición de equilibrio. El periodo es la inversa de la frecuencia:  $T=1/f$ .

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): la distancia entre dos puntos consecutivos en el mismo estado de vibración.
- La velocidad de propagación (V) es la distancia recorrida por la onda por unidad de tiempo. Si consideramos un ciclo completo, el tiempo será T y la distancia recorrida  $\lambda$ , entonces  $V = \lambda / T$ .

### 1.2. Velocidad de propagación de las ondas sonoras

Como se ha indicado anteriormente, conocidas la longitud de onda y la frecuencia, se puede calcular la velocidad de las ondas mediante la expresión 4.

$$c = \lambda * f = \frac{\omega}{k} \quad / \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [4]$$

Donde:

- $\omega$ : velocidad angular (rad/s)
- f: frecuencia (Hz o  $s^{-1}$ )
- $\lambda$ : longitud de onda (m)

**La velocidad de propagación de una onda mecánica no depende de su longitud de onda y su frecuencia, sino de las propiedades físicas del medio de propagación, siendo constante en cada medio de propagación, a iguales condiciones de presión y temperatura (Harris, 1995; Wittmann, 1998).**

Así, la **expresión general que rige la velocidad de propagación de las ondas sonoras** sería:

$$v = \sqrt{\frac{\text{Propiedad elástica}}{\text{Propiedad inercial}}} \quad [5]$$

**En el aire** (o en cualquier otro gas), esta expresión se define como:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad [6]$$

Donde:

- $\gamma$ : coeficiente adiabático del gas (1,4 a 20°C para aire seco)
- R: constante de los gases ideales (J/mol\*K)
- T: temperatura en grados Kelvin
- M: masa molecular del gas (0,02897 kg/mol, en caso del aire seco)

**Ejemplo:** cálculo de la velocidad de propagación en el aire, a 20 °C:

$$c = \sqrt{\frac{1,4 * 8,31446261815324 * (20 + 273)}{0,02897}} = 343,11 \frac{m}{s}$$

También podemos expresar la velocidad de propagación en función de la temperatura, de la siguiente forma:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma * R * 273K}{M}} * \sqrt{\frac{T}{273K}} = \sqrt{\frac{1,4 * 8,31446261815324 * 273}{0,02897}} * \sqrt{\frac{T}{273K}}$$

$$c = 331,2 * \sqrt{\frac{T(K)}{273K}} \left(\frac{m}{s}\right) \quad [7]$$

En el caso de un fluido, como el agua, la velocidad de propagación del sonido depende de su módulo de compresibilidad  $B$  (propiedad elástica), y de su densidad  $\rho$  (propiedad inercial), variando en función de la temperatura y la composición química del fluido.

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad [8]$$

**Ejemplo:** cálculo de la velocidad de propagación en el agua.

Tomando como valores de referencia  $B = 2,2 \cdot 10^9$  Pa, y  $\rho$  1000 kg/m<sup>3</sup>, a una temperatura de 25 °C, obtenemos el siguiente valor de velocidad:

$$c = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 10^9}{1000}} = 1.483,24 \frac{m}{s}$$

Se observa que la velocidad de propagación es del orden de 4,5 veces mayor en el agua que en el aire. Como norma general, la velocidad de propagación será mayor cuanto más denso sea el medio.

### 1.3. Ondas sonoras

Las ondas sonoras, propiamente dichas, son aquellas que son audibles por los seres humanos. En principio, es una clasificación antrópica de un fenómeno físico. No obstante, el concepto de onda sonora se ha ido ampliando al resto de seres vivos, tras las investigaciones que han demostrado que el umbral de audición es diferente para cada especie (Dooling, 2002; Ketten y Bartol, 2005), e incluso que varía con la edad de las personas (Lutman y Davis, 1994).

El umbral audición de los seres humanos se encuentra en un rango de frecuencia de 16 a 20 Hz, hasta los 16 a 20 kHz. Sonidos con frecuencias más bajas se denominan infrasonidos, y sonidos con frecuencias más altas, ultrasonidos (Robinson y Dadson, 1956).

Dependiendo de la frecuencia, la intensidad que se puede percibir como un sonido varía, tomándose como criterio general que el oído humano puede percibir intensidades de intensidades entre  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> y 1 W/m<sup>2</sup> a 1kHz (Harris, 1995).

#### 1.3.1. Potencia, intensidad y presión de las ondas sonoras

Para caracterizar la fuerza de un sonido, o su energía, recurrimos a una serie de magnitudes que conviene conocer.

Estas magnitudes son la potencia, la intensidad y la presión sonora, así como sus niveles.

- **La potencia (W)** depende de la fuente del sonido. Es la expresión de la energía que imprime la fuente al sistema, o la fuerza con la que la fuente genera el sonido. Esta magnitud se mide en Vatios (W).
- **La intensidad (I)** se define como la cantidad de energía sonora transmitida en una dirección determinada por unidad de área. Esta magnitud se mide Vatios por unidad de superficie (W/m<sup>2</sup>), y depende de la superficie del frente de onda.

- **La presión sonora (p)** es la presión que se genera en un punto determinado, y se mide en Pascales (Pa ó N/m<sup>2</sup>).

Los niveles de cada una de las magnitudes anteriores, medidos en decibelios (dB) son expresiones relativas a un valor de referencia dado, en una escala logarítmica.

#### 1.3.2. Potencia y nivel de potencia sonora

La potencia acústica (W) es la energía que genera la fuente sonora por unidad de tiempo, midiéndose en Vatios (W), Newtons metro por segundo (Nm/s) o Julios por segundo (J/s).

La potencia de una fuente puede variar desde valores muy bajos, por ejemplo, la salida de aire de un ventilador ( $10^{-10}$  W), hasta valores muy elevados, por ejemplo, un motor a reacción ( $10^8$  W).

Por este motivo, para el estudio de la potencia de una fuente sonora se utiliza el Nivel de Potencia Sonora (L<sub>w</sub>).

$$L_w = 10 * \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right); \text{ dB (re. } 10^{-12} \text{ W)} \quad [9]$$

Donde:

W: potencia de la fuente emisora de ruido

W<sub>0</sub>: valor de referencia ( $10^{-12}$  W)

**Ejemplo:** cálculo del nivel de potencia sonora de dos fuentes:

Así, en el ejemplo anterior, la salida de aire tomaría el siguiente valor de L<sub>w</sub>:

$$L_w = 10 * \log_{10} \left( \frac{10^{-10}}{10^{-12}} \right) = 20 \text{ dB (re. } 10^{-12} \text{ W)}$$

Mientras que el motor a reacción tomaría el valor de:

$$L_w = 10 * \log_{10} \left( \frac{10^8}{10^{-12}} \right) = 200 \text{ dB (re. } 10^{-12} \text{ W)}$$

En el ejemplo anterior se observa que es mucho más sencillo de comprender la diferencia de 20 a 200 dB, que de  $10^{-10}$  W a  $10^8$  W. Por este motivo, para el estudio de niveles se utiliza la escala decibélica.

#### 1.3.3. Intensidad y nivel de intensidad sonora

Una vez que conocemos la potencia de emisión, podemos calcular la intensidad del sonido en cualquier punto del espacio.

La intensidad depende no solo de la potencia de la fuente, sino de la geometría del frente de onda.

$$I = \frac{W}{S} \quad [10]$$

Donde:

I: intensidad sonora en W/m<sup>2</sup>

W: potencia de la fuente en W

S: superficie del frente de onda en m<sup>2</sup>

Así, para una onda esférica, propagándose en el espacio, la intensidad sonora se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [11]$$

Al igual que en el caso de la potencia, la intensidad se puede expresar como Nivel de Intensidad Sonora ( $L_I$ ).

$$L_I = 10 * \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right); \text{ dB } \left( \text{re. } 10^{-12} \frac{W}{m^2} \right) \quad [12]$$

### 1.3.4. Presión y nivel de presión sonora

La presión sonora es el parámetro más comúnmente utilizado para la caracterización del sonido, ya que es medible mediante sonómetros. La presión sonora se mide en Pascales (Pa). El Pascal es una unidad de presión equivalente a 1 Newton (N) por metro cuadrado.

La presión atmosférica, representa el peso de la columna de aire en un punto determinado de la superficie del planeta, y varía en función de la altura relativa de dicho punto sobre el nivel de mar.

**La presión sonora, es la variación de presión atmosférica debido a la potencia de la fuente.** Esta potencia ( $W$ ) es proporcional a la amplitud de presión de la onda ( $p_0$ ). Por tanto, cuanto mayor sea la amplitud de presión, mayor será la sonoridad.

