

MANCHAS ACÚSTICAS: RUIDO DE AEROPUERTOS

Ing. Marta Yanitelli, , Ing. Vivian Pasch, Arq. Patricia Mosconi, Ing. Susana Cabanellas, Arq. Jorge Vazquez, Arq. Juan Carlos Rall, Ing. Federico Miyara

Grupo Ruido - Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño (UNR)

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica es, en la actualidad, un fenómeno inherente a toda área urbana, y constituye un factor ambiental de singular impacto sobre la calidad de vida de sus habitantes. En términos económicos implica además un costo real por las depreciaciones del valor inmobiliario de los espacios afectados y por las erogaciones en la atención de la salud (Pesse, 1999; Frankel, 1991). Generalmente este costo no se tiene en cuenta.

Entre las causas de dicho ruido puede citarse el transporte como la más importante, ya sea terrestre o aéreo, tanto de personas como de cargas. De todos los medios de transporte, la aviación es la que genera mayor cantidad de energía acústica, lo que unido a su dependencia de los aeropuertos, hace que las molestias que se ocasionan en las localidades situadas en las inmediaciones de éstos sean realmente importantes (NBE-CA 88).

Prosiguiendo con el estudio de las manchas acústicas urbanas expuesto en trabajos anteriores (Mosconi et al., 2000 a y b), en este trabajo se aborda la problemática del ruido aeronáutico en proximidades de aeropuertos considerando su zona de influencia como una mancha acústica. Para el mismo se utilizaron mediciones realizadas en el Aeropuerto Internacional de Rosario y en el Aeropuerto Metropolitano "Jorge Newbery" (Aeroparque) de la ciudad de Buenos Aires.

Asimismo, como en otros trabajos anteriores, (Cabanellas et al., 2000), también se ha puesto aquí énfasis en el uso de metodologías de evaluación de bajo costo, utilizando una metodología para la medición indirecta basada en la geometría acústica del sobrevuelo (Miyara et al., 2001 a y b).

2. ÁREA DE ESTUDIO

El Aeropuerto Internacional de Rosario (AIR), está ubicado a 13 km. al Oeste-Noroeste de la ciudad de Rosario, con una elevación de 25 m., a los 32° 55' de Latitud Sur y 60° 47' de Longitud Oeste, en un terreno de aproximadamente 400 ha, situado entre los distritos urbanos de Rosario y Funes.

Si bien el AIR está localizado en un área suburbana, originalmente con escaso tejido residencial en el entorno, se ha ido consolidando una importante área residencial a sus alrededores, la cual se encuentra hoy en pleno desarrollo. Las viviendas, de carácter permanente y temporario (por ejemplo, chalets de fin de semana), tienen una tipología variada, y están dispuestas aisladas en sus lotes respectivos, predominantemente hacia el

oeste y sur del predio del Aeropuerto. Además se visualiza una gran predominancia de áreas verdes, dado el uso eminentemente recreativo y de descanso del sector.

Debido a esta característica predominante del uso del suelo, se eligió esta zona para las determinaciones. En este primer trabajo la atención se ha focalizado en el ruido debajo de la trayectoria de la aeronave.

3. INDICADORES

La evaluación cuantitativa del ruido se efectúa por medio de indicadores que, atendiendo a la naturaleza del ruido a medir, reflejen de una manera lo más fidedigna posible los efectos potenciales del ruido investigado.

La respuesta humana con respecto al ruido presenta una gran variabilidad. La psicoacústica considera las variables que pueden determinarse por medio de experimentos sensoriales y cognitivos y las correlaciona con parámetros físicos medibles objetivamente, como la intensidad, el contenido de frecuencias (espectro), la distribución estadística (predominancia de niveles uniformes o, por el contrario, de una gran variabilidad), la evolución en el tiempo (crecimiento y decrecimiento rápido o lento). En menor medida se consideran también otros aspectos contextuales, también determinables objetivamente a través de la categorización (tipo de ambiente, horario, ruido de fondo, etc.).

Uno de los problemas relativos a la adopción de indicadores está en encontrar valores únicos suficientemente correlacionados con los efectos como para poder establecer relaciones dosis-efecto que permitan predecir las consecuencias. El interés por los valores únicos obedece a razones de simplicidad. Debido a la naturaleza espectralmente analítica del oído, muchos indicadores de este tipo se basan en el filtrado del sonido por medio de redes de ponderación que aplican mayor peso a aquellas frecuencias más significativas en relación con determinado tipo de ruido.

Para los ruidos comunitarios generales, incluido el del tránsito, la ponderación A proporciona un indicador (el nivel sonoro A) muy bien correlacionado con efectos como la molestia o la interferencia a la palabra¹ (Schultz, 1978; Fidell, 1991; Miedma et al., 1998), por esa razón para los ruidos habituales las ordenanzas prescriben el uso del nivel sonoro A (en dBA), y sus variantes, como el nivel equivalente L_{Aeq} , el nivel día-noche L_{dn} , el nivel día-tarde-noche L_{den} , etc.

