



# Universidad Austral de Chile

---

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Acústica

**Profesor Patrocinante:**  
Christian Gerard B.  
Ingeniero Acústico  
Control Acústico Ltda.

## **Evaluación de la pérdida de inserción de una barrera acústica aplicada en un proyecto lineal**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado de Licenciado en Acústica y al título profesional de Ingeniero Acústico.

**Esteban David Olmos Cancino**  
**Valdivia Chile 2002**

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>RESÚMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
3.1	OBJETIVOS GENERALES .....	6
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
4.1	TEORÍA DE LA GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE TRÁFICO .....	7
4.1.1	PROPAGACIÓN DE UN SEGMENTO DE CARRETERA HOMOGÉNEO .....	7
4.2	FUENTES DE RUIDO DE VEHÍCULOS .....	8
4.2.1	COMPARACIÓN DEL RUIDO GENERADO POR RODADURA Y POTENCIA .....	8
4.3	FACTORES QUE AFECTAN A LA GENERACIÓN DEL RUIDO DE TRÁFICO .....	10
4.3.1	FLUJO VEHICULAR.....	10
4.3.2	VELOCIDAD MEDIA Y PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS .....	11
4.3.3	GRADIENTE .....	11
4.3.4	SUPERFICIE DE LA CARRETERA .....	11
4.4	PROPAGACIÓN EN CAMPO LIBRE .....	13
4.4.1	ECUACIÓN BÁSICA .....	13
4.4.2	DIVERGENCIA GEOMÉTRICA ( $A_{div}$ ).....	13
4.4.3	ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA ( $A_{atm}$ ).....	14
4.4.4	EFFECTO SUELO ( $A_{gr}$ ).....	14
4.4.5	EFFECTOS DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS.....	16
4.4.6	REFLEXIONES Y DIFUSIÓN.....	18
4.4.7	INFLUENCIA DEL VIENTO EN BARRERAS.....	19
4.5	TEORÍA DE BARRERAS .....	20
4.6	INVESTIGACIONES SOBRE BARRERAS ACÚSTICAS.....	22
4.7	CÁLCULOS DE UNA BARRERA ACÚSTICA FINITA.....	27
4.8	DIFRACCIÓN DE ONDAS ESFÉRICAS.....	29
4.9	ATENUACIÓN DE BARRERA ACÚSTICA, SEGÚN OTROS AUTORES .....	34
4.10	ATENUACIÓN DE BARRERA ACÚSTICA, SEGÚN ISO 9613-2 .....	35
4.11	ÍNDICE GLOBAL DE LA PÉRDIDA DE INSERCIÓN EN DBA.....	38
4.12	DISEÑO DE BARRERAS .....	39
4.13	TRANSMISIÓN SONORA A TRAVÉS DE LA BARRERA .....	44
4.14	LONGITUD DE LA BARRERA ACÚSTICA .....	46
4.15	BARRERAS PARALELAS.....	49
4.16	CIMENTOS DE LAS BARRERAS .....	51
4.17	NORMATIVA REFERENTE A BARRERAS ACÚSTICAS .....	53
4.17.1	EN 1793 DISPOSITIVOS REDUCTORES DE RUIDO DE TRÁFICO EN CARRETERAS-MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO-PARTE 1: CARACTERÍSTICAS INTRÍNECAS RELATIVAS A LA ABSORCIÓN SONORA .....	53

4.17.2 EN 1793 DISPOSITIVOS REDUCTORES DE RUIDO DE TRÁFICO EN CARRETERAS-MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO-PARTE 2: CARACTERÍSTICAS INTRÍNECAS RELATIVAS AL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO .....	55
4.17.3 ISO/FDIS 10847 DETERMINACIÓN IN SITU DE LA PÉRDIDA DE INSERCIÓN DE BARRERAS ACÚSTICAS DE TODOS LOS TIPOS .....	57
4.18 DEFINICIONES SOBRE BARRERAS ACÚSTICAS EN ALGUNOS PAÍSES .....	58
4.18.1 AUSTRALIA.....	58
4.18.2 ESPAÑA .....	59
4.19 TIPOS DE BARRERAS .....	60
4.19.1 DIQUES DE TIERRA O TRINCHERA .....	61
4.19.2 BARRERAS DE CONCRETO.....	64
4.19.3 BARRERAS DE LADRILLO .....	66
4.19.4 BARRERAS METÁLICAS.....	67
4.19.5 BARRERAS TRANSPARENTES .....	68
4.19.6 BARRERAS DE MADERA .....	69
<b>5 MATERIAL Y MÉTODO.....</b>	<b>70</b>
5.1 MEDICIÓN DE ESPECTRO SONORO EN AUTOPISTA DEL ITATA .....	70
5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA BARRERA ACÚSTICA .....	71
5.3 UBICACIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN .....	72
5.4 ADQUISICIÓN DE SEÑAL.....	73
5.5 MATERIALES .....	74
<b>6 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
6.1 CÁLCULO DE ILA .....	83
6.2 DIFERENCIA DE CAMINO .....	86
6.3 MODELACIÓN SOUNDPLAN™ .....	87
6.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	90
<b>7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>95</b>

## 1. RESÚMEN

Este trabajo reúne herramientas para la evaluación de una de las medidas de mitigación más utilizadas en carreteras para la etapa de operación: la barrera acústica.

Se iniciará haciendo una introducción al concepto de barreras acústicas y a las distintas entidades y variables comprometidas en el estudio de esta materia.

Luego, se desarrollarán las características de la carretera como fuente sonora y los factores que inciden en la propagación de su emisión acústica. Se discutirán en este apartado las variables relacionadas con la propagación acústica en el exterior.

A continuación, se hará mención a la teoría de barreras acústicas. En esta sección se mostrarán los algoritmos utilizados en la evaluación de la pérdida de inserción sonora de la barrera, las consideraciones de diseño y construcción, los tipos de barreras y las normativas relacionadas.

Finalmente, la parte experimental mostrará un método de medición de efectividad de la barrera acústica. Se analizará la pérdida de inserción de una barrera instalada en la Autopista del Itata (Acceso Norte a Concepción), VIII región, obteniéndose resultados de atenuación levemente menores a los entregados por los algoritmos contrastados Maekawa, Kurze-Anderson, ISO 9613, Rathé y Tatge. Por otro lado, mediante el software de predicción sonora SoundPLAN™, se crearán mapas de ruido correspondientes a las situaciones “antes” y “después” de la instalación de la barrera, logrando resultados de atenuación mayores que los medidos *in situ*.

## ABSTRACT

This work presents tools for the evaluation of one of the most important mitigation measure used in highways for noise control: the sound barrier.

The thesis presents an introduction to the concept of sound barriers and the different parameters and variables used in the study of this matter.

Then, the characteristics of the highway as a sound source and the factors that impact in the propagation of its acoustic emission will be shown. The variables related with the acoustic propagation outdoor will be also discussed in this section.

Next the theory of sound barriers will be discussed. In this section the algorithms used in evaluating the insertion loss of the barrier, design considerations and construction, types of barriers and standards will be shown.

Finally, the experimental part will show a measurement method for the sound barrier performance. The insertion loss of a barrier installed in the Itata highway (North Access to Concepción), VIII region, will be analyzed slightly smaller results of attenuation than those given by the contrasted algorithms Maekawa, Kurze-Anderson, ISO 9613, Rathé and Tatge were found. On the other hand, using the sound prediction software SoundPLAN™, noise maps corresponding to the situations “before” and “after” of the installation of the barrier were made, achieving results of attenuation higher than those measured for in situ conditions.

## 2. INTRODUCCIÓN

Debido al inminente crecimiento del ruido de tráfico en los últimos años y al aumento de las zonas habitadas cerca de las grandes autopistas, es necesario generar un apantallamiento acústico en zonas en que el nivel de ruido excede lo permitido.

La instalación de barreras acústicas en los países desarrollados ha sido utilizada ampliamente como una forma de control de ruido en la etapa de propagación. Esta necesidad ha llevado a los centros de investigación o a entidades gubernamentales, a desarrollar el tema con miras a la optimización de estos dispositivos y la estandarización de su uso. Se destacan en este ámbito las autoridades mediante la creación de exigencias tanto de eficiencia acústica como de carácter constructivo y la comunidad científica en el desarrollo de nuevos diseños.

Los tipos de publicaciones científicas basadas en la difracción y la atenuación de los niveles de ruido usando barreras acústicas se pueden dividir en tres grupos:

- Estudios teóricos.
- Experimentación usando modelos a escala.
- Experimentación con barreras full escala *in situ*.

Mientras los estudios teóricos han permitido modelar matemática y físicamente el problema, la experimentación usando modelos a escala entrega un primer paso mediante el ensayo de distintos diseños, con un mejor manejo de variables dentro de un laboratorio.

Sin embargo, es muy difícil reproducir las condiciones ambientales naturales, por lo que la experimentación con barreras full escala *in situ* se convierte en un factor determinante. En este tipo de experimentación, países como Japón, Inglaterra y Canadá han realizado la mayor cantidad de pruebas, contrastando sus resultados con modelos matemáticos y ensayos en laboratorio.

Por otra parte, la creación de medidas de mitigación acordes al entorno ambiental, juega un rol muy importante en la decisión de la instalación de una barrera acústica. Por lo que el complemento de las distintas variables, físicas y paisajísticas involucradas en esta problemática, podrá integrar una óptima solución de control de niveles de ruido de tráfico para finalmente mejorar la calidad de vida.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivos generales**

- Analizar la utilización de barreras acústicas como elemento mitigador de niveles de ruido en carreteras.
- Estudiar el comportamiento de un frente de onda ante la interrupción de su propagación libre mediante un obstáculo.
- Realizar una contrastación de la teoría planteada y los resultados obtenidos a través de una medición en terreno.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Apuntando al desarrollo de lo planteado anteriormente, los objetivos específicos son:

- Investigar los conceptos y principales trabajos de barreras acústicas.
- Analizar los algoritmos comprometidos en la predicción sonora de pérdida de inserción y el modelamiento matemático de la difracción sonora.
- Clasificar los tipos de barreras acústicas y estudiar los requerimientos de diseño y construcción.
- Revisar la normativa internacional relacionada.
- Medir la pérdida de inserción de la barrera acústica instalada en la Autopista del Itata.
- Comparar los resultados de pérdida de inserción obtenidos mediante los algoritmos teóricos de predicción y las mediciones en terreno.
- Realizar una modelación sonora de la situación “antes” y después” de la instalación de la barrera, a través del software SoundPLAN™ versión Windows y DOS.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Teoría de la generación y propagación del ruido de tráfico

#### 4.1.1 Propagación de un segmento de carretera homogéneo [1]

Se consideran las siguientes suposiciones:

1. El ruido de un vehículo se origina desde un punto localizado sobre una superficie reflectante dura. Se determina que esta fuente S se mueve con una velocidad  $V$  y tiene una localización  $x(t)$  conocida en el espacio. No se toma en cuenta el tiempo de propagación entre la fuente y el receptor.
2. Se asume que la atenuación del nivel de ruido es debida sólo a la distancia que existe entre la fuente y el punto receptor y no se toman en cuenta otros efectos de atenuación sonora.
3. Se asume que no existe interferencia destructiva o constructiva, producto de la interacción de las ondas directa y reflejada.