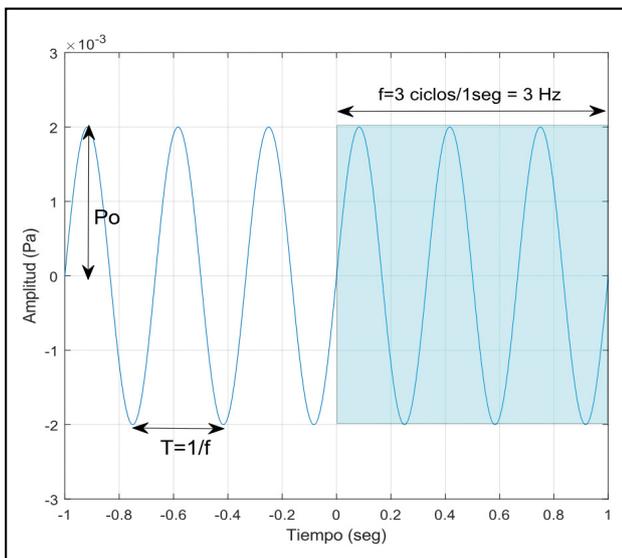
$$P(W) \approx p_0^2 (Pa) \quad [13]$$

La presión sonora de una onda se define por medio de la siguiente expresión:

$$p(t) = p_0 * \text{seno}(2 * \pi * f * t) \quad [14]$$

Donde:

- p: amplitud de presión (Pa)
- $p_0$ : amplitud máxima (Pa)
- f: frecuencia (Hz)
- t: tiempo (s)



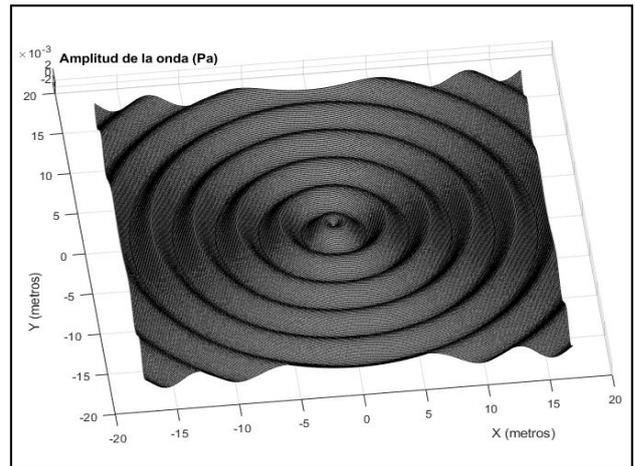
**Figura 3.** Representación de onda sonora  $p(t)$  (Fuente: elaboración propia).

En la figura 2 se representaba la onda en términos de longitud ( $L$ ). En la figura 3 representamos la misma onda en términos de amplitud de presión ( $p$ ) absoluta, y de tiempo (segundos).

La ecuación 14 se puede expresar en términos de longitud (m), en lugar de en términos de tiempo (s). La ecuación quedaría:

$$p(x) = p_0 * \text{sen} \left( \frac{2 * \pi}{\lambda} * x \right) \quad [15]$$

Para representar la ecuación anterior se deben tener en cuenta las relaciones entre la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad indicadas en el apartado 1.2.



**Figura 4.** Representación de onda sonora, provocada por una fuente puntual. El eje Z representa la amplitud de presión ( $p_0$ ), y los ejes X e Y la propagación (m) (Fuente: elaboración propia).

**Para el estudio de la presión sonora no se utiliza el valor absoluto de la misma, sino el término RMS (root-mean-square o raíz cuadrática media).** La presión RMS de una onda es la raíz cuadrada de la suma de los desplazamientos medios al cuadrado durante un período de tiempo, y se calcula con la siguiente expresión:

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad [16]$$

Donde:

- $p_{rms}$ : presión sonora RMS (Pa)
- T: periodo de tiempo al que se refiere la presión, o la medición (s)
- $p(t)$ : valor de la presión sonora instantánea (Pa) en un tiempo t.

Para una onda sinusoidal, la amplitud RMS, es 0,707 veces el valor de la amplitud máxima ( $P_{max}$ ) (Harris, 1995).

$$p_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} P_{max} = 0,707 p_{max} \quad [17]$$

$$p_{max} = \sqrt{2} p_{rms} = 1,41 p_{rms}$$

**Se considera que la amplitud de presión RMS está más relacionada con la percepción de sonoridad del ser humano, que la presión o amplitud sonora.** Por lo tanto, siempre que se habla de presión sonora, o nivel de presión

sonora, en acústica, se hace en términos de RMS (Segués Echazarreta, 2007).

La **presión sonora mínima audible** para el ser humano corresponde con  $p_{0(RMS)} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Al igual que con la potencia y la intensidad, se utiliza la escala logarítmica para la determinación del Nivel de Presión Sonora (SPL, en inglés).

$$L_p \text{ ó } SPL = 10 * \log_{10} \left( \frac{p_{rms}^2}{p_0^2} \right) \quad [18]$$

$$L_p \text{ ó } SPL = 20 * \log_{10} \left( \frac{p_{rms}}{p_0} \right); \text{ dB (re. } 2 * 10^{-5} \text{ Pa)}$$

En la tabla 1, podemos observar que variaciones mínimas sobre la presión atmosférica de referencia (101.325 Pa, ó 1.013,25 hPa, a nivel del mar), son suficientes para generar sonidos. **Una variación de un 0,0000002 % sobre la presión atmosférica es un sonido audible, mientras que una variación de un 0,2 %, en una exposición prolongada, supondría un daño auditivo severo.**

### 1.3.5. Relación entre potencia y presión sonoras

Como hemos visto, la presión sonora y la potencia de emisión están relacionadas, siendo la potencia sonora directamente proporcional al cuadrado de la presión.

Mediante la expresión 19 se puede determinar el nivel de potencia de la fuente ( $L_w$ ), conociendo el nivel de presión ( $L_p$  o SPL) en un punto determinado a una distancia “r” en metros.

$$L_w = L_p + Adiv(r) \quad [19]$$

El término Adiv se denomina “Atenuación por divergencia geométrica”. Puede tomar distintos valores en función del tipo de fuente y la forma del frente de onda.

Así, en una **fente puntual** en el espacio, la divergencia geométrica corresponde con una propagación esférica de la onda:

$$Adiv = 20 \log r + 11 \quad [20]$$

En el caso de una **fente lineal**, que circula sobre una carretera, este término corresponde con una propagación en el semicilindro que se forma por la fuente y el plano horizontal de la carretera:

$$Adiv = 10 \log r + 8 \quad [21]$$

Operando con las ecuaciones 20 y 21, podemos predecir también el nivel de presión sonora a una distancia “r” de la fuente:

$$L_{p_{puntual}} = L_w - Adiv(r) = L_w - 20 \log_{10} r - 11; \text{ dB} \quad [22]$$

$$L_{p_{lineal}} = L_w - Adiv(r) = L_w - 10 \log_{10} r - 8; \text{ dB} \quad [23]$$

**Ejemplo:** cálculo de atenuación por la divergencia en fuente puntual y lineal, en campo libre, a 10 y 20 metros de la fuente, que emite a 100 dB (A):

Fuente puntual:

$$L_{p_{punt(10m)}} = 100 - 20 \log_{10}(10) - 11 = 69 \text{ dB(A)}$$

$$L_{p_{punt(20m)}} = 100 - 20 \log_{10}(20) - 11 = 63 \text{ dB(A)}$$

Fuente lineal:

$$L_{p_{lin(10m)}} = 100 - 10 \log_{10}(10) - 8 = 82 \text{ dB(A)}$$

$$L_{p_{lin(20m)}} = 100 - 10 \log_{10}(20) - 8 = 79 \text{ dB(A)}$$

Observamos que, en el caso de la atenuación por divergencia de una fuente puntual, al doblar la distancia, la presión sonora disminuye en 6 dB, mientras que, en una fuente lineal, la disminución es de 3 dB.

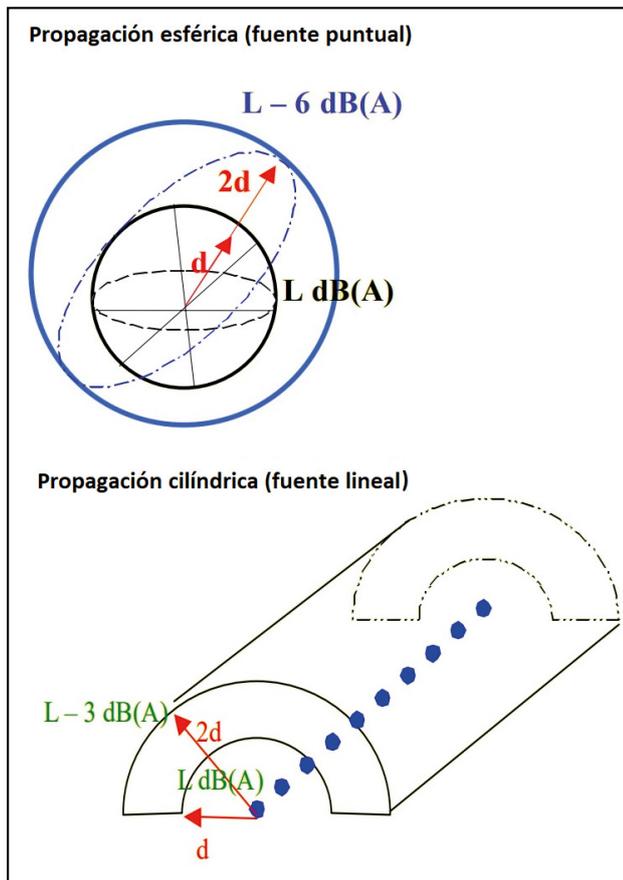
**Tabla 1.** Relación entre presión sonora, nivel de presión sonora y variación de presión