En el caso específico del ruido de aviación, el criterio utilizado surge de los trabajos de Kryter (Kryter, 1958 y 1959; Kryter et al., 1963 y 1964). En los mismos introduce el concepto de *ruidosidad* como más específico que el de molestia, y lo compara con el de *sonoridad* introducido por Fletcher (Fletcher, 1933) y extendido a sonidos complejos por Stevens (Stevens, 1956). La ruidosidad (o *ruidosidad percibida*) N se expresa en una unidad arbitraria denominada *noy*.² Este concepto es semejante al de *sonoridad* (expresada en *son*). En el trabajo de 1959 introduce el concepto de *nivel percibido de ruido*, L_{PN} , una versión logarítmica de la ruidosidad, que se expresa en $PNdB$. El procedimiento para calcularlo es similar al que propuso Stevens para calcular el *nivel de sonoridad* (en *fon*) conocido el espectro. El método admite dos variantes, según que se disponga del espectro en bandas de tercio de octava o de octava. En el presente caso, se utilizarán espectros de bandas de octava ya que, debido a la indeterminación tiempo-frecuencia, una determinación precisa de las bandas inferiores de tercio de octava re-

¹ La ponderación A fue originalmente desarrollada para medir la sensación subjetiva de sonoridad de los sonidos débiles.

² La ruidosidad es 1 noy para una banda de ruido de 40 dB en la banda [910 Hz; 1090 Hz].

quiere tiempos importantes que reducen la discriminación temporal necesaria para describir con precisión la emisión en todos los ángulos.³

El método consiste en transformar los niveles L_i correspondientes a las bandas de octava entre 63 Hz y 8000 Hz en valores de ruidosidad N_i por medio de los contornos de igual ruidosidad percibida de la figura 1. Por ejemplo, un nivel de presión sonora de

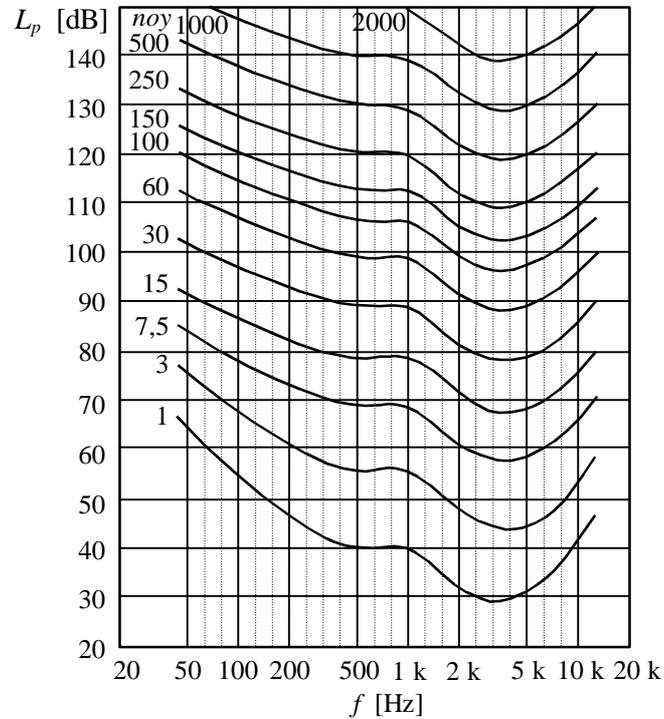


Figura 1. Contornos de igual ruidosidad para ruidos de origen aeronáutico para valores selectos de ruidosidad.

70 dB en la frecuencia 500 Hz tiene una ruidosidad de alrededor de 8 noy. Una vez repetido el anterior procedimiento para todas las bandas, se obtiene la ruidosidad total según la ecuación

$$N = N_{m\acute{a}x} + 0,3 \left(\sum_i N_i - N_{m\acute{a}x} \right). \quad (1)$$

El nivel percibido de ruido se calcula luego por medio de la ecuación⁴

$$L_{pN} = 40 + \frac{10 \log N}{\log 2}. \quad (2)$$

³ Cuando el avión pasa justo sobre el observador, un desplazamiento de 15° representa un tiempo muy corto debido a la gran velocidad, por lo cual si se pretende describir la emisión del avión en direcciones cada 15° se requiere una discriminación temporal muy alta.

⁴ El caso para bandas de tercio de octava está normalizado en la norma ISO 3891:1978, y reemplaza el factor 0,3 por un factor 0,15.

Kryter pudo comprobar que el ordenamiento de los ruidos de aviación por los sujetos bajo experimentación respondía muy bien al nivel de ruido percibido.