Dadas estas suposiciones, la presión sonora cuadrática media medida a una distancia  $r$  puede ser relacionada a la potencia  $W$  de la fuente mediante la fórmula:

$$p^2(t) = DF(q, j) W(t) / 2\pi r^2(t) \quad \text{Ec. 4.1}$$

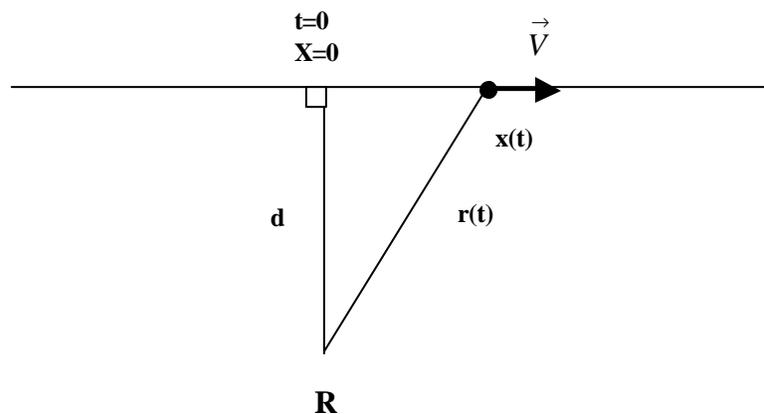


Figura 4.1. Propagación sonora de un segmento de carretera.

Donde

$r_c$  es la impedancia característica del aire.

$DF(\mathbf{q}, \mathbf{j})$  define la directividad de radiación de la fuente.

## 4.2 Fuentes de ruido de vehículos [1]

Las fuentes de ruido de un vehículo han sido identificadas como:

- Unidad de potencia (motor, entrada y escape de aire)
- Ventilador
- Transmisión (engranaje y eje trasero)
- Ruido de rodadura (aerodinámico y contacto neumático calzada)
- Frenos
- Ruido de carrocería y carga

La importancia de estas fuentes sonoras depende principalmente del tipo de vehículo y las condiciones de operación. Para vehículos livianos el ruido producido por el motor es predominante en zonas de baja velocidad, mientras tanto que en zonas de alta velocidad el ruido producido por el contacto neumático calzada es tanto o más importante que el producido por el motor. Se define el límite de velocidad alta y baja en los 50-60 km/h.

Sin embargo para vehículos pesados de motor diesel, el motor, el ventilador y el tubo de escape son las fuentes principales de ruido en la mayoría de las operaciones, aunque el ruido de rodadura sobre la superficie de la carretera es significativo en zona de alta velocidad, particularmente con neumáticos de tracción.

### 4.2.1 Comparación del ruido generado por rodadura y potencia

Para ambas categorías de vehículos el nivel de ruido de rodadura incrementa 9 dB(A) al doblar la velocidad.

La Tabla 4.1 resume los niveles de ruido generados debido a la potencia o a la rodadura en las distintas categorías de vehículos, para distintas velocidades.

Velocidad (Km/h)	Categoría de vehículo	Ruido de rodadura dB(A)	Ruido de potencia dB(A)	Ruido total dB(A)
20	pesado*	61	78	78
	liviano	58	64	65
80	pesado	79	85	86
	liviano	76	74	78

**Tabla 4.1. Comparación entre niveles de ruido generados por rodadura y potencia.**

La Tabla 4.2 da un ejemplo de la magnitud de lo que aporta cada fuente de ruido para un vehículo pesado a una velocidad estable de aproximadamente 50 Km/h.

Escape	Motor y transmisión	Ventilador	Entrada de aire	Rodadura
82	90	78	70	70

**Tabla 4.2. Niveles de ruido dB(A) de un típico vehículo pesado medidos a 7.5 m.**

Una distribución similar se muestra en la Tabla 4.3, pero esta vez las fuentes sonoras fueron las de un vehículo liviano.

Escape	Motor y transmisión	Ventilador	Entrada de aire	Rodadura
74	84	65	65	68

**Tabla 4.3. Niveles de ruido dB(A) de un típico vehículo liviano medidos a 7.5 m.**

\* Vehículos pesados son los que tienen un peso > 1525 Kg

El nivel de presión sonora que se obtiene al sumar energéticamente todas las fuentes de ambos tipos de vehículos, es distinto al medido debido al efecto de pantalla que produce la carrocería y las reflexiones en la superficie de la carretera. Por ejemplo, en el caso del vehículo pesado de motor diesel, la suma energética da un total de 91 dB(A), mientras que el nivel medido a 7.5 m fue de 89 dB(A). Lo mismo ocurrió con el vehículo liviano en el que la suma energética de los niveles de las fuentes mostradas en la tabla da un valor de 85 dB(A), mientras que el nivel medido a 7.5 m fue sólo 79 dB(A).

En la circulación en carretera el ruido neumático/calzada se torna predominante, ya que mientras el ruido debido al motor se hace constante e independiente de la velocidad (en una marcha adecuada), el ruido neumático/calzada aumenta entre 8 y 12 dB(A) cada vez que la velocidad se dobla. Esto hace que a velocidades en torno a los 50-60 km/h la principal fuente de ruido sea la rodadura, que pasa a ser la causante total del ruido emitido por un vehículo a velocidades superiores a 70-80 km/h [2].

### **4.3 Factores que afectan a la generación del ruido de tráfico [1]**

Los niveles de ruido generados por el ruido de tráfico dependen en gran medida del tipo de flujo de vehículos, el volumen de tráfico, la velocidad, el gradiente de la carretera y la superficie de la carretera.

#### **4.3.1 Flujo vehicular**

Para un amplio rango de flujo de tráfico, las variaciones de los niveles de ruido con el flujo vehicular,  $Q$ , pueden ser representadas por la relación logarítmica:

$$L = C \log_{10} Q, \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde  $C$  es una constante.

Los modelos teóricos basados en los conceptos de fuente lineal y puntual, indican que el valor de la constante  $C$  debe tomar el valor 10. Con este valor, el incremento de nivel por cada vez que se dobla el flujo vehicular es de 3 dB(A).

### 4.3.2 Velocidad media y porcentaje de vehículos pesados

Se distinguen dos regiones de velocidad:

- Bajo 50-60 km/h, donde las condiciones de flujo son interrumpidas.
- Sobre 50-60 km/h, donde la mayoría de los conductores está en condiciones de flujo libre.

Dentro de las zonas de menor velocidad hay evidencia que el nivel de ruido promedio es independiente de la velocidad de tráfico.

En la región de flujo libre, la mayoría de los modelos de predicción han adoptado la siguiente expresión:

$$L = B \log_{10} V, \quad \text{Ec. 4.3}$$

donde B es una constante. La forma logarítmica de esta expresión, se justifica porque la mayoría de las fuentes de ruido existentes en un vehículo tienen una relación logarítmica con la velocidad lineal o angular del motor.

### 4.3.3 Gradiente de la carretera

Otro factor que incide en la emisión de niveles de ruido es el gradiente de la carretera. Johnson y Saunders [3], concluyeron que el efecto de gradiente depende especialmente del porcentaje de vehículos pesados. En sus estudios estimaron que existe un incremento de 4 dB(A) en los niveles de ruido para una condición de gradiente de 1 en 8.

### 4.3.4 Superficie de la carretera

La textura de la superficie de la carretera afecta los niveles de ruido generados porque controla la interacción neumático calzada.

En la percepción del ruido neumático calzada existen dos acciones que influyen en la emisión:

#### 4.3.4.1 Generación

*Vibraciones radiales:* Debidas a las irregularidades que presenta la superficie de rodamiento y al impacto del relieve del neumático sobre la calzada. Estas vibraciones al ser transmitidas por la suspensión del vehículo, generan fenómenos de resonancia en el interior y exterior del vehículo.

*Mecanismos de resonancia de aire:* Se producen mecanismos de resonancia en las cavidades presentes en la carretera y el neumático, debido a la compresión de aire que se almacena en éstas.

*Mecanismos de adhesión:* Debido a la adherencia en la secuencia contacto-separación que se produce entre el caucho y el pavimento. Este contacto entre las dos superficies genera las vibraciones tangenciales.

#### 4.3.4.2 Propagación

*El efecto Horn (bocina) o diedro:* Este efecto resulta de la reflexión de las ondas sonoras que se producen entre el volumen curvado del neumático y el pavimento, delante y detrás de las zonas de contacto. Formando así algo parecido a una bocina que amplifica el sonido exponencialmente. Aprovechando las características de absorción acústica de los pavimentos, en la propagación del ruido neumático - calzada se pueden controlar tres efectos:

- Reducción de la amplificación del efecto Horn y la absorción del ruido emitido por las fuentes mecánicas.
- Reducción de la reflexión de las ondas sonoras entre la parte inferior del vehículo y la capa de rodadura de la calzada.
- Absorción de ondas generadas por el ruido neumático-calzada y que se propagan en el espacio que hay entre la fuente y el receptor.

## 4.4 Propagación en campo libre

La norma ISO 9613-2 especifica un método de ingeniería para el cálculo de la atenuación de la propagación sonora en exteriores para predecir los niveles de ruido a una distancia determinada. [4]

### 4.4.1 Ecuación básica

Esta ecuación determina el nivel de presión sonora continuo equivalente en el receptor,  $L_{fT}(DW)$ , para una fuente puntual.

$$L_{fT}(DW) = L_w + D_c - A, \quad \text{Ec. 4.4}$$

donde  $L_w$  es el nivel de potencia sonora por banda de octava, en decibeles, producida por una fuente puntual relativa a una potencia sonora de referencia de 1 picowatt (1pw),  $D_c$  es la corrección de directividad, en decibeles, la desviación del nivel de potencia con respecto a una fuente omnidireccional (toma el valor 0 para una fuente omnidireccional en campo libre), y  $A$  es la atenuación por banda de octava en decibeles, que ocurre durante la propagación de la fuente al receptor.

La atenuación por banda de octava está dada por:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}. \quad \text{Ec. 4.5}$$

### 4.4.2 Divergencia geométrica ( $A_{div}$ )

Corresponde a la propagación de un frente de onda esférico en campo libre desde una fuente puntual.

$$A_{div} = \left[ 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] dB, \quad \text{Ec. 4.6}$$

donde  $d$  es la distancia desde la fuente al receptor, en metros y  $d_0$  es la distancia de referencia (=1m).