Amplitud de presión RMS (Pa)	SPL (dB)	Variación de presión (%)	Comentarios
200	140	0,2 %	Daño auditivo severo
20	120	0,02 %	
2	100	0,002 %	
0,2	80	0,0002 %	Inicio riesgo de daño auditivo
0,02	60	0,00002 %	
0,002	40	0,000002 %	Nivel de conversación
0,0002	20	0,0000002 %	
0,00002	0	0,00000002 %	Inicio de audición

$$P_0 = 0,00002 \text{ Pa}$$

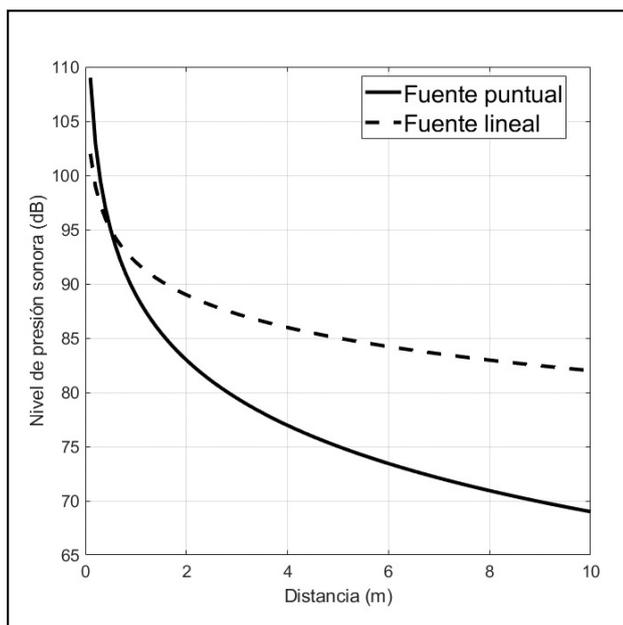
$$P_{atm}(\text{ref}) = 101.325 \text{ Pa}$$

Fuente: elaboración propia a partir de Harris, 1995.



**Figura 5.** Atenuación por la divergencia en fuente puntual (propagación esférica), y lineal (propagación cilíndrica) (Fuente: Segura Echazarreta, 2007).

Este fenómeno es razonable si, como se aprecia en la figura 5, consideramos que una fuente lineal puede asemejarse a una sucesión de fuentes puntuales.



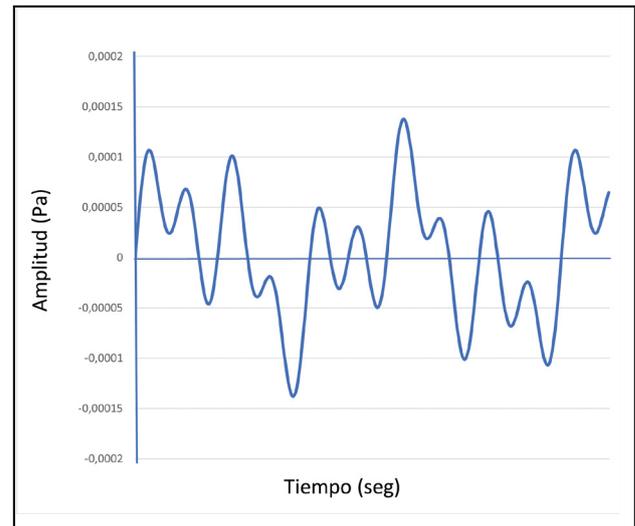
**Figura 6.** Atenuación con la distancia en fuentes puntuales y lineales. Potencia considerada de la fuente 100 dB, y distancia 10 m (Fuente: elaboración propia).

En la primera zona del gráfico de la figura 6 que se corresponde con lo que se conoce como “campo cercano”, donde la longitud de onda es comparable con la dimensión de la fuente o la distancia a la que se evalúa la atenuación, la ley de la divergencia no es aplicable.

#### 1.4. El espectro de frecuencias

Hasta ahora hemos tratado las ondas como sonidos puros, esto es, un sonido emitido en una sola frecuencia.

Así, un sonido formado por tres frecuencias (1000, 500 y 200 Hz) podría tener, por ejemplo, la forma de la figura 7.



**Figura 7.** Onda formada por la suma de varias frecuencias (Fuente: elaboración propia).

Las diferentes frecuencias que intervienen en la generación de un sonido se denominan “espectro”, y es característico de cada tipo de sonido. El espectro se puede describir a su vez en función de la frecuencia fundamental (frecuencia de vibración más baja), y los armónicos (múltiplos de la frecuencia fundamental), lo que nos permite distinguir el sonido de la voz de las personas, una determinada señal acústica, o los ruidos provenientes de diferentes fuentes (un coche, un helicóptero o un tren).

Para el análisis del espectro de frecuencias se utiliza una división de estas en octavas y en tercios de octava.

Una octava es un intervalo de frecuencia entre dos sonidos cuya razón de frecuencia es 2. Para la determinación de las bandas de octavas, se toma como referencia la frecuencia central ( $f_c$ ) de 1.000 Hz, y se aplica la siguiente expresión:

$$f_2 - f_1 = 0,707 * f_c ; \text{ donde: } f_2 = 2 * f_1 \quad [24]$$

Por ejemplo, la banda de octava de 1.000 Hz ( $f_c$ ), contiene las siguientes frecuencias:

$$f_2 - f_1 = 0,707 * 1000$$

$$f_2 - \frac{1}{2} f_2 = 0,707 * 1000$$

$$f_2 = 2 * 0,707 * 1000 = \mathbf{1.414 \text{ Hz}}$$

$$f_1 = \frac{1}{2} f_2 = \mathbf{707 \text{ Hz}}$$

Si se desea realizar un estudio más pormenorizado del espectro de frecuencias, se puede recurrir a la división del espectro en tercios de octava. Para ello se utilizan las siguientes expresiones.

$$f_2 - f_1 = 0,232 * f_c ; \text{ donde: } f_2 = \sqrt[3]{2} f_1 \quad [25]$$

De esta forma, la división del espectro quedaría como se indica en la en la tabla 2, en función de si se utilizan los tercios de octava, o las octavas. Se incluye la longitud de onda ( $\lambda$ ) de cada frecuencia central, considerando la ecuación que relaciona la velocidad, la longitud de onda y la frecuencia, en condiciones de 20 °C en aire seco, y 1 atmósfera de presión, así como el periodo (T).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad T = \frac{1}{f} \quad [26]$$

Tomando como referencia un espectro de ruido “tipo” provocado por el tráfico rodado, y una potencia total de emisión Lw de 100 dB, podemos observar las diferencias entre evaluar el espectro acústico de forma global, en bandas de octava, o de tercio de octava (ver tabla 3).

Como se observa en el gráfico de la figura 8, cuanto más se divide el espectro para su análisis, más información se obtiene de la composición frecuencial del sonido estudiado.

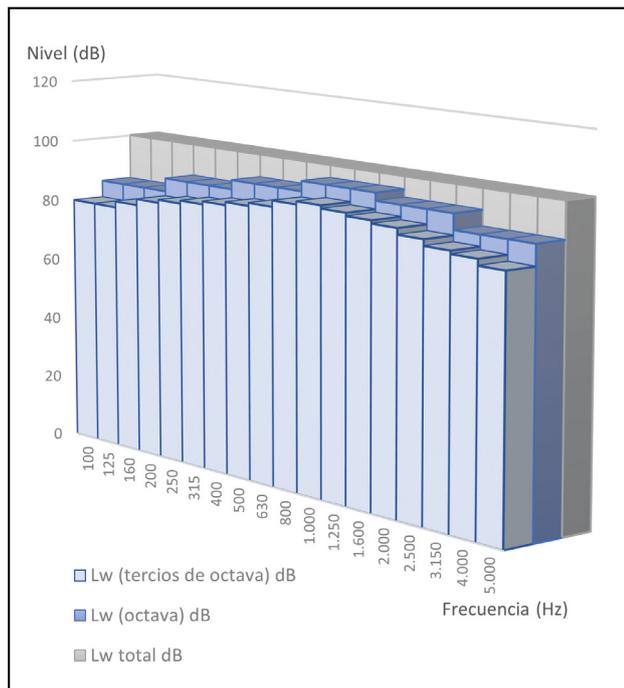


Figura 8. Espectro sonoro tipo de una carretera en tercios de octava, octavas y ruido total (Fuente: elaboración propia).