El valor obtenido de L_{PN} corresponde a un instante específico. Dado que un sobrevuelo constituye un evento completo en sí mismo en el cual el espectro varía en forma permanente, es interesante determinar una única valoración numérica que lo describa en forma completa. El indicador que cumple con esto es el *nivel de ruido percibido efectivo*, L_{EPN} , definido como

$$L_{EPN} = 10 \log \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{+\infty} 10^{L_{PN}/10} dt. \quad (3)$$

donde $T_0 = 10$ s se denomina *tiempo de normalización* (equivale a referir el valor de la integral, cualquiera sea la duración, a 10 s). A efectos de su cálculo numérico la integral puede limitarse al intervalo $[t_1; t_2]$ fuera del cual $L_{PN} < L_{Pnm\acute{a}x} - 10$ dB, quedando:

$$L_{EPN} \cong 10 \log \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_{PN}/10} dt. \quad (4)$$

En la práctica esta integral se puede reemplazar por una sumatoria. Según el Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (OACI, 1993) y la Norma ISO 3891 la integral puede realizarse sumando fragmentos de duración $\Delta t = 0,5$ s:

$$L_{EPN} \cong 10 \log \frac{\Delta t}{T_0} \sum_{k=1}^{(t_2-t_1)/\Delta t} 10^{L_{PN k}/10} \quad (5)$$

El procedimiento anterior es bastante tedioso, sobre todo porque, como se vio, requiere el cálculo de L_{PN} cada 0,5 s. Puede obtenerse una versión aproximada utilizando la ponderación D.⁵ Para ello se aplica primero la ecuación siguiente,

$$L_D = 10 \log \left(\sum_i 10^{(L_i + \Delta L_{D i})/10} \right). \quad (6)$$

donde $\Delta L_{D i}$ es el incremento (positivo o negativo según el caso) correspondiente a la banda i -ésima dado por la tabla 1.

Tabla 1. Corrección en dB según la curva de compensación D en las bandas de octava de 63 Hz a 8000 Hz para un ruido de típico aeronave (Lord et al., 1980).

f [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΔL_D [dB]	-10,9	-5,5	-1,6	-0,3	0,0	7,9	11,1	5,5

⁵ La ponderación D corresponde a la curva de 40 noy invertida y desplazada para que en 1 kHz el valor sea de 0 dB.

El método simplificado consiste, entonces, en aproximar L_{EPN} mediante la ecuación

$$L_{EPN} \cong L_{D\text{máx}} + 7 \text{ dB} + 10 \log \frac{t_2 - t_1}{T_0}. \quad (7)$$

En el caso en que el ruido del sobrevuelo contenga irregularidades espectrales importantes, este método no puede aplicarse. Se utiliza la ecuación 5 reemplazando los valores L_{PNk} por L_{TPNk} , donde la T se refiere a una corrección tonal (en cuyos detalles no se abundará), que se encuentra descrita en la norma ISO 3891, así como en los documentos de la OACI (OACI, 1993).

El ruido aeroportuario tiene la característica de ser pulsante, es decir, constituido por una sucesión de eventos más o menos aislados. Esto ha llevado a considerar indicadores que no sólo contemplen la magnitud del ruido sino también la cantidad de eventos en un tiempo dado. Uno de los indicadores más utilizados para describir el grado de molestia percibido en las proximidades de los aeropuertos, es el *índice de ruido y número de eventos* (*noise and number index*), NNI , dado por ⁶

$$NNI = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 10^{L_{PN\text{máx}k} / 10} \right) + 15 \log N - 80 \quad (8)$$

donde N número de operaciones de sobrevuelo en el periodo considerado (en general 12 horas o 24 horas) y $L_{PN\text{máx}k}$ es el valor máximo del nivel L_{PN} correspondiente al k -ésimo sobrevuelo (Hassal, 1988; OACI, 1988). El NNI se expresa en PNdB.

4. GEOMETRÍA DEL SOBREVUELO

A efectos de determinar el ruido de un avión en un punto y a partir de las mediciones efectuadas en el origen ($y = 0$) es necesario estudiar la geometría y la cinemática del sobrevuelo. Con referencia a las notaciones de la figura 2, α es el ángulo de

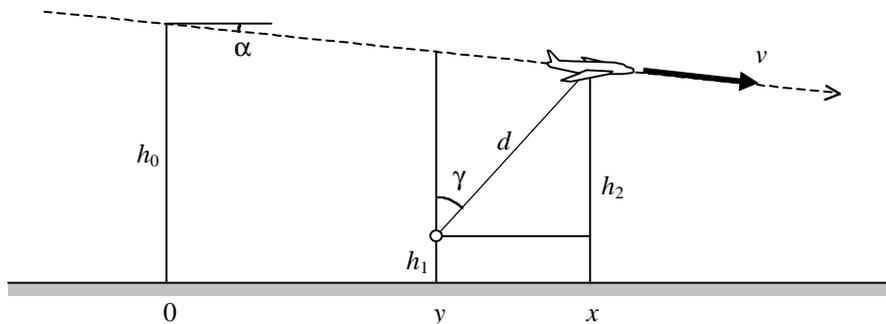


Figura 2. Notación utilizada para describir la geometría del sobrevuelo.

⁶ Índice obtenido de encuestas realizadas en Inglaterra (Wilson Report, 1963)

aproximación (en general alrededor de 3°), γ , el ángulo que subtiende la línea entre el observador (el micrófono del sonómetro) y la fuente (la aeronave) con respecto a la vertical (posición zenital), y la posición del observador y x la posición de la fuente. Asimismo, h_0 es la altura de la aeronave cuando pasa por el origen, h_1 , la altura del observador y h_2 , la altura de la fuente.