#### 4.4.3 Absorción atmosférica ( $A_{atm}$ )

Es la atenuación debido a la absorción atmosférica, en decibeles, dada por la ecuación:

$$A_{atm} = \mathbf{a}d / 1000, \quad \text{Ec. 4.7}$$

donde  $\mathbf{a}$  es el coeficiente de atenuación atmosférico en decibeles por kilómetro, en cada frecuencia central de banda de octava.

#### 4.4.4 Efecto suelo ( $A_{gr}$ )

El Standard ISO 9613-2 determina 2 métodos para el cálculo de esta atenuación:

##### 4.4.4.1 Método general de cálculo

La curvatura de la propagación asegura que la atenuación es determinada prioritariamente por las superficies cerca de la fuente y el receptor. Se distinguen las siguientes zonas:

- La región de la fuente que se extiende desde la fuente hacia el receptor una distancia de  $30h_s$ , donde  $h_s$  es la altura de la fuente. Esta zona tiene un máximo de distancia de  $d_p$  que es la distancia desde la fuente al receptor.
- La región del receptor, que se extiende desde el receptor hacia la fuente una distancia de  $30h_r$ , donde  $h_r$  es la altura del receptor. Esta zona tiene un máximo de distancia de  $d_p$ .
- La región media, que se extiende entre la fuente y el receptor si se cumple la condición que  $d_p < (30h_s + 30h_r)$ .

Las regiones antes mencionadas se muestran en la Figura 4.2.

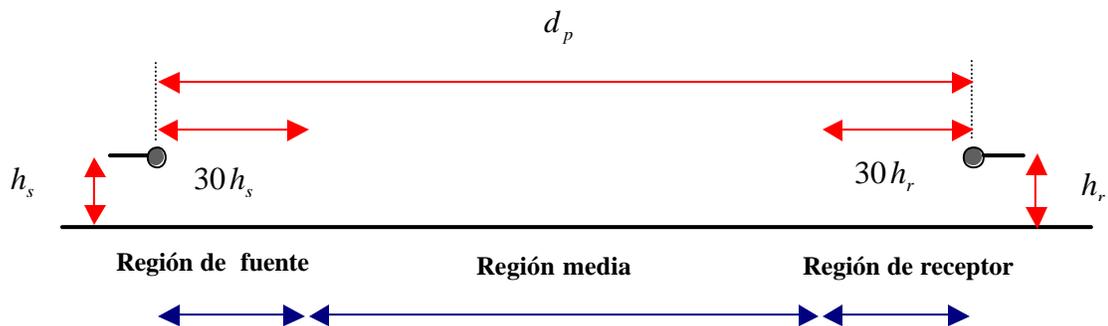


Figura 4.2. Regiones para la determinación de efecto suelo.

Las propiedades acústicas de cada zona, se describen a través del factor de suelo  $G$  en las siguientes categorías:

- Suelo duro,  $G=0$ .
- Suelo poroso,  $G=1$ .
- Suelo mixto,  $G$  toma valores entre 0 y 1.

Calculando, mediante las expresiones estipuladas en la Norma ISO, se obtienen los coeficientes  $G_s$ ,  $G_r$  y  $G_m$ , los que a su vez permitirán calcular las atenuaciones de cada zona, que en conjunto dan la atenuación por efecto suelo, esto es

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m . \quad \text{Ec. 4.8}$$

#### 4.4.4.2 Método alternativo

Bajo las siguientes condiciones:

- Interesa sólo el nivel de presión sonora ponderado  $A$  en el receptor.
- La propagación sonora ocurre sobre suelo poroso o mixto.
- El sonido no es un tono puro.

Se puede calcular la atenuación sonora por efecto suelo mediante la ecuación:

$$A_{gr} = 4.8 - (2h_m / d) [17 + (300 / d)] \geq 0dB, \quad \text{Ec. 4.9}$$

donde  $h_m$  es la altura media del camino de propagación sobre el suelo, en metros, y  $d$  es la distancia desde la fuente al receptor, en metros.

#### 4.4.5 Efectos de las condiciones atmosféricas [1] [5]

Cuando se hacen consideraciones de propagación en campo libre, se suele suponer que el medio en el que se propaga la onda es homogéneo. Sin embargo, la atmósfera es un medio que no cumple dichas propiedades. Las características de la atmósfera como medio en el que se propaga una onda acústica dependen fundamentalmente de las distribuciones espaciales de temperatura y de la velocidad del viento. La variación de la velocidad media del viento en función de la altura en la proximidad del suelo y para un terreno llano y abierto, se puede aproximar mediante la expresión:

$$v_m = k_v \log \frac{h}{h_0}, \quad \text{Ec. 4.10}$$

donde  $h_0$  es la altura a partir de la cual la expresión es válida y está determinada por características como la rugosidad del suelo y generalmente es igual a la altura del obstáculo (matorrales, hierba, etc.) más abundante. La constante  $k_v$  está determinada por la rugosidad de la superficie del suelo y por la velocidad del viento en la zona donde la expresión deja de tener validez, generalmente a una altura no superior a los 10 m. Esta expresión logarítmica es debida a la resistencia viscosa de la superficie, y la zona en la cual es válida se llama capa de frontera viscosa (Viscous boundary layer).

La variación de la temperatura debido a la altura en la proximidad del suelo plano, se representa mediante la siguiente expresión:

$$T = T_0 - K_t \log \frac{h}{h_0}, \quad \text{Ec. 4.11}$$

donde  $T_0$  es la temperatura para  $h \ll h_0$ . Esta expresión está dada para una capa que generalmente tiene una altura similar a la de la capa de frontera viscosa antes mencionada.

Tanto las variaciones de la velocidad del viento como de la temperatura, producen variaciones en la densidad del aire y direcciones favorables a la propagación de la onda acústica. La temperatura es una magnitud escalar, por lo tanto, la refracción que produce sobre la onda sonora es igual en todas direcciones. En cambio, la velocidad del viento es una magnitud vectorial por lo que la refracción que produce no es uniforme con la dirección y depende de la dirección de propagación.

La refracción actúa de la siguiente manera: cuando la velocidad del sonido aumenta con la altura, los rayos sonoros se curvan hacia abajo y es el caso de una *inversión térmica*<sup>1</sup> o un viento en sentido descendente. Cuando la velocidad del sonido disminuye con la altura los rayos sonoros se curvan hacia arriba y es el caso de un *lapsos*<sup>2</sup> o viento en sentido ascendente. En este último caso se produce una zona de sombra que no es accesible por el campo acústico, a no ser que se produzcan difracciones con los objetos presentes. Las zonas de sombra generadas por factores meteorológicos, generalmente no afectan la propagación del ruido de tráfico a cortas distancias de la carretera, que es donde ocurren los problemas más severos de ruido en la comunidad. Pero la curvatura de la onda sonora modifica la altura media del camino de propagación entre la fuente y el receptor sobre el suelo, lo cual puede tener efectos significativos en la atenuación de los niveles de ruido mediante una barrera.

En el caso en que la refracción sonora curva los rayos hacia abajo, el ángulo con que inciden las ondas acústicas sobre el suelo aumenta. Esto reduce los cambios de fase en la reflexión y por ende, la interferencia destructiva entre la onda reflejada y la onda directa, aumentando así los niveles de presión sonora a una distancia dada. En este modelo se pueden dar aumentos en el nivel de presión sonora de hasta 1.5 dB para suelos típicos de hierba.

En los fenómenos descritos anteriormente se ha supuesto que la velocidad del sonido es constante o que al menos su variación es constante en el tiempo. Sin embargo, en la práctica la atmósfera es un medio muy inestable en el que se producen turbulencias que se generan por el paso del viento

<sup>1</sup> Condición meteorológica en la cual la temperatura aumenta con la altura.

<sup>2</sup> Condición meteorológica en que la temperatura disminuye con la altura.

a través de obstáculos o por gradientes de temperatura y viento. Estos flujos turbulentos se deshacen en remolinos más pequeños, transformándose finalmente en energía calórica mediante su disipación en el aire.

Las turbulencias atmosféricas producen fluctuaciones en la amplitud y la fase de los tonos puros durante su propagación. La interferencia destructiva entre la onda directa y reflejada también se ve afectada por las turbulencias atmosféricas, donde los mínimos se ven suavizados por este fenómeno.

#### 4.4.6 Reflexiones y difusión

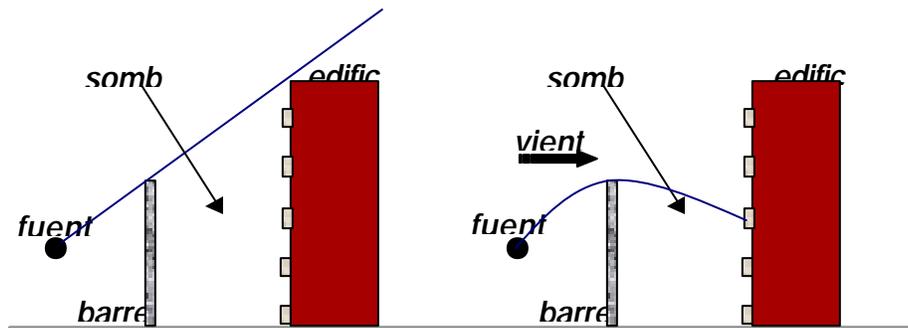
En áreas urbanas la presencia de edificios cercanos a la carretera crean distintos fenómenos en la propagación sonora. Entre ellos están los fenómenos de reflexión múltiple, difusión y difracción entre las fachadas de los edificios. Estos son los mismos fenómenos que ocurren al interceptar la propagación de la onda sonora mediante la instalación de barreras acústicas paralelas a ambos lados de la carretera.

Las fachadas de los edificios pueden actuar como espejos, en el cual la onda sonora es reflejada con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia, para longitudes de onda mayores que las dimensiones de la textura en la fachada. Se puede caracterizar con un coeficiente de absorción  $\alpha = 0.1$  a una fachada de un edificio, aunque generalmente se aproxima a cero, es decir, toda la energía es reflejada. La fuente imagen creada especularmente es simétrica respecto de la fuente primaria, y es incluida como fuente adicional para los propósitos de cálculo de niveles de ruido.

El fenómeno de difusión de la onda incidente puede ocurrir cuando la longitud de onda es del mismo orden que la rugosidad de la superficie. Luego la energía es reflejada y esparcida en todas direcciones homogéneamente.