Tabla 2. Espectro sonoro general en octavas y tercios de octava

Octavas (Hz)	Tercios de octava (Hz)	$\lambda(m)^*$	T (seg)
16	16	21,44	0,06250
	20	17,16	0,05000
	25	13,72	0,04000
31,5	31,5	10,89	0,03175
	40	8,578	0,02500
	50	6,862	0,02000

Octavas (Hz)	Tercios de octava (Hz)	$\lambda(m)^*$	T (seg)
63	63	5,446	0,01587
	80	4,289	0,01250
	100	3,431	0,01000
125	125	2,745	0,00800
	160	2,144	0,00625
	200	1,716	0,00500
250	250	1,372	0,00400
	315	1,089	0,00317
	400	0,858	0,00250
500	500	0,686	0,00200
	630	0,545	0,00159
	800	0,429	0,00125
1.000	1.000	0,343	0,00100
	1.250	0,274	0,00080
	1.600	0,214	0,00063
2.000	2.000	0,172	0,00050
	2.500	0,137	0,00040
	3.150	0,109	0,00032
4.000	4.000	0,086	0,00025
	5.000	0,069	0,00020
	6.300	0,054	0,00016
8.000	8.000	0,043	0,00013
	10.000	0,034	0,00010
	12.500	0,027	0,00008
16.000	16.000	0,021	0,00006
	20.000	0,017	0,00005

\* A 20 °C y aire seco (Fuente: elaboración propia).

Tabla 3. Cálculo de espectro sonoro tipo de una carretera en tercios de octava, octavas y ruido total

Octavas (Hz)	Tercios de octava (Hz)	Espectro tipo*	Lw (tercios de octava) dB	Lw (octava) dB	Lw total dB
	100	-20	80		
125	125	-20	80	85,5	
	160	-18	82		
	200	-16	84		
250	250	-15	85	89,8	
	315	-14	86		
	400	-13	87		
500	500	-12	88	92,8	
	630	-11	89		
	800	-9	91		100
1.000	1.000	-8	92	96,1	
	1.250	-9	91		
	1.600	-10	90		
2.000	2.000	-11	89	93,6	
	2.500	-13	87		
	3.150	-15	85		
4.000	4.000	-16	84	88,6	
	5.000	-18	82		

Fuente: calculado a partir de espectro normalizado de la Norma UNE-EN 1793-3:1998.

## 2. LA PERCEPCIÓN DEL SONIDO

En los apartados anteriores hemos tratado el sonido teniendo en cuenta las propiedades físicas del fenómeno. No obstante, los seres vivos no perciben el sonido exactamente de esta forma.

Para describir la forma en que se percibe el sonido, debemos hablar de la percepción sonora (sonoridad). Las distintas especies del planeta perciben, e incluso utilizan, el sonido de diferentes formas.

### 2.1. La percepción humana

En el caso de los seres humanos, se ha estudiado la forma en que se perciben los sonidos, llegando a generar las denominadas “Curvas de igual sonoridad” o “Curvas isofónicas”.

Se han desarrollado, además, dos conceptos que sirven para cuantificar la percepción sonora, el sonio y el fonio (UNE 74014, 1978).

La sonoridad se mide en sonios, los cuales se definen como la sonoridad de un tono de 1 kHz, con un nivel de presión sonora (SPL) de 40 dB. Se trata de una escala subjetiva y ha sido establecida para la comparación de sonidos. De esta forma, un sonido de 2 sonios es el doble de sonoro que el sonido de 1 sonio. Un sonido de 4 sonios es 4 veces más sonoro que 1 sonio, etc.

El nivel de sonoridad es una escala decibélica, que se mide en fonios, y es lo que representan las curvas isofónicas desarrolladas por Fletcher y Munson (1933), recalculadas por Robinson y Dadson (1956), y adaptadas por la norma UNE-ISO 226:2023 sobre “Líneas isofónicas normales”.

Los sonios (N) se calculan a partir de 40 fonios, mientras que los fonios ( $L_N$ ), establecidos empíricamente, se aplican a todo el rango audible (desde 0 dB). Existen formulaciones matemáticas que relacionan ambos conceptos:

$$N = \left(10^{\frac{L_N - 40}{10}}\right)^{0.30103} \approx 2^{\frac{L_N - 40}{10}} ; \text{sonios} \quad [27]$$

$$L_N = 40 + 10 \log_2(N) ; \text{fonios}$$

Las curvas isofónicas que representan el comportamiento del oído humano se pueden ver en la figura 9. Estas curvas muestran que, por ejemplo, un nivel de presión sonora (SPL) de 70 dB, a 1000 Hz, se percibirá como un sonido de aproximadamente 70 fonios. Mientras que el mismo sonido de 70 dB, a una frecuencia de 31,5 Hz, se percibirá como 10 fonios.

Por lo tanto, el comportamiento del oído humano varía, dependiendo de la frecuencia y de la intensidad. Aquí entra en juego un nuevo concepto que, junto con la escala decibélica, permite adecuar el estudio del sonido a la audición humana. Se trata de las curvas de ponderación. Estas curvas ajustan los sonidos a la forma en que el oído humano los percibe, de manera aproximada y simplificada.

La curva de ponderación más utilizada es la ponderación A, la cual aplica una corrección a los sonidos basada en la curva isofónica de 40 fonios. Esta es la curva de ponderación que se utiliza habitualmente en todos los estudios de ruido ambiental, en los que se pretende estudiar el efecto del ruido en el ser humano.

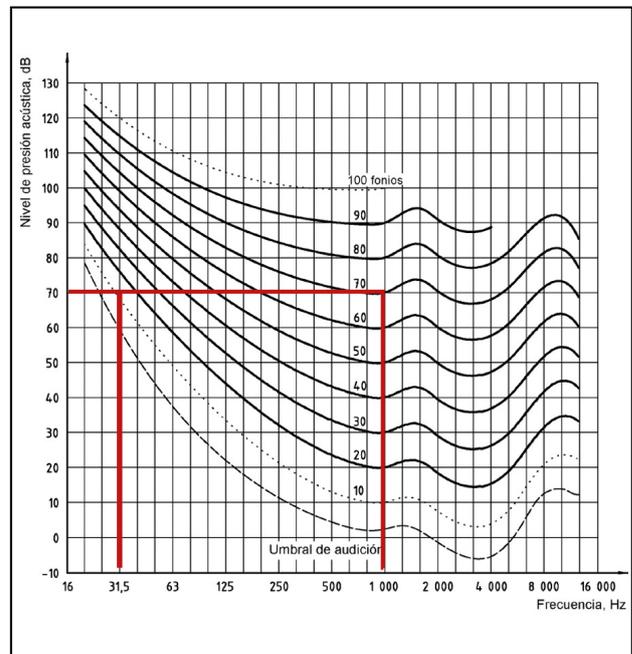


Figura 9. Curvas isofónicas (Fuente: UNE-ISO 226:2013).

También existen otras curvas de ponderación, como son la ponderación B, basada en la curva de 70 fonios, la ponderación C, basada en la curva de 100 fonios, y la ponderación Z (sin ponderación). La ponderación C se utiliza para el estudio de sonidos con niveles de presión sonora elevados, por ejemplo, en el ámbito de la prevención de riesgos laborales (UNE - Organismo de Normalización Español, 2014).

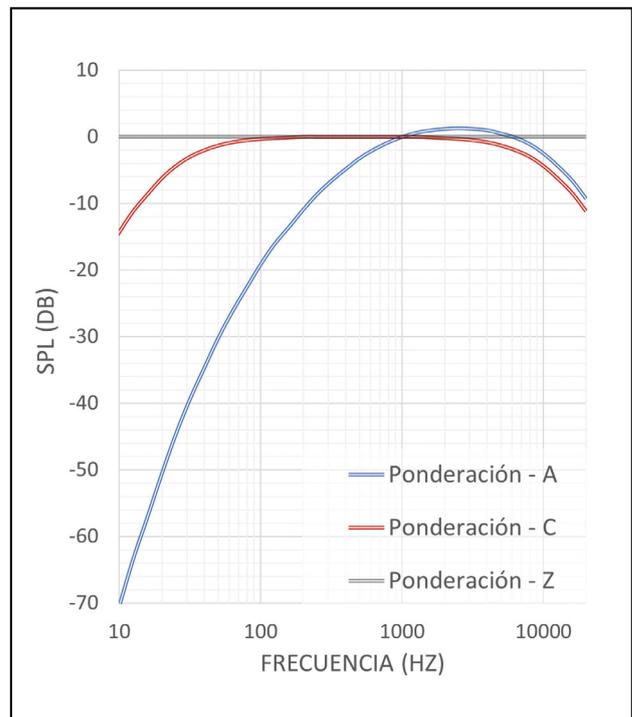
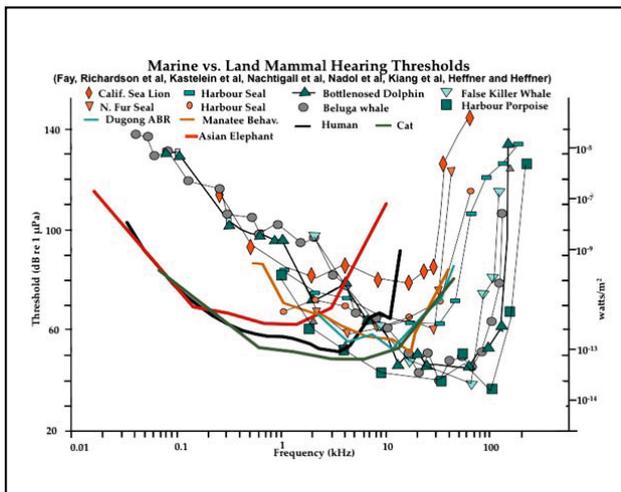


Figura 10. Escalas de ponderación humana para niveles de presión sonora (Fuente: elaboración propia).