Se supondrá que se cuenta con una grabación digital del ruido del sobrevuelo. En ese caso es posible caracterizar acústicamente al avión por medio del nivel de potencia sonora corregido por directividad, $L_w + D$, con el procedimiento introducido en un trabajo anterior (Miyara et al., 2001 a y b), y que se describe brevemente en la sección siguiente.

Para calcular el efecto en otro punto de observación y diferente del original, se necesita conocer la distancia d entre el avión y el micrófono. Para ello considérense las relaciones siguientes:

$$x - y = (h_2 - h_1) \operatorname{tg} \gamma \quad (9)$$

$$h_2 = h_0 - x \operatorname{tg} \alpha \quad (10)$$

de donde

$$x = \frac{(h_0 - h_1) \operatorname{tg} \gamma + y}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma}. \quad (11)$$

Con el valor de x se puede, entonces, calcular

$$d = \sqrt{(x - y)^2 + (h_2 - h_1)^2}. \quad (12)$$

5. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA AERONAVE

Para obtener la descripción acústica de la aeronave a partir de una grabación digital se utilizará el concepto de *geometría acústica* introducido en trabajos anteriores (Miyara et al, 2001, a y b). Para ello se utilizan dos fenómenos: el efecto Doppler y la interferencia entre las ondas directa y reflejada (efecto filtro-peine).

5. 1. Estimación de la velocidad

El efecto Doppler (ilustrado en la figura 3) permite estimar la velocidad de aproximación de la aeronave a partir de las frecuencias aparentes detectadas por el observador cuando el avión se acerca y está todavía lejos, $f_{-\infty}'$, y cuando ya ha pasado y se ha alejado considerablemente, $f_{+\infty}'$, además de la velocidad del viento, v_w . Se obtiene la ecuación

$$v = \frac{c - v_w}{\cos \alpha} \frac{f_{-\infty}' - f_{+\infty}'}{f_{-\infty}' \frac{c - v_w}{c + v_w} + f_{+\infty}'} \quad (13)$$

de la cual puede calcularse la velocidad v .

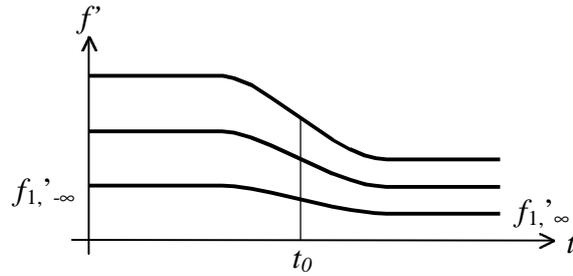


Figura 3. Representación espectrográfica del efecto Doppler, en la que se han indicado en forma idealizada los tres primeros armónicos del tono principal. En el espectrograma real las líneas aparecen en realidad como zonas sombreadas.

5.2. Estimación de la altura y la distancia fuente-receptor

El efecto filtro-peine consiste en que para ciertas frecuencias la onda directa y la onda reflejada están desfasadas 180° (debido a que la diferencia de recorridos es igual a media longitud de onda) y, por consiguiente, su interferencia en la posición del micrófono es destructiva. Dichas frecuencias resultan ser los múltiplos impares de cierta frecuencia f_1 y dependen de la posición de la aeronave y el receptor, y se pueden apreciar claramente en el espectrograma (diagrama frecuencia-tiempo en el que las intensidades aparecen con diferentes colores) obtenido a partir de una grabación del sobrevuelo, como se muestra en el ejemplo de la figura 4.

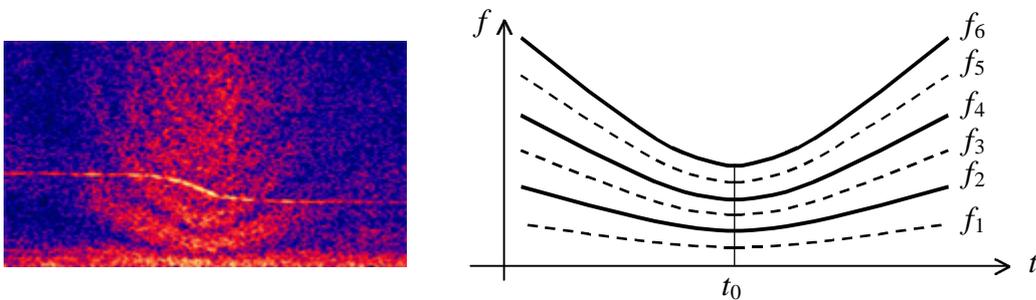


Figura 4. Espectrograma representativo del efecto filtro-peine en el cual se supuso velocidad y altitud constantes (si no lo son, se pierde la simetría). Las líneas de trazos corresponden a las frecuencias canceladas, y las líneas continuas a las reforzadas. En la práctica son ambas en realidad áreas sombreadas, no líneas, como se muestra en el ejemplo de la izquierda (en el cual se puede ver también una línea correspondiente al efecto Doppler). En el instante t_0 la aeronave se encuentra justo sobre el observador