#### 4.4.7 Influencia del viento en barreras [6]

En la propagación sonora en exteriores, el viento se transforma en un parámetro importante para la evaluación de la efectividad de los elementos mitigadores. Es así como el viento puede causar una curvatura en la zona de sombra, que es la zona protegida acústicamente por el obstáculo, efecto llamado refracción. De esta manera el viento reduce al tamaño de la sombra sonora como lo muestra la siguiente figura:



**Figura 4.3. Zona de sombra con y sin influencia del viento.**

Detrás de la barrera no hay presencia de viento, mientras que sobre ésta existe la mayor cantidad de viento, lo cuál produce una reducción adicional de la zona de sombra tras la barrera acústica. Experimentos en túneles de viento, han mostrado que los niveles de presión sonora tras la barrera pueden diferir en 10 dB en una situación con viento o sin viento. Esto se traduce en que existen puntos de recepción que en la situación sin viento pertenecen a la zona de sombra, mientras que en la situación con viento pertenecen a la zona de brillo.

## 4.5 Teoría de barreras

Una barrera acústica es cualquier objeto, de tamaño considerable respecto a la longitud de onda, que obstaculiza la trayectoria recta de la propagación sonora entre una fuente acústica y un receptor, como podría ser incluso el mismo relieve del terreno cuando está lo suficientemente elevado como para interrumpir la propagación sonora [7].

Los fenómenos que se producen al interceptar el camino de la onda acústica con la inserción de una barrera acústica son:

- Parte de la energía de la onda acústica se refleja en la superficie de la barrera.
- Parte de la energía no reflejada se transforma en calor al ser absorbida por la barrera.
- Parte de la energía no reflejada se transmite a través de la barrera.
- Parte de la energía se difracta por los bordes superior y laterales.

Se debe considerar que la transmisión de la onda acústica a través de la barrera sea despreciable comparado con la difracción por los bordes. Incluso en algunos países es motivo de regulación normalizar una diferencia mínima entre los niveles existentes por concepto de transmisión y difracción sonora.

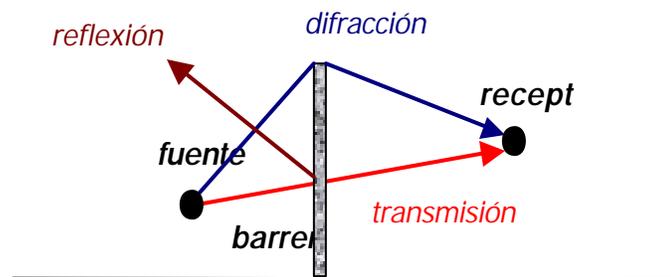


Figura 4.4. Caminos recorridos por una onda acústica ante un obstáculo vertical.

La zona protegida acústicamente por la barrera, se denomina zona de sombra, y la atenuación que proporciona, denominada *pérdida de inserción*, es la disminución del nivel de presión sonora en el punto o zona considerada por la interposición de la barrera, respecto al nivel existente antes de su instalación, siendo sus valores habitualmente positivos para la emisión de ruido aleatorio.

La definición de la pérdida por inserción de una barrera acústica viene dada por la expresión:

$$IL = 10 \log \frac{(P_{dir})^2}{(P_{dif})^2}, \quad \text{Ec. 4.12}$$

donde  $P_{dir}$  es la presión sonora en el receptor antes de la instalación de la barrera y  $P_{dif}$  es la presión sonora en el receptor después de la instalación de la barrera.

De otra forma:

$$IL = NPS_{directo} - NPS_{difractado}, \quad \text{Ec. 4.13}$$

donde  $NPS_{directo}$  es el Nivel de Presión Sonora en el receptor antes de la instalación de la barrera y  $NPS_{difractado}$  es el Nivel de Presión Sonora después de la instalación de la barrera.

Luego, la pérdida de inserción queda definido como la diferencia entre el Nivel de Presión Sonora obtenido en ausencia de la barrera acústica,  $NPS_{directo}$ , y el obtenido en su presencia,  $NPS_{difractado}$ .

## 4.6 Investigaciones sobre barreras acústicas

Originalmente, la teoría de la difracción fue desarrollada en óptica y luego fue aplicada a la problemática acústica. En la década de los 50, Joseph B. Keller desarrolla la teoría óptica geométrica para encontrar la solución al fenómeno de difracción. Al igual que en la teoría geométrica clásica de la difracción, supone que la señal se propaga a lo largo de líneas (rectas o curvas) perpendiculares a los frentes de onda, llamados rayos. Los rayos difractados se generan cuando los rayos procedentes de una fuente se ven obstaculizados en su propagación por una arista, esquina o vértice. Para esto Keller introduce nuevas leyes que son similares a las ya existentes para la reflexión y se pueden deducir a partir del principio de Fermat.

Una vez que se crea el rayo difractado, su comportamiento es el mismo que el de otro rayo cualquiera, de tal manera que se generan nuevos frentes de ondas que se rigen por todos los principios fundamentales de la teoría geométrica.

Entre los métodos más simples de cálculo de la atenuación introducida por la barrera plana seminfinita en condiciones de campo libre, se encuentran los ábacos de Redfearn (1940) y Maekawa (1965).

Redfearn [8] elaboró un ábaco en el que la atenuación viene dada en función de la distancia desde el borde de la barrera a la recta que une la fuente con el receptor ( $h$ ), tomando como parámetro el ángulo difractado  $\theta$  que se forma entre el rayo que va desde la fuente al borde superior de la barrera y el rayo que va desde el borde superior al receptor. El ábaco de Redfearn se muestra en la Figura 4.5.

Este ábaco contiene los ingredientes principales del proceso: la eficiencia de una barrera es diferente en cada punto de observación, de emisión y depende de la frecuencia.

Sin embargo, presenta los siguientes inconvenientes: Está definido a partir de un estudio de una barrera acústica de altura seminfinita y longitud infinita. Además este método es solo válido si la fuente y el receptor se encuentran en un plano vertical perpendicular a la barrera, y si la fuente y el receptor distan en más de una longitud de onda de la barrera. [5]

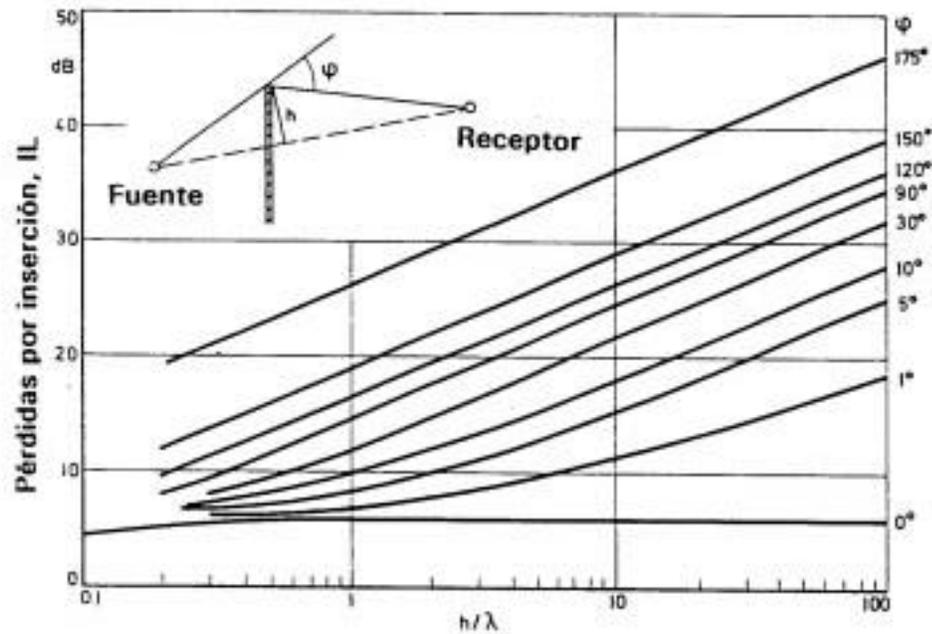


Figura 4.5. Ábaco de Redfearn.

En 1965, Maekawa [9] propuso un método de cálculo de reducción sonora debido a una barrera acústica a través de una teoría aproximada de la difracción óptica bajo condiciones simples. Su estudio se basó en datos experimentales de difracción sonora con una barrera plana seminfinita en campo libre.

Utilizó un pulso tonal de una duración suficientemente corta para distinguir la señal reflejada y retardada, por lo tanto no hubo influencia de otras superficies.

En la zona de sombra, midió los niveles de presión sonora en varios puntos y sus resultados se muestran en una sola curva de atenuación sonora versus el parámetro adimensional Número de Fresnel  $N$ .

El Número de Fresnel está definido como:

$$N = \frac{2d}{l}, \quad \text{Ec. 4.14}$$

donde  $d$  es la diferencia de camino que existe entre S y R con y sin la interposición de la barrera, y  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda estudiada. Este es el método más simple y de confiables resultados para el cálculo de difracción sonora con la mejor aproximación. El ábaco de Maekawa se muestra en la Figura 4.6.

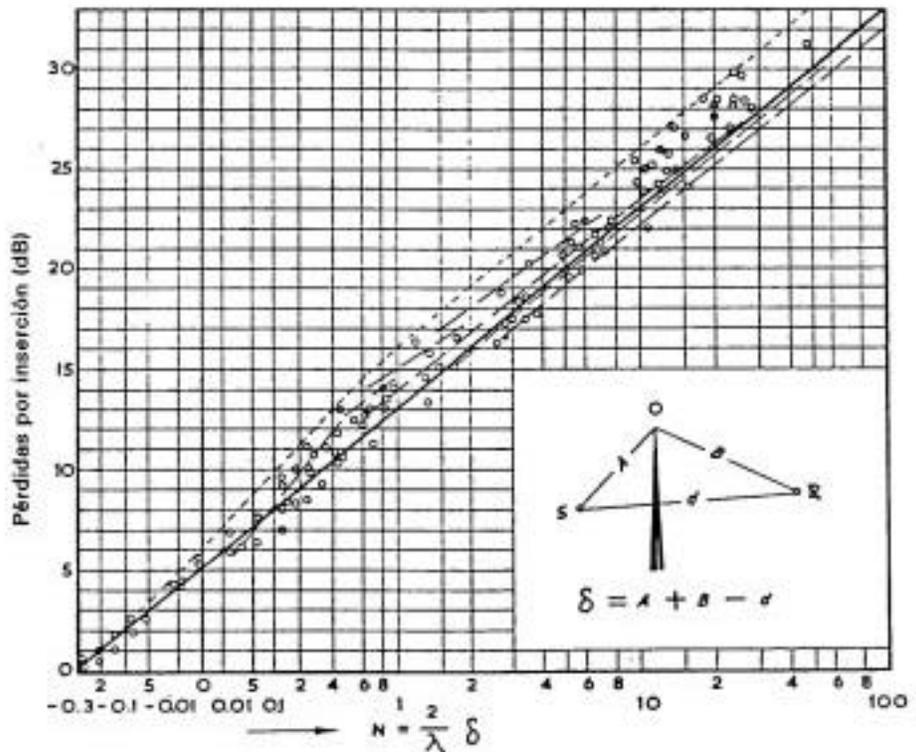
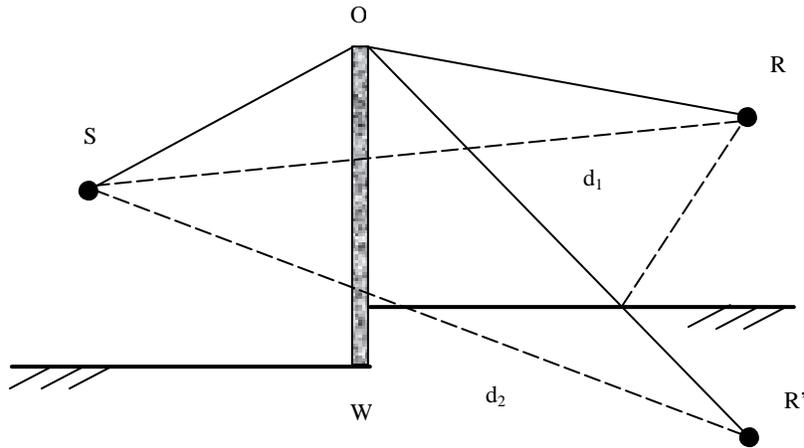


Figura 4.6. Ábaco de Maekawa. Trabajo de Redfearn, ---; Trabajo de Maekawa, —; Teoría de Kirchhoff, ---; o valores experimentales medidos por pulsos.