Todos los seres vivos con sistemas auditivos perciben el sonido de forma particular, y adecuado a las frecuencias y presiones más apropiadas, de acuerdo con su etología e historia evolutiva.

Por ejemplo, en la figura 11 podemos observar diferentes curvas de audición que representan los umbrales auditivos de varias especies de mamíferos marinos y terrestres (Ketten y Bartol, 2005).



**Figura 11.** Curvas de audición de algunos mamíferos terrestres y marinos (Ketten y Bartol, 2005) (Fuente: <https://dosits.org/science/measurement/what-sounds-can-animals-hear/>).

Se puede observar que, en general, los mamíferos marinos tienen desplazado el umbral de audición hacia las altas frecuencias, con una frecuencia central que oscila alrededor de los 10 y 100 kHz, mientras que los terrestres somos más sensibles a las bajas frecuencias, con frecuencias centrales de la curva de audición entre los 0,5 y 10 kHz.

## 2.2. Sonidos y ruidos

Se puede definir el **ruido** como un **sonido no deseado** y que **interfiere** en la **actividad, bienestar, fisiología o etología del receptor**. Los ruidos normalmente están compuestos por un espectro de frecuencias complejo, pueden tener amplitudes de presión altas o bajas, y pueden ser tipo impulsivo, continuo, intermitente, repetitivo, etc. (Segués Echazarreta, 2007).

**El ruido es un fenómeno provocado fundamentalmente por el ser humano, y se puede considerar un impacto ambiental de nuestra actividad, no deseado y, en muchos casos inevitable, aunque pueden aplicarse medidas para reducirlo, o disminuir sus efectos perjudiciales.**

Por ejemplo, la actividad de una obra de edificación generará ruido, que afectará de forma negativa a la población residente en las inmediaciones de esta. Una carretera, un ferrocarril o un aeropuerto generan ruido, que también afecta a la población, así como a los seres vivos de los ecosistemas naturales afectados.

**De acuerdo con los estudios realizados por la Organización Mundial de Salud, el ruido es una fuente de contaminación capaz de alterar la salud de las personas expuestas al mismo** (Clark y Paunovic, 2018), provocando, entre otros efectos, enfermedades del sistema cardiovascular y metabólicas (Van Kempen *et al.*, 2018), molestias intensas (Guski *et al.*, 2017), y alteraciones en el sueño (Basner y McGuire, 2018).

El ruido **también es perjudicial para la fauna**, siendo de especial relevancia para la conservación de la biodiversidad y, en especial, de las especies por las cuales se declaran los espacios protegidos (Soto Molina *et al.*, 2022).

## 3. EL CONTROL DEL RUIDO AMBIENTAL EN LA LEGISLACIÓN EUROPEA Y ESPAÑOLA

Como se ha indicado anteriormente, el ruido ambiental es un impacto que preocupa a las autoridades ambientales, en todos los niveles administrativos.

A nivel europeo, el ruido ambiental se regula en la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental (en adelante END – *Environmental Noise Directive*).

END está dirigida principalmente a la gestión del ruido ambiental que afecta a los seres humanos, siendo su ámbito de aplicación “el ruido ambiental al que estén expuestos los seres humanos en particular en zonas urbanizadas, en parques públicos u otras zonas tranquilas en una aglomeración, en zonas tranquilas en campo abierto, en las proximidades de centros escolares y en los alrededores de hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido”.

END se traspone y desarrolla en el Reino de España a través de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido (en adelante LR), cuyo objeto y finalidad es “prevenir, vigilar y reducir la contaminación acústica, para evitar y reducir los daños que de ésta pueden derivarse para la salud humana, los bienes o el medio ambiente”.

Asimismo, la LR se desarrolla por dos reales decretos, que especifican los criterios y procedimientos básicos estatales para el control y la gestión del ruido ambiental:

- Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

Las competencias en materia de ruido ambiental se distribuyen en todo el entramado administrativo español, siendo objeto de actuaciones por parte de la Administración General del Estado, las comunidades autónomas y las entidades locales. Estas competencias se pueden consultar en el artículo 4 de la LR.

### 3.1. Cartografiado estratégico de ruido y los planes de acción

El **cartografiado estratégico de ruido**, y los **planes de acción**, son las **principales herramientas** para el diagnóstico, gestión y control del ruido ambiental.

Estas herramientas se aplican, de acuerdo con END y LR, a las aglomeraciones urbanas de más de 100.000 habitantes, carreteras de más de 3.000.000 de vehículos al año (equivalentes a una IMH > 342 veh., o a una IMD

> 8.219 veh.), ferrocarriles con más de 30.000 circulaciones al año, y aeropuertos con más de 50.000 operaciones al año.

Cada 5 años, desde 2007, se realiza la revisión de los mapas estratégicos de ruido (MER) y de los planes de acción (PAR), de cada una de las fuentes que cumplen las condiciones anteriores.

Durante estas fases de quinquenales, las autoridades competentes en ruido ambiental deben diagnosticar la problemática del ruido, planificar actuaciones tangibles de mejora, y ejecutar dichas actuaciones.

**Los MER y PAR realizados por las autoridades competentes españolas, en cada una de las fases, pueden consultarse en la Web del Sistema Nacional de Información sobre Contaminación Acústica<sup>1</sup>, gestionado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, y mantenido por el CEDEX.**

### 3.2. Zonificación acústica

La zonificación acústica es otra de las herramientas de gestión del ruido. Se trata de una **clasificación del territorio que permite establecer objetivos de calidad en función del uso predominante del suelo.**

Los usos mínimos que se deben tener en cuenta a la hora de establecer la zonificación son residencial, industrial, recreativo y espectáculos, terciario, sanitario, docente y cultural, infraestructuras y equipamientos, y espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.

Mediante el cruce de los MER, con la zonificación acústica, se identifican las denominadas “zonas de conflicto acústico”, en las que el ruido calculado o medido es superior al establecido en el objetivo de calidad. Estas zonas son las prioritarias para las actuaciones a desarrollar en los PAR.

### 3.3. Ruido y biodiversidad

Aunque el ámbito de aplicación de END se refiere únicamente a los seres humanos, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), incluye los efectos del ruido en el medio natural, en los informes quinquenales a que se refiere el artículo 11 de la END.

Así, en el último informe (EEA 2020/229) de ruido ambiental en Europa (Peris, 2020), además de a los efectos sobre la salud humana, la AEMA se refiere también a los efectos en la vida silvestre, dedicando su capítulo 5 a los efectos sobre la biodiversidad.

Entre otros aspectos, destaca que “[...] se estima que **alrededor del 19 % de los espacios Natura 2000 se encuentran en zonas consideradas ruidosas.** Por lo tanto, vale la pena considerar la preservación de las condiciones acústicas naturales para limitar la pérdida de biodiversidad”.

### 3.4. Reservas de sonidos de origen natural

Esta **figura de protección**, recogida en la Ley del Ruido española, aunque **aún no convenientemente desarrollada**

(Soto Molina *et al.*, 2022), corresponde a aquellas zonas en la contaminación acústica no perturba los sonidos de origen natural.

Junto con las zonas acústicas correspondientes a “espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica”, suponen un **nivel de protección adicional para aquellos espacios naturales que conservan una acústica de alta calidad, o que, estando afectados por ruido, deben ser objeto de medidas de protección.**

### 3.5. Ordenación territorial y urbanística, y ruido

En los últimos años el ruido ha ido tomando importancia en la ordenación territorial, tomando conciencia las autoridades competentes de su relevancia.

Desde la entrada en vigor del Real Decreto 1367/2007, se establece la obligación de que “en la planificación territorial y en los instrumentos de planeamiento urbanístico, tanto a nivel general como de desarrollo, se incluya la zonificación acústica del territorio en áreas acústicas”.

Esto implica que, **en cualquier instrumento de ordenación territorial y urbanístico, se deben establecer objetivos de calidad acústica de cada una de las zonas ordenadas.** Asimismo, implica que, desde el origen del desarrollo del instrumento, se identificarán los posibles conflictos acústicos, y se deberá adaptar el planeamiento a la realidad acústica del territorio. Con una correcta aplicación de estos principios se deberían evitar conflictos acústicos futuros, debido a situaciones existentes en la actualidad, por ejemplo, situaciones en las que se produce un desarrollo residencial en las zonas de afección de vías de transporte de alta intensidad.

### 3.6. El ruido y la evaluación ambiental

En el proceso de evaluación ambiental del planes, programas y proyectos (evaluación ambiental estratégica y evaluación de impacto ambiental), también se debe **tener en cuenta la variación en la calidad acústica, o impacto acústico, de aquello que se pretende elaborar.**

Así, la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental establece que impactos como el ruido, o las vibraciones, deben ser tenidas en cuenta en todas las fases de un plan, programa o proyecto. Esto es, en las fases de planificación, ejecución, funcionamiento y desmantelamiento (en su caso).

Asimismo, el ruido se considera también en las autorizaciones ambientales autonómicas, como es la autorización ambiental integrada, en aplicación del Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación.