Por consideraciones geométricas se verifica fácilmente que las frecuencias suprimidas son, cuando $y = 0$,

$$f_{2n-1} = (2n-1) \frac{c}{2} \frac{1}{\sqrt{(h_2 + h_1)^2 + x^2} - \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + x^2}}. \quad (14)$$

donde c es la velocidad del sonido. De todas las frecuencias que cumplen con esta ecuación conviene elegir f_3 , por ser en general la más claramente definida en el espectrograma. Tomando $f_1 = f_3 / 3$, puede despejarse la altura h_2 de la aeronave:

$$h_2 = \sqrt{\frac{2(x^2 + h_1^2) \frac{c^2}{8f_1^2} - \left(\frac{c^2}{8f_1^2}\right)^2}{2\left(2h_1^2 - \frac{c^2}{8f_1^2}\right)}}. \quad (15)$$

A su vez,

$$x = v \cdot t \cdot \cos \alpha, \quad (16)$$

Las ecuaciones 12, 15 y 16 permiten determinar la distancia d entre la fuente y el observador para cada instante t . Para ello se obtiene primero f_3 del espectrograma y luego se calcula $f_1 = f_3 / 3$. De la ecuación 16 se obtiene la posición horizontal x ; de la 15, la altura h_2 y de la 12, la distancia d .

5.3. Efectos de propagación

El registro digital del sonido permite, también, calcular el nivel de presión sonora L_p (en la posición del observador) en bandas de octava para cada instante considerado. Para ello se realiza un filtrado por FFT de 4096 puntos para obtener cada una las bandas entre 63 Hz y 8000 Hz y se determina el valor eficaz en un pequeño intervalo de duración entre 200 ms y 500 ms centrado en cada punto de interés de la trayectoria.

Como se procura obtener la caracterización acústica de la aeronave en sí, deben descontarse los efectos de la propagación, para lo cual se puede aplicar la Norma Internacional ISO 9613-2. De acuerdo a lo recomendado en esta la norma, una fuente que emite un ruido cuyo nivel de potencia sonora en una banda de octava es L_W (referido a 1 pW) produce un nivel de presión sonora, en la misma banda, dado por

$$L_p = L_W + D - A \quad (17)$$

donde D es la corrección por directividad y A , la atenuación por propagación, a su vez dada por

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{terreno} + A_{pantalla} + A_{varios}. \quad (18)$$

A_{div} es la atenuación por divergencia geométrica (incluyendo un término de corrección para pasar de nivel de potencia a nivel de presión sonora); A_{atm} , la atenuación por efectos disipativos en la atmósfera; $A_{terreno}$, la atenuación por efectos de absorción e interferencia en el terreno; $A_{pantalla}$, la atenuación por apantallamiento (ya sea por pantallas puestas con fines acústicos o edificios, montículos, etc.; A_{varios} , otras componentes de atenuación (por ejemplo debida al follaje o a la presencia de edificios o superficies reflectantes). Si bien la norma excluye el ruido de aviación, es aplicable al caso de aviones a baja altura como el que nos ocupa (Harris, 1998; Daigle, 2000).

Dado que las determinaciones se efectúan a una distancia considerable de edificios, pantallas, etc., es posible ignorar los dos últimos términos. Analicemos los restantes. En primer lugar se tiene, para una fuente puntual,

$$A_{div} \cong 20 \log (d / d_0) + 11 \text{ dB} \quad (19)$$

donde d es la distancia al centro de la fuente y $d_0 = 1$ m (distancia de referencia). Este término surge de tener en cuenta la variación de la presión sonora con la recíproca de la distancia (radiación esférica o hemisférica).

El término de atenuación atmosférica depende de la temperatura y la humedad relativa ambiente y se especifica en la Norma ISO 9613-1. En el caso analizado la temperatura era de aproximadamente 15°C y la humedad de 90% , resultando las atenuaciones indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Atenuación atmosférica en dB/km para una temperatura de 15°C y una humedad relativa ambiente de 90% .

f [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A_{atm}/d [dB/km]	0,02	0,08	0,31	1,0	2,4	4,3	8,1	22	76

En cuanto al término de atenuación por el terreno, se refiere principalmente a la interferencia entre las ondas directa y reflejada. En este caso se tiene en cuenta si el suelo es duro, poroso o mixto, lo cual se refleja en el parámetro G . En el presente caso es poroso (pues era una calle de tierra y veredas de tierra o con pasto), por lo cual corresponde tomar $G = 1$. La norma ISO 9613-2 proporciona varios algoritmos que permiten calcular la atenuación debida al terreno para las frecuencias desde 63 Hz hasta 8000 Hz. Dicha atenuación se compone de tres términos: la atenuación en las proximidades de la fuente, la atenuación en el recorrido, y la atenuación en las proximidades del receptor. El cálculo debe efectuarse para cada caso particular, y se dan más detalles en el Apéndice.