Dependiendo si  $N > 0$  o  $N < 0$ , el punto receptor R cae en la zona de brillo o la zona de sombra, respectivamente. En este ábaco sus resultados son comparados con el de otros investigadores; Como se aprecia en el gráfico, los resultados generalmente son más bajos que los de la teoría de Kirchhoff. Sin embargo tiene un buen grado de concordancia con los resultados de la teoría de Redfearn.

Este método tiene gran aceptación y se obtienen buenos resultados al utilizarse en aquellos casos en que el receptor no se ve afectado por las reflexiones del sonido difractado por el borde de la barrera, que ocurren en el suelo.

Para esto, Maekawa propuso otro método en el cuál las reflexiones sonoras provenientes del suelo fueron también consideradas.



**Figura 4.7. Sección de la barrera interpuesta entre la fuente S y el punto receptor R.**

El nivel de presión sonora  $L_0$  en el punto O, del borde superior de la barrera, es el nivel de referencia para cualquier punto de la zona de sombra.

La atenuación, debido a la difracción del rayo en el borde superior de la barrera, denotada por  $L_1$  dB se puede obtener del ábaco de Maekawa. Para esto se debe calcular el número de Fresnel de la siguiente forma:

$$N_1 = d_1 * \frac{2}{l} , \quad \text{donde } d_1 = (\overline{SO} + \overline{OR} - d_1) \quad \text{Ec. 4.15}$$

El efecto de reflexión en el suelo se calcula aplicando el mismo método para un punto  $R'$ , que es la imagen del punto receptor R, asumiendo una reflexión especular perfecta. La atenuación sonora  $L_2$  en  $R'$  se obtiene del ábaco de Maekawa con la variable:

$$N_2 = d_2 * \frac{2}{l} , \quad \text{donde } d_2 = (\overline{SO} + \overline{OR'} - d_2) \quad \text{Ec. 4.16}$$

Los valores negativos de las atenuaciones  $L_1$  y  $L_2$  se suman para obtener una atenuación  $L_3$ .

El nivel de presión sonora  $L$  en el punto receptor  $R$ , después de la instalación de la barrera se obtiene de las formulas:

1) Para el caso en que  $S$  es una fuente puntual,

$$L = (L_0 - 20 \log_{10} \frac{d_1}{SO}) - L_3 dB, \quad \text{Ec. 4.17}$$

2) Para el caso en que  $S$  es una fuente lineal, por ejemplo una carretera,

$$L = (L_0 - 10 \log_{10} \frac{d_1}{SO}) - L_3 dB, \quad \text{Ec. 4.18}$$

3) El efecto de protección de la barrera se debe obtener mediante la expresión:

$$(L_p - L) dB, \quad \text{Ec. 4.19}$$

donde  $L_p$  es el valor medido de nivel de presión sonora en el punto receptor  $R$  antes de que la barrera sea instalada.

En el comienzo cuando se determina la posición del punto  $O$ , se requiere que la distribución sonora vertical a lo largo de la línea  $WO$  sea medida lo mas alto posible. Esto permite que la posición del punto  $O$  tenga mayor altura que el punto de mayor nivel de presión sonora en el plano de la barrera. Así se evita la condición limitante de la aplicación de este cálculo, la cual es que el nivel de presión sonora decae gradualmente en la línea vertical sobre el borde superior de la barrera.

## 4.7 Cálculos de una barrera acústica finita

Si la longitud de la barrera seminfinita en el espacio libre es acotada por ambos lados, la superficie debería ser dividida en tres zonas para su posterior estudio: A, B y C.

La zona A es la mitad del plano infinito, mientras que las zonas B y C son un cuarto de la zona infinita.

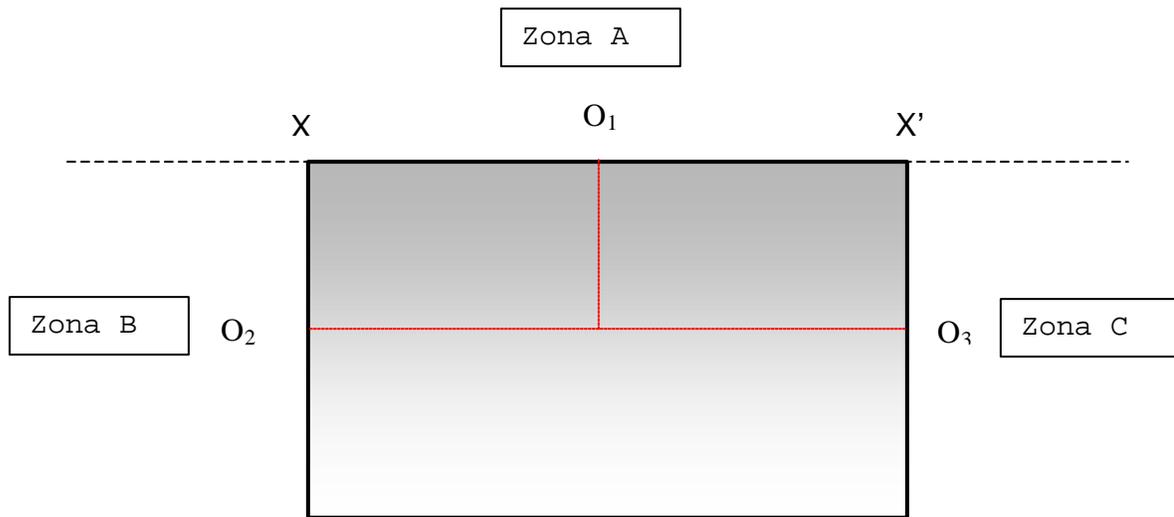


Figura 4.8. Descripción de las zonas alrededor de la barrera finita.

Las atenuaciones proporcionadas por cada zona se obtienen:

- La atenuación de la zona A (borde superior de la barrera) se obtiene del ábaco de Maekawa.
- La atenuación de las zonas B y C (bordes laterales de la barrera) se estima a partir de la fórmula derivada de la teoría de la difracción de Kirchhoff.

Aunque  $\overline{SR}$  no es perpendicular a la barrera, no es necesario considerar los efectos del ángulo de incidencia.

La contribución de cada zona es calculada independientemente de acuerdo a los niveles de presión sonora en los puntos  $O_1$ ,  $O_2$  y  $O_3$  en los bordes de la barrera, conectando S y R.

Para obtener la atenuación final se debe seguir los siguientes pasos:

1) Para obtener la contribución de la zona A, denominada como  $L_A$ , después de calcular la variable del número de Fresnel mediante:

$$N_1 = d_1 \frac{2}{l} \quad \text{con el valor de} \quad d_1 = (\overline{SO_1} + \overline{O_1R} - \overline{SR}), \quad \text{Ec. 4.20}$$

se extrae del ábaco de Maekawa la atenuación  $N_1$ . Luego el valor de la atenuación de la zona A,  $L_A$  es:

$$L_A = 20 \log_{10} \left( \frac{SO_1}{SR} \right) - [N_1] dB. \quad \text{Ec. 4.21}$$

2) Para obtener la atenuación proporcionada por la zona B, se procede de la misma forma que para  $L_A$ . Se calcula  $N_2$  y el resultado de su atenuación es extraído del ábaco de Maekawa. Se utiliza también  $N_1$ , que es conocido del punto anterior. La atenuación  $L_B$  viene dada por:

$$L_B = 20 \log_{10} \left( \frac{SO_2}{SR} \right) - \{[N_2] + [-N_1]\} dB. \quad \text{Ec. 4.22}$$

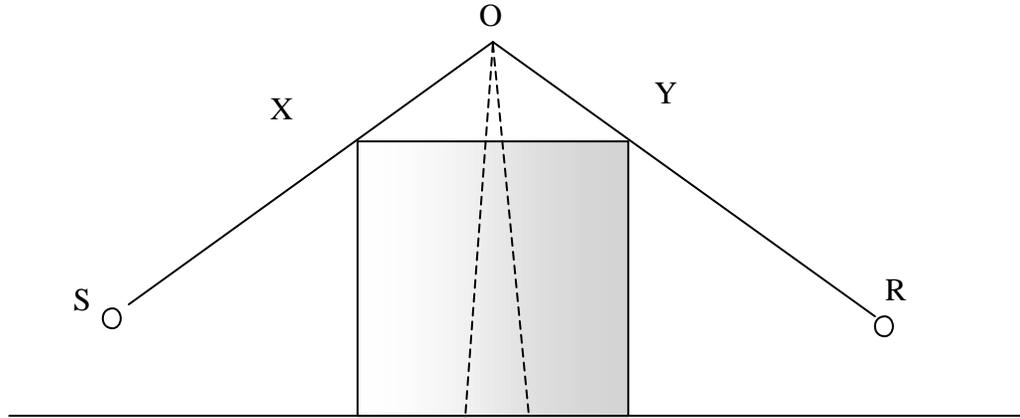
3) De igual forma, para la zona C, el valor de  $L_C$  es:

$$L_C = 20 \log_{10} \left( \frac{SO_3}{SR} \right) - \{[N_3] + [-N_1]\} dB. \quad \text{Ec. 4.23}$$

El sonido difractado directamente en el receptor, sin tomar en cuenta el efecto del suelo, es la superposición de  $L_A$ ,  $L_B$  y  $L_C$ . La superposición es la suma energética de éstos.

En el método descrito anteriormente, la pérdida de transmisión sonora a través de la barrera no es considerada. Sin embargo, debemos considerar el material de la barrera, donde la pérdida de transmisión debe ser mayor que la reducción por difracción.