### 3.7. Gestión del ruido en el ámbito municipal

La gestión del ruido a nivel municipal es **una de las tareas principales de las administraciones ambientales locales.** A nivel competencias locales, el ruido está presente en las actividades de ocio, conflictos por ruido

<sup>1</sup> Web SICA: <https://sicaweb.cedex.es/>

en comunidades de vecinos, ruido de actividades, licencias municipales, obras..., siendo una gestión de detalle y proximidad.

La gestión municipal del ruido incluye también el cartografiado estratégico, y los planes de acción contra el ruido, de aquellas aglomeraciones cuyos ayuntamientos ejercen esta competencia, dependiendo ello de la legislación autonómica.

#### 4. ÍNDICES Y MÉTRICAS DE RUIDO AMBIENTAL

Una vez que hemos visto los fundamentos físicos del ruido, y realizado un breve recorrido por la gestión administrativa del mismo, en este apartado realizaremos un recorrido explicativo de los principales índices utilizados en el estudio del ruido ambiental.

Los índices recogidos proceden de la legislación básica estatal, concretamente el Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, que desarrolla la LR, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, y el Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, que desarrolla la LR, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

La evaluación del ruido ambiental, en lo relativo a su cuantificación, tiene dos procedimientos básicos:

- **La medición:** consistente en la utilización de equipos como sensores, micrófonos, sonómetros y analizadores de espectro de frecuencia, para medir el ruido en un lugar determinado, y durante un tiempo definido.
- **El cálculo:** consistente en la utilización de modelos matemáticos y empíricos para la estimación del nivel de ruido y sus índices, en función de la potencia de emisión de la fuente y el entorno acústico.

En los apartados siguientes se exponen las métricas e índices principales aplicados a la medición y cálculo del ruido ambiental, así como los métodos de cálculo más comunes que podemos encontrar en ruido ambiental.

##### 4.1. Los periodos de evaluación

Cuando evaluamos un nivel de ruido, ya sea mediante un método de cálculo predictivo, o mediante medición, lo realizamos en un periodo de evaluación.

En la legislación española, los periodos de evaluación son tres:

1. **Periodo día (d):** al periodo día le corresponden 12 horas; de 7.00 a 19.00.
2. **Periodo tarde (e):** al periodo tarde le corresponden 4 horas; de 19.00 a 23.00.
3. **Periodo noche (n):** al periodo noche le corresponden 8 horas; de 23.00 a 7.00.

Estos periodos pueden ser ajustados por las autoridades competentes en ruido ambiental a nivel municipal y autonómico y, de hecho, algunas comunidades autónomas aplican periodos distintos. Por ejemplo, la Generalitat de Catalunya aplica un periodo de tarde de solo 2 horas.

##### 4.2. El nivel continuo equivalente $L_{eq}(T)$

Cuando medimos ruido con un sonómetro, o cuando calculamos el ruido mediante un software predictivo, obtenemos, entre otros, un valor que representa el **nivel de ruido promediado en el periodo de medición o de cálculo**. Este valor es uno de los descriptores más importantes del ruido, ya que nos da una idea general de cuál es el nivel de presión sonora al que estamos sometidos en el punto o zona de estudio.

Este valor promediado es la media energética de la presión sonora en un intervalo de tiempo definido.  $L_{eq}(T)$ , por tanto, siempre está referido a un tiempo definido, el cual debe indicarse al ofrecer dicho valor.

Si partimos de la expresión [18] indicada en el apartado 1.3.4, correspondiente al nivel de presión sonora, podemos llegar a las expresiones para el cálculo del  $L_{eq}(T)$  de la siguiente forma:

$$L_{eq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \int_T \left( \frac{p_{rms}^2}{p_0^2} \right) dt \quad [28]$$

Donde:

- T: tiempo de duración de la medida, o periodo de evaluación
- $p_{rms}$ : raíz cuadrática media (RMS) de la presión sonora instantánea en Pa (ver ecuación [16])
- $p_0$ : es la presión de referencia, considerada como la mínima audible, también expresada como RMS, que toma el valor de  $2*10^{-5}$  Pa.

La ecuación 28 también se puede expresar como un sumatorio de niveles sonoros, de la siguiente forma.

$$L_{eq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} * t_i \quad [29]$$

Donde:

- T: tiempo de duración de la medida, o periodo de evaluación
- $L_i$ : nivel de presión sonora constante en el intervalo  $i$
- $t_i$ : Intervalo de tiempo correspondiente a cada valor discreto de  $L_i$

##### 4.3. Nivel continuo equivalente ponderado A $L_{Aeq}(T)$

Teniendo en cuenta lo aprendido en el apartado 2, los niveles de ruido sin ponderación no representan fielmente el comportamiento o percepción del oído humano a cada frecuencia.

Por este motivo, se hace necesario aplicar una ponderación que, en ruido ambiental, es la ponderación A. Aplicando esta ponderación a cada frecuencia del ruido medido, obtenemos el nivel continuo equivalente ponderado A.

$$L_{Aeq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} * t_i \quad [30]$$

La expresión [30] se puede simplificar, teniendo en cuenta que todos los tiempos de medida son exactamente

**Ejemplo:** imaginemos que hemos realizado 8 medidas de 7,5 minutos cada una para evaluar el nivel continuo equivalente en un punto, durante una hora completa.

Los datos de las medidas serían:

- Duración total (T): 3.600 segundos (60 minutos)
- Duración de cada intervalo: 450 segundos (7,5 minutos)
- Valores obtenidos: en dB y dB(A)

**Tabla 4.** Ejemplo de cálculo de Leq(T) y LAeq(T) a partir de mediciones puntuales

$L_i$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$
Valores (dB)	73,5	67,4	66,0	67,3	69,8	66,1	58,8	50,7
$L_{Ai}$	$L_{A1}$	$L_{A2}$	$L_{A3}$	$L_{A4}$	$L_{A5}$	$L_{A6}$	$L_{A7}$	$L_{A8}$
Valores (dBA)	68,1	62,4	61,1	62,6	64,6	61,5	54,8	45,2
Tiempo medida (seg)	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0	450,0

\* Considerando que el sonómetro utilizado es capaz de medir en dB y dB(A) de forma simultánea

Tanto para calcular el nivel continuo equivalente Leq(T), como el ponderado A, la expresión sería la misma.

$$L_{eq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{3600} \right) * \left( 10^{\frac{73,5}{10}} * 450 + \dots + 10^{\frac{50,7}{10}} * 450 \right) = 68,1 \text{ dB}$$

$$L_{Aeq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{3600} \right) * \left( 10^{\frac{68,1}{10}} * 450 + \dots + 10^{\frac{45,2}{10}} * 450 \right) = 63,0 \text{ dB(A)}$$

iguales, por lo que podemos escribirla de la siguiente forma:

$$L_{Aeq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{t_{ei}} \right) \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \quad [31]$$

En este caso, el término “ $t_{ei}$ ” hace referencia al número de intervalos de medida iguales.

**Ejemplo:** Cálculo de  $L_{Aeq}(T)$  con mediciones en intervalos de tiempo iguales.

En el ejemplo anterior, serían 8 intervalos. Por lo que  $L_{Aeq}(T)$  se podría haber calculado como sigue:

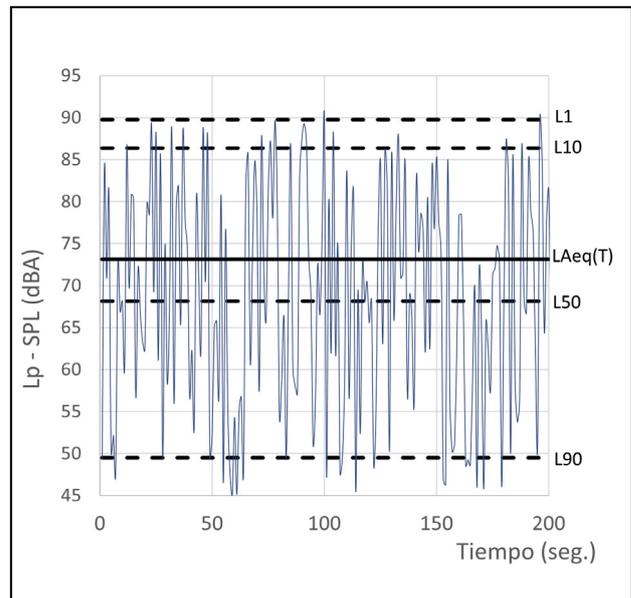
$$L_{Aeq}(T) = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{8} \right) * \left( 10^{\frac{68,1}{10}} + \dots + 10^{\frac{45,2}{10}} \right) = 63,0 \text{ dB(A)}$$

#### 4.4. Índices estadísticos o percentiles

Tomando como referencia un registro de datos instantáneos de ruido, o de datos correspondientes a incrementos de tiempo pequeños, podemos no sólo calcular el  $L_{Aeq}(T)$ , sino también una serie de estadísticos que nos dan información acerca del ruido a estudiar.