Con los resultados parciales anteriores es posible determinar en cada caso la atenuación total debida a divergencia geométrica, absorción en la atmósfera y a efectos del terreno. Si la fuente fuera puramente puntual y omnidireccional bastaría especificar el nivel de potencia sonora en cada banda para caracterizarla completamente. Como no es el caso, convendrá caracterizarla mediante *el nivel de potencia sonora corregido por directividad*:

$$L_W + D = L_p + (A_{div} + A_{atm} + A_{terreno}). \quad (20)$$

La determinación anterior conviene efectuarla en instantes tales que los ángulos subtendidos por la línea que une la aeronave con el observador respecto a la vertical estén equiespaciados. En el presente caso se eligieron múltiplos de 15° , como se indica en la figura 5. Dichos instantes pueden obtenerse a partir de las ecuaciones 11 y 16, tomando ángulos cada 15° . Resulta:

$$t_k = \frac{1}{v \cos \alpha} \frac{(h_0 - h_1) \text{tg } k \gamma_0 + y}{1 + \text{tg } \alpha \cdot \text{tg } k \gamma_0}. \quad (21)$$

donde $\gamma_0 = 15^\circ$ y $k = -5, -4, \dots, +5$. En la figura 6 se muestra el resultado para una aeronave Boeing 737-200, en forma de diagrama polar.

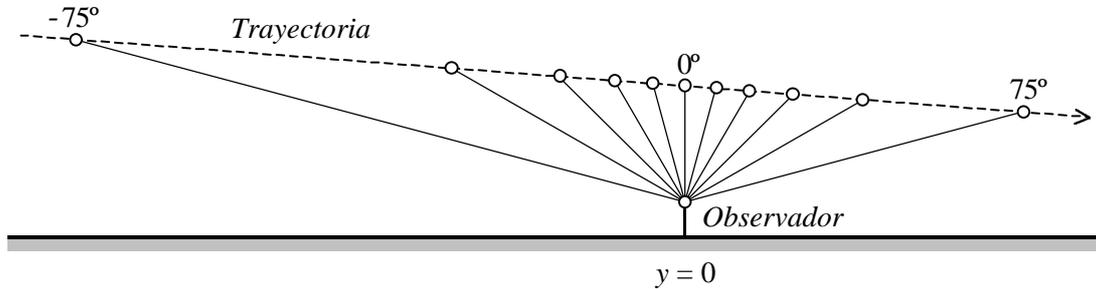


Figura 5. Determinación de los puntos de la trayectoria descendente que subtenden ángulos desde -75° hasta 75° de la vertical.

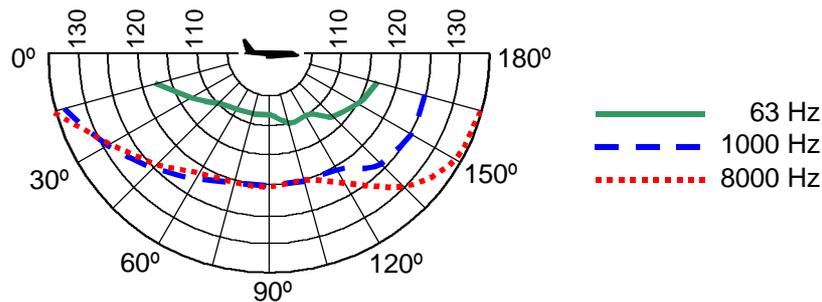


Figura 6. Diagrama polar del nivel de potencia sonora corregido por directividad, L_{WD} , para tres valores de frecuencia.

6. NIVEL DE PRESIÓN SONORA DEBAJO DE LA TRAYECTORIA

Con la caracterización dada en la sección previa, obtenida a partir de mediciones efectuadas en $y = 0$ durante un sobrevuelo, será posible calcular el nivel de presión sonora en bandas de octava en otras posiciones $y \neq 0$ debajo de la trayectoria (figura 2) utilizando las ecuaciones 17 y 18.

A efectos de determinar el nivel efectivo percibido, L_{EPN} , se utilizan los niveles de presión sonora en bandas de octava así obtenidos junto con las ecuaciones 1, 2 y 5, o bien el método simplificado de las ecuaciones 6 y 7.

En la tabla 3 se muestran los valores resultantes cada 100 m a lo largo de la proyección sobre el terreno de la trayectoria descendente de la aeronave, y en la figura 7 se han indicado los valores de L_{EPN} .

Tabla 3. Valores de L_{EPN} calculados cada 100 m a partir de la cabecera de la pista.

l [m]	200	300	400	500	600	700	800	900
L_{EPN} [PNdB]	99,8	99,0	98,4	97,8	97,2	96,7	96,2	95,8