La teoría de la difracción sonora, desde la cuál se ha derivado el método de cálculo, asume un borde delgado en la cumbrera de la barrera. Sin embargo, el grosor de la barrera tiende a incrementar la reducción sonora, de acuerdo a resultados experimentales [9].



**Figura 4.9. Aproximación de un edificio a una barrera simple.**

En la Figura 4.9, el grosor XY del edificio, se considera cuando es mayor que la longitud de onda de la frecuencia considerada. Cuando XY es mayor que la longitud de onda, el edificio es reemplazado por una barrera delgada simple, cuyo borde superior está en el punto O, como lo muestra la figura. Este método fue propuesto por Maekawa el año 1968 y corregido por Pierce el año 1974, sugiriendo una técnica alternativa denominada *three sided-barrier* [10].

#### 4.8 Difracción de ondas esféricas

Kurze y Anderson en los años 70 desarrollaron una expresión para la pérdida de inserción de una barrera acústica, en un campo acústico creado por una onda esférica. Este trabajo se realiza en un plano tridimensional [11].

El número de Fresnel, como se definió anteriormente en la Ec. 4.14, está determinado por la diferencia del camino recorrido  $\delta$

$$\mathbf{d} = \pm(A + B - d), \quad \text{Ec. 4.24}$$

donde,  $\mathbf{d}$  toma los valores positivos en la zona de sombra tras la barrera y negativos en la zona de brillo. Aquí,

$$d = \left[ (x_s - x_R)^2 + (y_s - y_R)^2 + (z_s - z_R)^2 \right]^{1/2}. \quad \text{Ec. 4.25}$$

Para un sistema de coordenadas rectangulares que tiene su origen en la intersección del rayo difractado y el borde superior de la barrera,

$$A = (x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 4.26}$$

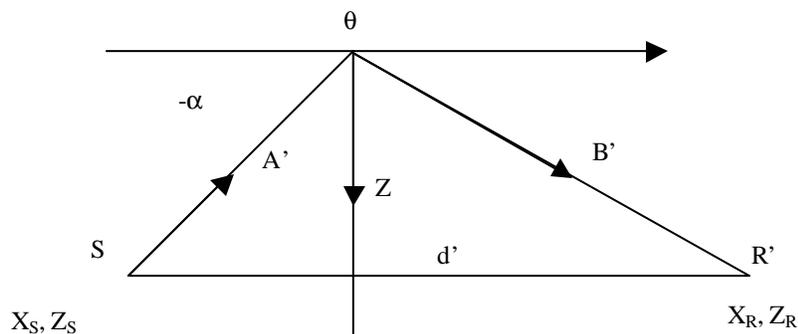
$$B = (x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)^{1/2}, \quad \text{Ec. 4.27}$$

se determina también la proyección de longitudes e el plano x-z como:

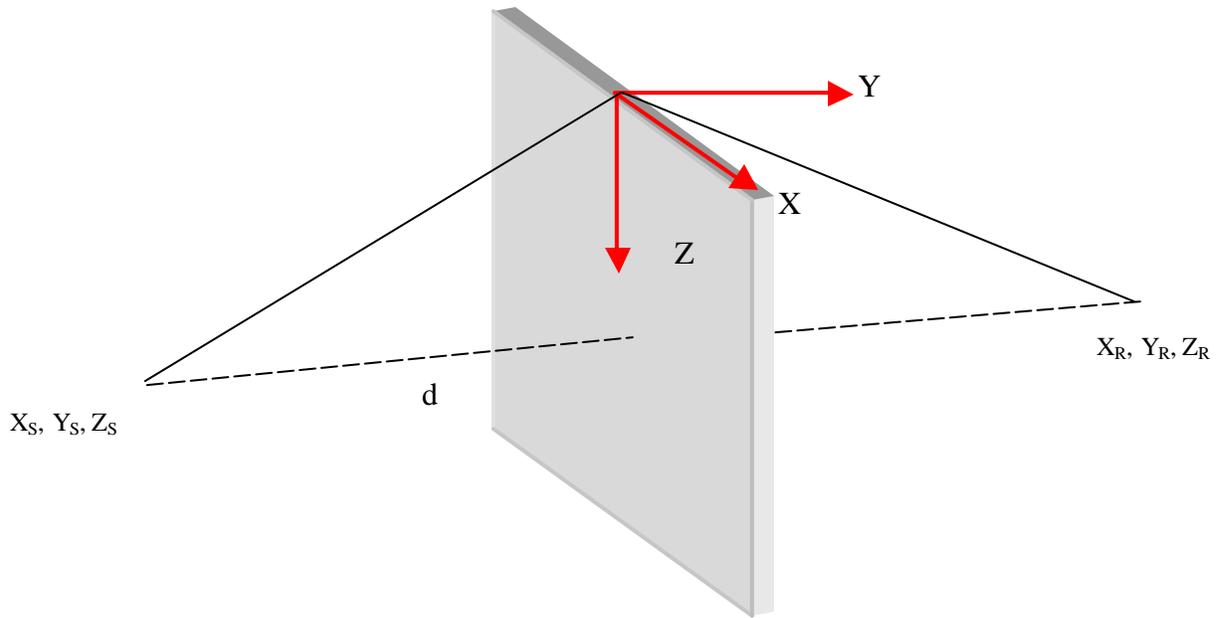
$$A' = (x_s^2 + z_s^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 4.28}$$

$$B' = (x_R^2 + z_R^2)^{1/2}. \quad \text{Ec. 4.29}$$

La zona de brillo está definida por  $\mathbf{q} - \mathbf{a} - \mathbf{p} < 0$  o por  $Z_R + \left| \frac{X_R}{X_S} \right| Z_S < 0$ , donde  $Z_S$  es positivo cuando la barrera está a mayor altura que la fuente. La Figura 4.10 muestra la proyección del plano X-Z.



**Figura 4.10. Proyección del plano X-Z.**



**Figura 4.11. Perspectiva de la barrera.**

De acuerdo a la expresión de Keller, la reducción de Nivel de presión sonora, debido a la inserción de una barrera entre emisor y receptor es:

$$IL = -20 \log \frac{d}{2 \sin \mathbf{b} [2\mathbf{p} / \sqrt{\mathbf{I}}] [AB(A+B)]^{1/2}} \left| \sec \frac{\mathbf{q} - \mathbf{a}}{2} \pm \csc \frac{\mathbf{q} + \mathbf{a}}{2} \right| dB. \quad \text{Ec. 4.30}$$

De la Figura 4.10 se desprende que:

$$\cos \frac{\mathbf{q} - \mathbf{a}}{2} = \pm \frac{1}{2} \left[ \frac{(A'+B')^2 - d^2}{A'B'} \right]^{1/2}, \quad \text{Ec. 4.31}$$

donde el signo menos se refiere a la zona de sombra y el signo positivo a la zona de brillo.

Por otro lado, para incidencia sonora oblicua, se define que:

$$A = \frac{A'}{\sin \mathbf{b}} \quad \text{y} \quad B = \frac{B'}{\sin \mathbf{b}}. \quad \text{Ec. 4.32}$$

Esto significa que  $\mathbf{b}$  es el ángulo entre el rayo incidente y el borde de la barrera y,

$$\frac{1}{\sin \mathbf{b}} = \left[ 1 + \left( \frac{y_s - y_R}{A+B'} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad \text{Ec. 4.33}$$

Debido a la proyección ortogonal,

$$(A+B)^2 = (A'+B')^2 + (y_s - y_R)^2 \quad \text{o} \quad d^2 = d'^2 + (y_s - y_R)^2. \quad \text{Ec. 4.34}$$

Con la Ec. 4.32 y Ec. 4.34

$$\cos \frac{\mathbf{q} - \mathbf{a}}{2} = \pm \frac{1}{2} \left[ \frac{(A+B)^2 - d^2}{AB} \right]^{1/2} \frac{1}{\sin \mathbf{b}}. \quad \text{Ec. 4.35}$$

Introduciendo la fórmula de  $\mathbf{d}$  diferencia de caminos se puede reconstruir la fórmula de Keller como:

$$IL = \left[ -20 \log \frac{1}{2p(\mathbf{d}/l)^{1/2}} - 20 \log \frac{d}{A+B} - 20 \log \frac{\sqrt{2}}{[1 + d/(A+B)]^{1/2}} - 20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} \left( 1 - \frac{\cos \frac{1}{2}(\mathbf{q} - \mathbf{a})}{\sin \frac{1}{2}(\mathbf{q} + \mathbf{a})} \right) \right] dB,$$

**Ec. 4.36**

donde el primer término de la ecuación es funcionalmente idéntico al resultado obtenido por Rathé para  $N \geq 1$ . El segundo término tiene en cuenta la divergencia esférica del rayo difractado con respecto a la divergencia que se produciría sin la barrera. Los dos últimos términos pueden variar en un rango de  $\pm 3dB$  [12].

La diferencia de camino recorrido  $d$  tiene un mínimo para posiciones de receptor cercanas a la barrera. Para esas posiciones,  $d \approx A + B$  y  $q \rightarrow 3p/2$  por lo que la ecuación queda:

$$IL = 5dB + 10 \log \frac{2pd}{l} dB. \quad \text{Ec. 4.37}$$

La diferencia de caminos será pequeña cuando la altura de la barrera sea pequeña. En este caso  $q \rightarrow a \rightarrow p$ ,  $d \approx A + B$  por lo que la ecuación queda:

$$IL = 5dB + 10 \log \frac{8pd}{l} dB. \quad \text{Ec. 4.38}$$

A partir de esta ecuación se tiene que para  $N = 0$  la solución  $IL = 5dB$ . Por lo tanto se considera una corrección para  $N \gg 1$  y cancela el segundo término de las últimas dos ecuaciones para  $N \rightarrow 0$ .

Kurze y Anderson encuentran que la función apropiada para la corrección es la tangente hiperbólica, de tal manera que:

$$IL = 5dB + 20 \log \frac{\sqrt{2pN}}{\tanh \sqrt{2pN}} dB. \quad \text{Ec. 4.39}$$

Esta ecuación conocida como algoritmo de Kurze y Anderson para la pérdida de inserción de barreras, y da el valor correcto para  $N = 0$  así como un valor promedio para cuando  $N$  sea grande.

Esta fórmula tiene validez para los rangos de  $N$  en que  $-0.2 < N < 26$ .

La pérdida de inserción de una barrera acústica calculada con esta ecuación da una buena concordancia entre los casos teóricos y prácticos. Aún así son valores conservadores. Maekawa encontró mayores valores de atenuación para barreras absorbentes. Por otro lado, se han encontrado menores valores de pérdida de inserción para barreras sobre un suelo absorbente. La interferencia destructiva del rayo directo con el correspondiente rayo reflejado, fenómeno

observado en 300-600 Hz, inhiben el efecto de la barrera incrementando el nivel sonoro en el receptor.