En la figura 12 se han definido, además del  $L_{Aeq}(T)$  los siguientes valores:

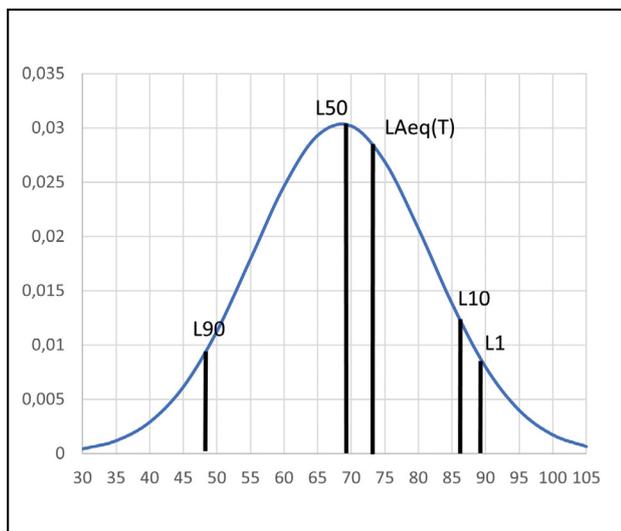
- **Percentil  $L_1$ :** nivel alcanzado o sobrepasado durante el 1 % del tiempo en el período considerado. Es similar al pico de ruido alcanzado.
- **Percentil  $L_{10}$ :** nivel alcanzado o sobrepasado durante el 10 % del tiempo.



**Figura 12.** Ejemplo de gráfico de percentiles de ruido en una medición de 450 segundos (Fuente: elaboración propia).

- **Percentil  $L_{50}$ :** nivel que se sobrepasa el 50 % del tiempo de medición. Es la mediana estadística.
- **Percentil  $L_{90}$ :** nivel alcanzado o sobrepasado durante el 90 % del tiempo. Puede asemejarse al ruido de fondo.

También se puede observar que los niveles instantáneos tienden a seguir una distribución normal, como se aprecia en la figura 13.



**Figura 13.** Distribución normal de valores instantáneos de una medición de ruido (Fuente: elaboración propia).

#### 4.5. Correcciones de la medición

De acuerdo con Real Decreto 1367/2007, **el resultado de una medición de ruido debe ser corregido debido a componentes tonales emergentes, componentes de baja frecuencia y ruido de carácter impulsivo**, mediante la siguiente expresión.

$$L_{kAeq,T} = L_{Aeq,T} + K_t + K_f + K_i \quad [32]$$

$$K_t + K_f + K_i \leq 9 \text{ dB}$$

Donde:

$K_t$  es el parámetro de corrección asociado al índice  $L_{kAeq,T}$  para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes tonales emergentes.

$K_f$  es el parámetro de corrección asociado al índice  $L_{kAeq,T}$ , para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de componentes de baja frecuencia.

$K_i$  es el parámetro de corrección asociado al índice  $L_{kAeq,T}$ , para evaluar la molestia o los efectos nocivos por la presencia de ruido de carácter impulsivo.

De acuerdo con la norma UNE-ISO 1996-1:2020, estos componentes se definen como:

- **Ruido emergente:** incremento del ruido total en una situación determinada producido por la introducción de algún ruido específico.
- **Ruido impulsivo:** ruido caracterizado por breves ráfagas de la presión sonora. La duración de un ruido impulsivo aislado es generalmente inferior a 1 s.
- **Ruido tonal:** ruido caracterizado por una componente de frecuencia única o por componentes de banda estrecha que emergen de forma audible del ruido total.

Además, en una medición que pretenda averiguar el ruido incidente en una vivienda, se debe procurar eliminar

el efecto de la reflexión en la misma, el cual podría dar lugar a una sobreestimación del ruido.

El procedimiento para el cálculo de las correcciones se encuentra en el apartado A.3.3 del Anexo IV del Real Decreto 1367/2007.

#### 4.6. Nivel máximo $L_{Fmáx}$ y Nivel pico $L_{Peak}$

De acuerdo con la norma UNE-ISO 1996-1:2020, el “Nivel de presión sonora máximo promediado en el tiempo y ponderado en frecuencia”, o  $L_{AFmáx}$ , se define como el “mayor nivel de presión sonora ponderado en frecuencia y ponderado en el tiempo durante un intervalo de tiempo determinado”.

El nivel pico, o  $L_{Peak}$ , se define como “10 veces el logaritmo decimal del cociente del cuadrado de la presión sonora de pico y el cuadrado del valor de referencia”, siendo la presión sonora de pico, el valor máximo absoluto de la presión sonora instantánea durante un intervalo de tiempo establecido.

#### ¿Cuál es la diferencia entre ambos descriptores?

$L_{Fmáx}$  es un nivel de ruido, ponderado A, en RMS, resultante de obtener el mayor nivel de ruido en dB(A) de una medición, realizada con ponderación temporal FAST<sup>2</sup>.

$L_{Peak}$  es el valor máximo instantáneo de la onda, sin ponderar, obtenido en dB, y se espera que sea mayor a  $L_{AFmáx}$ . Es un parámetro muy utilizado en ruido industrial, por ejemplo, en mediciones relativas a la prevención de riesgos laborales. Cuando se mide en ponderación C, se denomina  $L_{CPeak}$ .

#### 4.7. Índices $L_d$ , $L_e$ , $L_n$ y $L_{den}$

Cuando se estudia el ruido en un periodo largo de tiempo, en una zona determinada, se utilizan los índices de ruido día, tarde y noche, denominados  $L_{day}$ ,  $L_{evening}$  y  $L_{night}$ , o  $L_d$ ,  $L_e$  y  $L_n$ .

Estos índices están referidos a los periodos de evaluación indicados en el apartado 4.1, y se calculan de acuerdo con la norma UNE-ISO 1996-2:2020, relativa a “Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de presión sonora”, o bien mediante técnicas de modelización acústica, mediante el uso de software especializado.

**Los índices  $L_d$ ,  $L_e$  y  $L_n$ , expresados en dB(A), corresponden a niveles continuos equivalentes de ruido, promediados para el periodo de evaluación correspondiente.**

Cuando son obtenidos mediante simulación no incluyen las correcciones indicadas. Cuando se obtienen mediante medición, e incluyen correcciones, se denominan  $L_{keq,d}$ ,  $L_{keq,e}$  y  $L_{keq,n}$ .

<sup>2</sup> Los sonómetros pueden medir en ponderación temporal FAST (rápida), SLOW (lenta) e IMPULSE (impulsiva o muy rápida). Cada tipo de ponderación se aplica a un tipo de ruido diferente, siendo la legislación, habitualmente, quien lo determina.

La división en periodos de evaluación obedece al razonamiento de que **las personas soportan el ruido de forma diferente en función del periodo del día estudiado**.

Normalmente, los ruidos son más soportables en los periodos habituales de actividad, y menos en los periodos de descanso (noche), o de esparcimiento y ocio (tarde).

Además de lo anterior, se utiliza un cuarto índice ( $L_{\text{day-evening-night}}$  o  $L_{\text{den}}$ ), que representa en **nivel continuo equivalente en un periodo de 24 horas**, con las penalizaciones establecidas (5 dB(A) para el periodo de tarde y 10 dB(A) para el periodo de noche), que incrementan la aportación de los periodos tarde y noche al índice global. Se calcula como:

$$L_{den} = 10 * \log_{10} \frac{1}{24} * \left( 12 * 10^{\frac{Ld}{10}} + 4 * 10^{\frac{Le+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{Ln+10}{10}} \right)$$

#### 4.8. Los métodos de cálculo predictivos

Existen **numerosos métodos de cálculo de ruido ambiental**, en función de la fuente que se pretende estudiar (Garg y Maji, 2014; Steele, 2001).

En España, **hasta el año 2018**, con la publicación de la Orden PCI/1319/2018<sup>3</sup>, **se utilizaban los métodos interinos**, que se indicaban en el Anexo II del mencionado Real Decreto 1513/2005. Estos métodos son:

- Ruido industrial: ISO 9613-2:1996: «Acústica-Atenuación del sonido cuando se propaga en el ambiente exterior, Parte 2: Método general de cálculo».
- Ruido de aeronaves: ECAC.CEAC Doc 29 «Informe sobre el método estándar de cálculo de niveles de ruido en el entorno de aeropuertos civiles». Entre los distintos métodos de modelización de trayectorias de vuelo, se utilizará la técnica de segmentación mencionada en la sección 7.5 del documento 29 de ECAC.CEAC.
- Ruido del tráfico rodado: el método nacional de cálculo francés «NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTULCPC-CSTB)», mencionado en la «Resolución de 5 de mayo de 1995, relativa al ruido de las infraestructuras viarias, Diario Oficial de 10 de mayo de 1995, artículo 6» y en la norma francesa «XPS 31-133». Por lo que se refiere a los datos de entrada sobre la emisión, esos documentos se remiten a la *Guía del ruido de los transportes terrestres, apartado previsión de niveles sonoros* (CE-TUR, 1980).
- Ruido de trenes: el método nacional de cálculo de los Países Bajos, publicado como *Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawai'96 (Guías para el cálculo y medida del ruido del transporte ferroviario 1996)*, por

el Ministerio de Vivienda y Planificación Territorial (Van Volkshuisvesting, 1996).