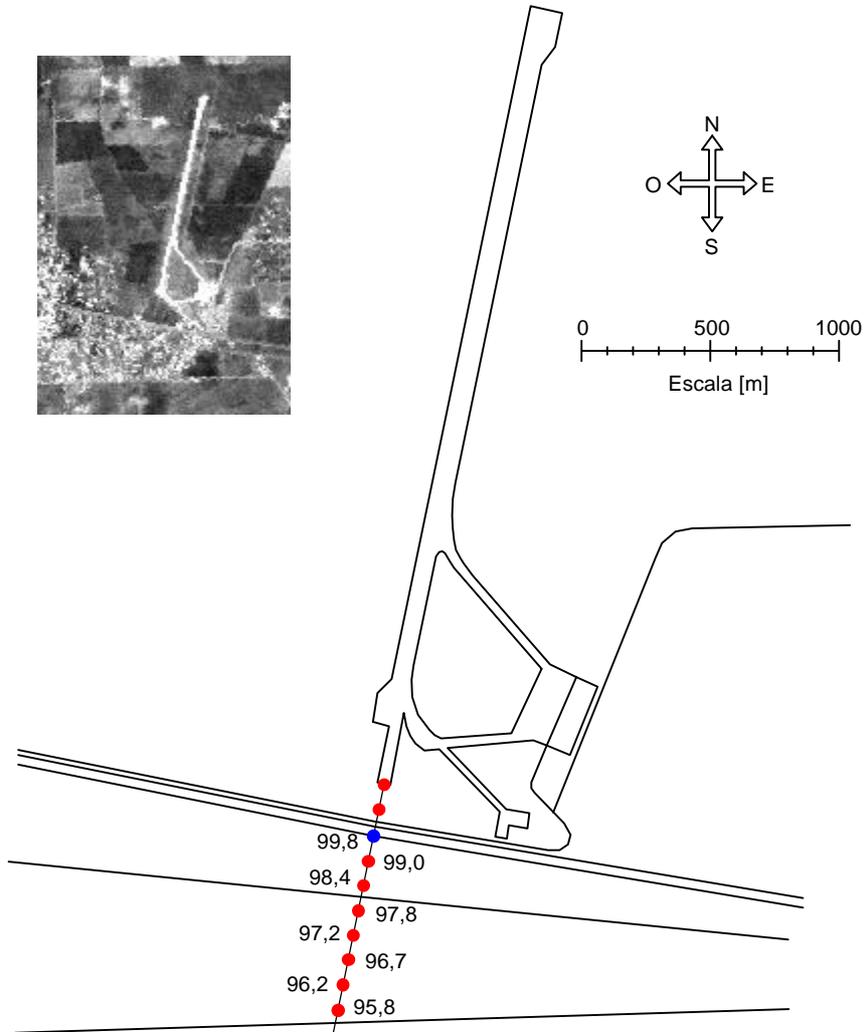


Figura 7. En la fotografía aérea se muestra el Aeropuerto Internacional Rosario. Sobre el diagrama esquemático, los valores del nivel percibido de ruido efectivo cada 100 m. El punto azul indica el punto original de medición de las características acústicas de la aeronave (un Boeing 737-200).

APÉNDICE

Cálculo de la atenuación por terreno

La atenuación por terreno es la suma de tres componentes: A_s , A_m , y A_d correspondientes a la atenuación del suelo en la zona de la fuente, en la zona intermedia y en la zona del receptor respectivamente:

$$A_{\text{terreno}} = A_s + A_m + A_d.$$

Llamando d_p a la distancia horizontal entre la fuente y el receptor, h_s a la altura la fuente y h_r a la altura del receptor, se considera como *zona de la fuente* aquella cuya distancia a la fuente es menor que $30 h_s$ y *zona del receptor* aquella cuya distancia al receptor es menor que $30 h_r$. El resto es la zona intermedia. En caso de ser $d_p < 30(h_s + h_r)$ la zona intermedia desaparece. El factor de terreno G es el coeficiente de absorción del terreno y es aproximadamente 0 para terrenos duros y 1 para terrenos porosos, con vegetación, etc. En las tablas siguientes se indican las fórmulas de cálculo de la atenuación por terreno. La altura h y el factor de terreno G son los correspondientes a la zona considerada.

f [Hz]	A_s, A_r [dB]
63	- 1,5
125	$-1,5 + G \cdot \left[1,5 + 3,0 e^{-0,12(h-5)^2} \left(1 - e^{-d_p / 50} \right) + 5,7 e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-2,8 \cdot 10^{-6} \cdot d_p^2} \right) \right]$
250	$-1,5 + G \cdot \left[1,5 + 8,6 e^{-0,09h^2} \left(1 - e^{-d_p / 50} \right) \right]$
500	$-1,5 + G \cdot \left[1,5 + 14,0 e^{-0,46h^2} \left(1 - e^{-d_p / 50} \right) \right]$
1000	$-1,5 + G \cdot \left[1,5 + 5,0 e^{-0,90h^2} \left(1 - e^{-d_p / 50} \right) \right]$
2000	$-1,5 + G \cdot 1,5$
4000	$-1,5 + G \cdot 1,5$
8000	$-1,5 + G \cdot 1,5$

f [Hz]	A_m [dB]	
63	- 3 q	$q = \begin{cases} 0 & \text{si } d_p \leq 30 [h_s + h_r] \\ 1 - \frac{30 [h_s + h_r]}{d_p} & \text{si } d_p > 30 [h_s + h_r] \end{cases}$
125	-3 q (1 - G)	
250		
500		
1000		
2000		
4000		
8000		