#### 4.9 Atenuación de barrera acústica, según otros autores

La atenuación por una barrera infinitamente larga entre una fuente puntual y un receptor distante, ha sido extendida a una fuente de tamaño finito considerando ésta como un arreglo rectangular de pequeños y equidistantes sub-fuentes. Si la fuente y la barrera son paralelas, la atenuación en alta frecuencia decae 3 dB cuando la distancia fuente-barrera es doblada y varía como  $10\log\left(1 - \frac{h}{H}\right)$ ,

donde  $h$  es la altura de la fuente y  $H$  es la altura de la barrera.

A partir del trabajo desarrollado por Maekawa, Tatge propone el siguiente algoritmo [5]:

$$IL = 10 \times \log(3 + 20N) \quad N \geq 0, \quad \text{Ec. 4.40}$$

donde  $N$  es el número de Fresnel.

Rathé [5], propone un esquema de predicción algo distinto al de Maekawa, para aplicaciones de ingeniería, mediante la definición de una frecuencia característica  $f_1$  definida para  $N = 0.5$  y mediante el ábaco de Maekawa se puede obtener fácilmente la atenuación para todo el rango de frecuencias como función de múltiplos de  $f_1$ . Como la relación entre las frecuencias es fija basta sólo con calcular el valor de atenuación en el ábaco de la frecuencia característica.

El algoritmo propuesto por Rathe es:

$$IL = 13 + 10 \log N \quad N \geq 1. \quad \text{Ec. 4.41}$$

Por otro lado, varios autores han tratado de establecer expresiones que se ajustan a los resultados experimentales de Maekawa, entre ellos Kurze propuso el siguiente algoritmo [5]:

$$IL = 10 \log 20N . \quad \text{Ec. 4.42}$$

#### 4.10 Atenuación de barrera acústica, según ISO 9613-2 [4]

En este estándar los requerimientos para ser considerada una barrera acústica son:

- Que la densidad superficial sea de al menos  $10 \text{ Kg/m}^2$ .
- Que la barrera tenga una superficie cerrada sin fugas acústicas.
- Que la dimensión horizontal normal a la línea fuente-receptor sea más grande que la longitud de onda acústica  $I$  de la frecuencia central de la banda de octava de interés. En otras palabras,  $l_l + l_r > I$ . Estas longitudes se indican en la Figura 4.12.

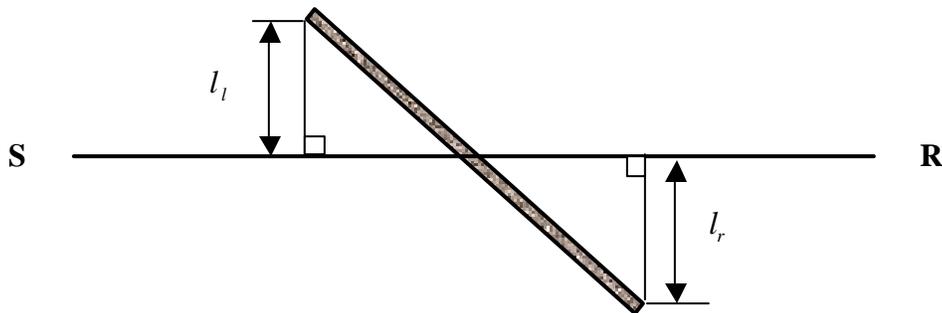


Figura 4.12. Vista en planta de distancias desde los bordes de la barrera hacia la línea S-R.

El efecto difracción sobre una borde superior de una barrera se calcula por:

$$A_{bas} = D_Z - A_{gr} > 0 , \quad \text{Ec. 4.43}$$

y la difracción por un borde vertical,

$$A_{bar} = D_Z > 0 , \quad \text{Ec. 4.44}$$

donde,  $D_z$  es la atenuación de la barrera por banda de octava y  $A_{gr}$  es la atenuación del suelo en ausencia de la barrera.

Se asume que sólo un camino es importante entre la distancia fuente-receptor, luego

$$D_z = 10 \log [3 + (C_2 / I) C_3 z K_{met}] dB, \quad \text{Ec. 4.45}$$

donde  $C_2$  es igual a 20, y 40 cuando se toman en cuenta las reflexiones del suelo mediante fuentes imágenes,  $C_3$  es iguala 1 para difracción simple y  $C_3 = [1 + (5I/e)^2] / [(1/3) + (5I/e)^2]$  para difracción doble,  $I$  es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de octava en metros y  $K_{met}$  es el factor de corrección de efectos meteorológicos dado por la ecuación:

$$K_{met} = \exp \left[ - (1/2000) \sqrt{d_{SS} d_{SR} d(2z)} \right] \quad \text{para } z > 0 \quad \text{Ec. 4.46}$$

$$K_{met} = 1 \quad \text{para } z \leq 0.$$

Para difracciones laterales se asume que  $K_{met} = 1$ ,  $e$  es la distancia entre los dos bordes difractantes, en el caso de doble difracción, y  $z$  es la diferencia entre los caminos recorridos entre la onda difractada y la onda directa, dada para simple difracción por la ecuación:

$$z = [(d_{SS} + d_{SR})^2 + a^2]^{1/2} - d, \quad \text{Ec. 4.47}$$

donde  $d_{SS}$  es la distancia al (primer) borde difractante,  $d_{SR}$  es la distancia del (segundo) borde difractante al receptor,  $a$  es la distancia paralela a la barrera en metros entre la fuente y el receptor, y  $d$  es la distancia entre la fuente y el receptor.

Para difracción doble la expresión queda determinada por

$$z = \left[ (d_{SS} + d_{SR} + e)^2 + a^2 \right]^{1/2} - d . \quad \text{Ec. 4.48}$$

La Figura 4.13 muestra los casos de barrera gruesa y difracción doble.

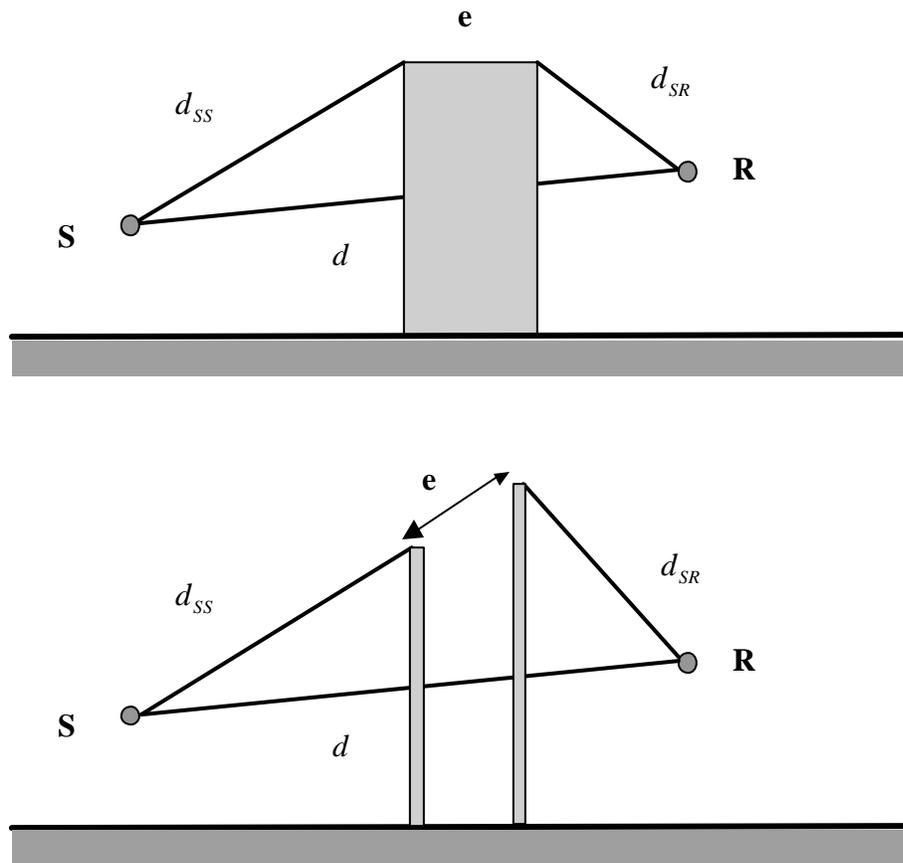


Figura 4.13. Barrera gruesa y difracción doble.

#### 4.11 Índice global de la pérdida de inserción en dB(A)

La pérdida de inserción de una barrera acústica (para  $\lambda < H$ ) depende de la frecuencia, tomando valores crecientes a medida que esta aumenta. Bajo este aspecto se crea la necesidad de aplicar un índice globalizador de la capacidad de atenuación de la barrera acústica con objeto de independizar los datos de la frecuencia.

El procedimiento es análogo al utilizado en Acústica de la edificación para definir el índice de aislamiento en dB(A), en 18 bandas de 1/3 de octava que se extienden desde las centradas en la frecuencia de 100 a la de 5000 Hz.

Por lo tanto, el índice global de la pérdida de inserción en dB(A), definido por Simón y Pfretzschner [13], será:

$$IL_A = 10 \times \log \left( \sum_{i=1}^{18} 10^{0.1(N_{ei} + A_i)} \right) - 10 \left( \sum_{i=1}^{18} 10^{0.1(N_{ei} + A_i - IL_i)} \right) \quad \text{Ec. 4.49}$$

Donde  $N_{ei}$  e  $IL_i$  son los niveles de 1/3 de octava de rayo directo en el punto de recepción y la pérdida de inserción debido a la barrera en la frecuencia central del 1/3 de octava  $i$ , respectivamente.

La aplicación de la expresión anterior tiene en cuenta las siguientes condiciones:

- 1) Condiciones estacionarias de ruido de tráfico (en caso contrario se debe modificar la expresión anterior en función de  $L_{eq}$ ).
- 2) Tabla de valores de corrección de la curva A por 1/3 de octava (valores relativos respecto a la frecuencia de 1 KHz).
- 3) Espectro de ruido de tráfico normalizado por 1/3 de octava, estipulado en la Norma EN 1793 Parte 3. Este espectro se expresa en niveles de presión sonora relativos ponderados A..

## 4.12 Diseño de barreras

Se han realizado ensayos a escala real, modelos a escala reducida y modelación matemática para comprobar la eficiencia de cada diseño de barrera acústica.

Científicos han determinado los descriptores necesarios para la evaluación del obstáculo difractante. Gracias a esto, han realizado comparaciones con respecto a otros tipos de barrera o del mismo tipo con modificaciones en su diseño. La necesidad de aumentar la eficiencia de la barrera acústica sin aumentar considerablemente los costos ni dañar la parte estética del paisaje, lleva inevitablemente a la creación de nuevos diseños.

Se ha determinado que en carretera el incremento de la altura de la barrera acústica en un metro, entrega un exceso de pérdida de inserción de 1.5 dB [14].