En el cálculo de los niveles de ruido podemos distinguir dos procesos:

- **Cálculo de la potencia de emisión** de la fuente
- **Cálculo de la propagación del ruido**, que incluye atenuación por la divergencia geométrica, topografía, obstáculos, condiciones climáticas, etc.

**El problema radicaba en que estos métodos utilizaban algoritmos diferentes en función del tipo de fuente para el cálculo de la propagación y los efectos del escenario acústico.**

Para conseguir una mejor implementación de la Directiva de Ruido Ambiental, la Dirección General de Medio Ambiente (DG ENV) de la Comisión Europea decide el desarrollo de un **método común europeo** (Common Noise Assessment methOds - CNOSSOS-EU) para la evaluación del ruido ambiental, publicado por la UE mediante el documento *Common noise assessment methods in Europe* (Stylianou *et al.*, 2012).

El desarrollo del marco metodológico CNOSSOS-EU fue el fruto de una intensa y profunda consulta en la que participaron los servicios de la Comisión Europea, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y cerca de 150 expertos en ruido en dos etapas consecutivas.

La primera versión de CNOSSOS-EU se publica por la Directiva (UE) 2015/996. Esta primera versión fue enmendada por la Directiva Delegada (UE) 2021/1226, tras las enmiendas propuestas por el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de en el documento *Amendments for CNOSSOS-EU : Description of issues and proposed solutions* (Kok y Van Beek, 2019), así como contribuciones de expertos de varios Estados Miembros.

**CNOSSOS-EU está plenamente integrado en la normativa española desde la publicación de la Orden PCM/80/2022, de 7 de febrero**, por la que se modifica el anexo II del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

Se aplica a las fuentes de ruido industrial, ferroviario y de viario. El ruido aeronáutico se estudia mediante el documento *ECAC.CEAC Doc 29* en lo que se refiere a la emisión y propagación, y por las directrices indicadas en el Real Decreto 1513/2005 en lo que se refiere al cálculo de la población expuesta.

## 5. CONCLUSIONES

De la revisión de los fundamentos del estudio del ruido ambiental de este artículo podemos extraer las siguientes ideas básicas:

1. El **sonido** es la **propagación de una onda mecánica longitudinal** en un medio elástico, que puede ser sólido, líquido o gaseoso. **Para el estudio** del sonido

<sup>3</sup> Orden PCI/1319/2018, de 7 de diciembre, por la que se modifica el Anexo II del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación del ruido ambiental.

se requiere la **identificación de la fuente**, el **medio de propagación** y el **receptor**.

2. Las **propiedades básicas** de la onda de sonido son su **periodo**, su **longitud de onda** y su **frecuencia**.
3. La **velocidad de propagación** del sonido **depende de las características del medio** de propagación, siendo más elevada cuanto mayor es la densidad del medio.
4. Para el estudio del sonido se debe considerar la **potencia de la fuente** ( $W$ ), la **intensidad del sonido** ( $I$ ) y la **presión sonora**. Todas ellas se trasladan a **escalas decibélicas**, con distintos valores de referencia, para su mejor comprensión.
5. Los sonidos están compuestos por un conjunto de frecuencias, denominadas **espectro de frecuencias**. Para su estudio se dividen en **octavas y tercios de octava**.
6. La **percepción del sonido** en los seres vivos es diferente, dependiendo de la especie. En el caso del ser humano se utilizan **escalas de ponderación** para adaptar el sonido a la percepción. Existen diferentes escalas de ponderación.
7. **El ruido es un sonido no deseado**, provocado fundamentalmente por la actividad antrópica, y que provoca **efectos indeseados en la salud, bienestar y etología de las especies** que lo sufren. En el ámbito humano es una **preocupación de primer nivel**, por parte de la **Organización Mundial de la Salud**, la **Unión Europea** y los diferentes **Estados miembros**.
8. Existe una **extensa normativa reguladora**, a todos los niveles administrativos, para el control y la gestión del ruido ambiental.
9. En el ámbito del ruido ambiental, se utilizan **dos estrategias de estudio: la medición y el cálculo**.
10. En ambos casos se deben **conocer los índices y métricas de ruido ambiental**, y en particular los referidos a los periodos de evaluación (día, tarde y noche), y el nivel continuo equivalente, así como otros índices que nos permiten definir mejor el ruido, como son los niveles máximos, pico y los percentiles.
11. En la Unión Europea, **se ha desarrollado un método común de evaluación del ruido ambiental**, de obligado cumplimiento para todos los estados miembros (CNOSSOS-EU), que pretende armonizar la forma en la que se cuantifica el ruido ambiental.

## 6. DEDICATORIA

Este artículo está dedicado a la memoria de mi compañera María de Cominges Lombos, investigadora del CEDEX en el campo de la Vigilancia Tecnológica, por su apoyo, interés, alegría y por sus aportaciones profesionales y personales al resto del equipo. Te echaremos de menos. DEP.

## 7. REFERENCIAS

Basner, M., y McGuire, S. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep. *International Journal*

*of Environmental Research and Public Health*, 15(3), 519. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030519>

CETUR (1980). *Guide du Bruit des Transports Terrestres. Prevision des Niveaux Sonores*.

Clark, C., y Paunovic, K. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11): 2400. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112400>

Dooling, R. (2002). *Avian Hearing and the Avoidance of Wind Turbines*. <https://doi.org/10.2172/15000693>

ECAC.CEAC Doc 29 (2016). *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports. 4<sup>th</sup> edition*.

Fletcher, H., y Munson, W.A. (1933). Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation\*. *Bell System Technical Journal*, 12(4): pp. 377–430. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1933.tb00403.x>

Garg, N., y Maji, S. (2014). A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 46, pp. 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.02.001>

Guski, R., Schreckenber, D., y Schuemer, R. (2017). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12): 1539. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121539>

Harris, C.M. (1995). *Manual de medidas acústicas y control de ruido* (3<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Madrid: McGraw-Hill.

ISO 9613-2 (1996). *Acústica-Atenuación del sonido cuando se propaga en el ambiente exterior, Parte 2: Método general de cálculo*. Ginebra (Suiza): International Organization for Standardization.

Ketten, D.R., y Bartol, S.M. (2005). Functional measures of sea turtle hearing: final report to the Office of Naval Research. <https://csi.whoi.edu/content/functional-measures-sea-turtle-hearing/index.html>

Kok, A., y Van Beek, A. (2019). *Amendments for CNOSSOS-EU: Description of issues and proposed solutions*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM. <https://doi.org/10.21945/RIVM-2019-0023>

Lutman, M.E., y Davis, A.C. (1994). The Distribution of Hearing Threshold Levels in the General Population Aged 18–30 Years. *International Journal of Audiology*, 33(6): pp. 327–350. <https://doi.org/10.3109/00206099409071891>

Ministerie van Volkshuisvesting (1996). *Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai*.

Peris, E. (2020). Environmental noise in Europe: 2020. Eur. Environ. Agency, 1, 104. [https://anima-project.eu/fileadmin/user\\_upload/Eulalia\\_Peris\\_%E2%80%93ANIMA\\_Noise\\_In\\_Europe\\_Report.pdf](https://anima-project.eu/fileadmin/user_upload/Eulalia_Peris_%E2%80%93ANIMA_Noise_In_Europe_Report.pdf)

Robinson, D.W., y Dadson, R.S. (1956). A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *British Journal of Applied Physics*, 7(5): pp. 166–181. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/7/5/302>

Segués Echazarreta, F. (2007). *Conceptos básicos de ruido ambiental*. CEDEX. <https://sicaweb.cedex.es/wp-content/uploads/2021/08/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>

Soto Molina, I., Robledano Aymerich, F., Rivera Gallego, P., y Arce Ruiz, R. (2022). *Conveniencia de desarrollo norma-*

tivo y metodológico de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en cuanto a las áreas acústicas tipo g "espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.

Steele, C. (2001). A critical review of some traffic noise prediction models. *Applied Acoustics*, 62(3): pp. 271–287. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00030-X)

Stylianou, K., Marco, P., y Fabienne, A.L. (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. European Commission. <https://doi.org/https://doi.org/10.2788/32029>

UNE-EN 61672-1 (2014). Electroacústica. Sonómetros. Madrid: Asociación Española de Normalización.

UNE 74014 (1978). Método de cálculo del nivel de sonoridad. Madrid: Asociación Española de Normalización.

UNE-EN 1793-3 (1998). Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras. Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. Parte 3: Espectro normalizado de ruido de tráfico. Madrid: Asociación Española de Normalización.

UNE-ISO 226 (2013). Líneas isofónicas normales. Madrid: Asociación Española de Normalización.

UNE-ISO 1996-1 (2020). Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental Parte 1: Magnitudes básicas y métodos de evaluación. Madrid: Asociación Española de Normalización.

UNE-ISO 1996-2 (2020). Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles de presión sonora. Madrid: Asociación Española de Normalización.

Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., y Foraster, M. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2): 379. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020379>

Wittmann, M.C. (1998). Making Sense of How Students Come to an Understanding of Physics: An Example from Mechanical Waves. College Park: University of Maryland.