REFERENCIAS

- Cabanellas, Susana; Mosconi, Patricia; ; Pasch, Vivian; Yanitelli, Marta; Miyara, Federico; Puigdomènech, Joan; Rall, Juan Carlos; Vazquez, Jorge. "A Novel Low-cost Approach to Noise Mapping". *Internoise 2000*. Nice, Francia, agosto de 2000.
- Daigle, Gilles. Comunicación personal (31/10/00).
- Frankel, Marvin. "Aircraft noise and residential property values: Results of a survey study". *Appraisal Journal*, January 1991, Vol 59, Issue 1, p. 96.
- Fidell, S.; Barber, D.S.; and Schultz, T.J.: 1991. "Updating a Dosage-effect Relationship for the Prevalence of Annoyance due to General Transportation Noise". *Journal of the Acoustical Society of America*, vol 89. pp. 221-233.
- Fletcher, H.; Munson, W. A.: "Loudness, its definition, measurement and calculation". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 5, pp. 82-108, 1933.
- Harris, Cyril (editor). "Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control". Acoustical Society of America, Woodbury, USA, 1998.
- Hasall, J. R.; Zaveri, K.: "Acoustic Noise Measurements". Brüel & Kjaer. Junio de 1988]
- ISO 3891:1978 Acoustics - Procedure for describing aircraft noise heard on the ground
- ISO 9613-1:1993 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere
- ISO 9613-2:1996 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation
- Josse R. "La acústica en la construcción", Ed. Gustavo Gilli, 1975.
- Kryter, Karl. D. "Annoyance value of band of noise". *Trans. 30th Annual Meeting National Forum on Deafness and Speech Path.*, 26-28, 1958.
- Kryter, Karl D. "Scaling Human Reactions to the Sound from Aircraft". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 31, No 11, November, 1959, pp 1415-1429.
- Kryter, Karl D.; Pearsons, Karl S. "Some Effects of Spectral Content and Duration on Perceived Noise level". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 35, No 6, June, 1963, pp 866-883.
- Kryter, Karl D.; Pearsons, Karl S. "Modification of Noy Tables". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 36, No 6, February, 1964, pp 394-397.
- Kryter, Karl D. "Community annoyance from aircraft and ground vehicle noise". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 74, No 4, October, 1982, pp 1222-1242.
- Kryter, Karl D. "Rebuttal by Karl D. Kryter to comments by T. J. Schultz". *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 74, No 4, October, 1982, pp 1253-1257.
- Lord, Harold W.; Gatley, William S.; Evensen, Harold A.: "Noise Control for Engineers". Editorial McGraw-Hill Book Company. New York, USA, 1980.
- Miedema, H.M.E.; Vos, H.: "Exposure-response relations for transportation noise". *Journal of the Acoustical Society of America* 104 (6), December. 1998.
- Miyara, Federico; Cabanellas, Susana; Mosconi, Patricia; Pasch, Vivian; Yanitelli, Marta; Rall, Juan Carlos; Vazquez, Jorge. "The acoustical geometry of aircraft overflights". *Internoise 2001*, La Haya, Holanda, agosto de 2001.
- Miyara, Federico; Cabanellas, Susana; Mosconi, Patricia; Pasch, Vivian; Yanitelli, Marta; Rall, Juan Carlos; Vazquez, Jorge. "Ruido de aeropuertos: Caracterización acústica de una aeronave a partir del ruido del sobrevuelo". 4ta Jornada Regional sobre Ruido Urbano, realizada en Montevideo, Uruguay, el 14/7/01.
- Mosconi, Patricia; Yanitelli, Marta; Pasch, Vivian; Cabanellas, Susana; Vazquez, Jorge; Rall, Juan Carlos; Miyara, Federico; Puigdomènech, Joan. "Manchas Acústicas Urbanas: un enfoque para su valoración". Terceras Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica, Rosario, Argentina, 29 y 30 de septiembre de 2000 (en "Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica", Editorial ASOLOFAL, Rosario, 2000).
- Mosconi, Patricia; Yanitelli, Marta; Pasch, Vivian; Cabanellas, Susana; Vazquez, Jorge; Rall, Juan Carlos; Miyara, Federico; Puigdomènech, Joan. "Manchas Acústicas Urbanas: Pautas para determinar prioridades de intervención". II Congreso Iberoamericano de Acústica, Madrid, 16 al 20 de octubre de 2000.
- NBE-CA 88. Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Acústicas en los Edificios. Lgislación Española. Boletín Oficial del Estado 8/10/88.
- OACI, "Protección del Medio Ambiente - Anexo 16 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional - Volumen I: Ruido de las Aeronaves". Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1993.

- OACI, "Método recomendado para calcular las Curvas de Nivel de Ruido en la Vecindad de los Aeropuertos". Circular 205-AN/1/25. Organización de Aviación Civil Internacional. Montreal, Canadá, 1988.
- Pesse, Ricardo. "Una evaluación económica del ruido en Santiago". Encuentro Chileno de Acústica 1999, Valdivia, Chile.
- Schultz, T. J.: "Synthesis of social surveys on noise annoyance". Journal of the Acoustical Society of America 64 (2), Aug. 1978.
- Stevens, S. S. "Calculation of the Loudness of Complex Noise". Journal of the Acoustical Society of America, vol 28 No 5, September 1956, pp. 221-233.
- Wilson Committee on the Problem of Noise, Noise: Final Report, Cmnd 2056, London, HMSO, 1963, p. 208.