Watts, Crombie y Hothersall [15], del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Bradford, Inglaterra, compararon barreras a escala real que seleccionaron luego de un trabajo matemático. Los tipos de barreras seleccionadas fueron barreras dobles, forma de T, barrera de múltiple cumbrera, para ser evaluadas frente a una barrera simple reflectante.

Las mediciones fueron realizadas con un sistema de altavoz portátil y un arreglo de micrófonos hasta 80 metros tras la barrera. El promedio de cada arreglo sirvió para valorar globalmente la eficiencia de cada barrera y así poder compararla.

Basados en mediciones sobre un suelo similar sin barrera, encontraron que el promedio de pérdida de inserción de una barrera reflectante de 2 m de altura fue 10.3 dB. La medición de pérdida de inserción relativa de los otros tipos de barrera respecto a ésta, se resume en la Tabla 4.4.

La barrera en forma de T aportó una mejora de la pérdida de inserción en incidencia normal de 1.4 a 3.1 dB(A). Para las barreras de cumbrera múltiple la mejora fue de 2.4 a 2.7 dB(A), y para las barreras dobles de 2 m de altura la pérdida de inserción relativa fue de 2.6 a 2.8 dB(A). Sin embargo, las barreras dobles de 1.25 y 2 m de altura generaron un aumento de los niveles de ruido medidos en la zona de sombra.

La instalación de material absorbente tuvo un pequeño efecto de 0.6 dB en la pérdida de inserción de barrera en forma de T de 1 m de ancho en incidencia normal. Doblando el ancho de la capa se percibió una mejora de 1.1 dB.

Opción	Pérdida de Inserción relativa comparada con barrera de 2 m
<b>Reflectante simple</b>	
▪ 2 m de altura	---
▪ 2.5 m de altura	+1.7
▪ 3 m de altura	+3.6
<b>Forma de T (2 m de altura)</b>	
▪ 1 metro de ancho reflectante	+1.4
▪ 1 m de ancho absorbente	+2.0
▪ 2 m de ancho absorbente	+3.1
<b>Cumbrera múltiple (2 m de altura)</b>	
▪ 1 m ancho reflectante, paneles 0.5 m	+2.4
▪ 1 m ancho absorbente, paneles 0.5 m	+2.5
▪ 1 m ancho absorbente, paneles 1 m	+2.6
▪ 2 m ancho absorbente, paneles de 0.5 m	+2.7
<b>Barreras dobles</b>	
▪ separadas 8 m, 1.25 y 2 m de altura	-0.2
▪ separadas 4 m, ambas 2 m de altura	+3.1
▪ separadas 8 m de altura, ambas 2 m de altura	+3.7

**Tabla 4.4. Pérdida de inserción relativa a incidencia normal. [15]**

Una conclusión importante en este trabajo es el hecho de que el comportamiento de la barrera es similar tanto para una fuente lineal como para una fuente puntual. Esto se basa en que la pérdida de inserción relativa a  $30^\circ$  es ampliamente similar a la medida en incidencia normal. La Tabla 4.5 muestra el promedio de la pérdida de inserción relativa, resultante de las mediciones realizadas a 20 y 40 metros detrás de la barrera.

Opción	Pérdida de inserción a incidencia normal (promedio 20 y 40 m)	Pérdida de inserción a 30 ° (promedio 20 y 40 m)
<b>Reflectante simple</b>		
▪ 2 m de altura	---	
▪ 2.5 m de altura	+1.9	+2.6
▪ 3 m de altura	+3.9	+4.3
<b>Forma de T (2 m de altura)</b>		
▪ 1 metro de ancho reflectante	+1.2	+1.6
▪ 1 m de ancho absorbente	+2.0	+2.1
▪ 2 m de ancho absorbente	+3.1	+3.8
<b>Cumbrera múltiple (2 m de altura)</b>		
▪ 1 m ancho reflectante, paneles 0.5 m	+2.4	+1.9
▪ 1 m ancho absorbente, paneles 0.5 m	+2.7	+2.3
▪ 1 m ancho absorbente, paneles 1 m	+2.7	+2.6
▪ 2 m ancho absorbente, paneles de 0.5 m	+2.8	+2.6
<b>Barreras dobles</b>		
▪ separadas 8 m, 1.25 y 2 m de altura	-1.0	-0.4
▪ separadas 4 m, ambas 2 m de altura	+3.1	+2.6
▪ separadas 8 m de altura, ambas 2 m de altura	+3.6	+2.8

**Tabla 4.5. Pérdida de inserción relativa a incidencia normal y 30 °. Promedio de mediciones realizadas a 20 y 40 m. [15]**

May y Osman, investigadores del Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Canadá, también estudiaron la eficiencia de las llamadas nuevas formas de barreras acústicas, logrando uno de los trabajos de mayor aporte en el tema [14].

Describieron una típica situación de una autopista en un modelo a escala 1/16, en las cuales simularon los fenómenos acústicos que se producían cuando el receptor estaba detrás de la barrera simple, en el lado opuesto de la autopista y entre barreras paralelas.

Los tipos de barrera fueron ancha reflectante, ancha con un lado absorbente, convencional con un lado absorbente, forma de T, con cumbre cilíndrica y en forma de Y.

La comparación se hace ante una barrera delgada completamente reflectante, de 4.9 m de altura. Se consideró una altura de 1.2 m para la fuente, que correspondía a un típico espectro ruido de tráfico compuesto de 8 % de vehículos pesados. La distancia fuente-barrera fue de 12.2 m y la distancia barrera-receptor, fue de 6.1, 12.2, 24.4 y 36.6 m.

Un resumen de los resultados más relevantes respecto a la Pérdida de Inserción de 14.8 dB(A) alcanzada por la barrera acústica de referencia, se indican en la Tabla 4.6

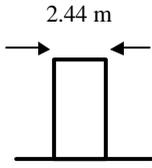
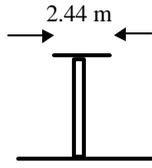
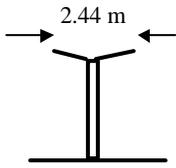
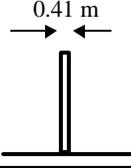
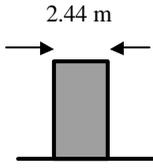
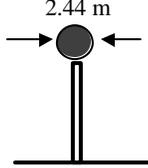
Opción	Pérdida de inserción relativa comparada con barrera de 4.9 m
<p>Ancha reflectante</p> 	+3.1
<p>Forma de T</p> 	+4.2
<p>Forma de Y</p> 	+3.5
<p>Convencional un lado absorbente</p> 	+1.5
<p>Ancha absorbente</p> 	+5
<p>Cumbrera cilíndrica</p> 	+2.5

Tabla 4.6. Pérdida de Inserción relativa obtenida de un modelo a escala 1/16. [14]

### 4.13 Transmisión sonora a través de la barrera [11] [16] [17]

En forma analítica y experimental Kurze y Anderson buscaron una relación que implicara la energía acústica transmitida a través de la barrera.

Consideraron la expresión de pérdida de transmisión sonora aplicable a ondas esféricas:

$$\Delta L_b = 10 \log \left\{ 1 + \left( \frac{\rho m'' \cos j}{rc} f \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_c} \sin^2 j \right)^2 \right]^2 \right\} dB, \quad \text{Ec. 4.50}$$

donde  $m''$  es la masa superficial de la barrera,  $j$  es la dirección del frente de onda plana,  $rc$  la impedancia característica del aire y  $f_c$  la frecuencia crítica, esto es

$$f_c = \frac{c^2}{2\rho} \left( \frac{m''}{B'} \right)^{1/2}, \quad \text{Ec. 4.51}$$

$$\text{donde } B' = \frac{Eh^3}{12(1 - m^2)}, \text{ y} \quad \text{Ec. 4.52}$$

$E$  es el módulo de Young,  $h$  el grosor de la barrera y  $m$  el coeficiente de Poisson.

Aplicando esta fórmula a un frente de onda de  $60^\circ$  y una  $f_c$  de 500 Hz, frecuencia donde existe una mínima pérdida de transmisión debido a la coincidencia con el máximo del espectro de ruido de tráfico analizado, se encontró que para aplicación práctica, donde la diferencia del camino recorrido no supera los 2.4 m, se recomienda una masa superficial de:

$$m'' \geq 20 \text{ Kg} / \text{m}^2. \quad \text{Ec. 4.53}$$

La atenuación lograda por una barrera acústica, por concepto de pérdida de inserción, se puede ver comprometida si no se realiza un diseño que asegure que la energía transmitida a través del panel tenga poca incidencia en el receptor. Una contribución de 0.5 dB(A) al nivel total es comúnmente adoptado como el límite de contribución de sonido transmitido. Para esto aparece en forma práctica la regla general:

$$L_{p,trans} = L_{p,diff} + 10dB, \quad \text{Ec. 4.54}$$

donde  $L_{p,trans}$  es el nivel de ruido transmitido a través del panel, y  $L_{p,diff}$  es el nivel de ruido difractado por los bordes de la barrera acústica.

Esto significa que el nivel transmitido a través del panel debe ser menor que el transmitido por los bordes de la barrera en 10 dB.

El aislamiento sonoro de una barrera depende de muchos factores tales como la masa, la rigidez, el ángulo de incidencia sonoro, etc. El más significativo de estos es la masa superficial de la barrera y varios métodos de cálculo adoptan este parámetro como el único a la hora de evaluar la atenuación de una barrera. En el Reino Unido, el Departamento de Transporte entrega la siguiente fórmula para calcular la masa superficial mínima requerida para una barrera acústica:

$$M = 3 \times 10^{\left(\frac{A-10}{14}\right)} \text{Kg} / \text{m}^2, \quad \text{Ec. 4.55}$$

donde  $A$  es la atenuación potencial en dB(A) de la barrera  $L_{p,dir} - L_{p,diff}$ .

En esta ecuación sólo se considera la masa superficial del panel y la masa de los postes de soporte no es considerada.

En el manual DMRB de Inglaterra se expresa esta misma fórmula en sus recomendaciones de diseño enfocada esta vez al grosor del material a usar, quedando:

$$t = \frac{3000 \times 10^{\left(\frac{A-10}{14}\right)}}{w}, \quad \text{Ec. 4.56}$$

Donde  $t$  es el grosor de la barrera expresado en mm y  $w$  es la densidad del material a utilizar expresado en  $\text{Kg/m}^3$ .

En esta fórmula se refleja que el grosor requerido para cumplir los requerimientos mínimos es inversamente proporcional a la densidad del material.

Cuando una barrera acústica es ensamblada es muy importante el sello de las juntas para prevenir fugas de energía. La Figura 4.14 muestra como el aislamiento acústico del panel incide en la eficiencia total de la barrera. Aquí se ve que a mayor aislamiento acústico menor es la pérdida de eficiencia de la atenuación producida por difracción.

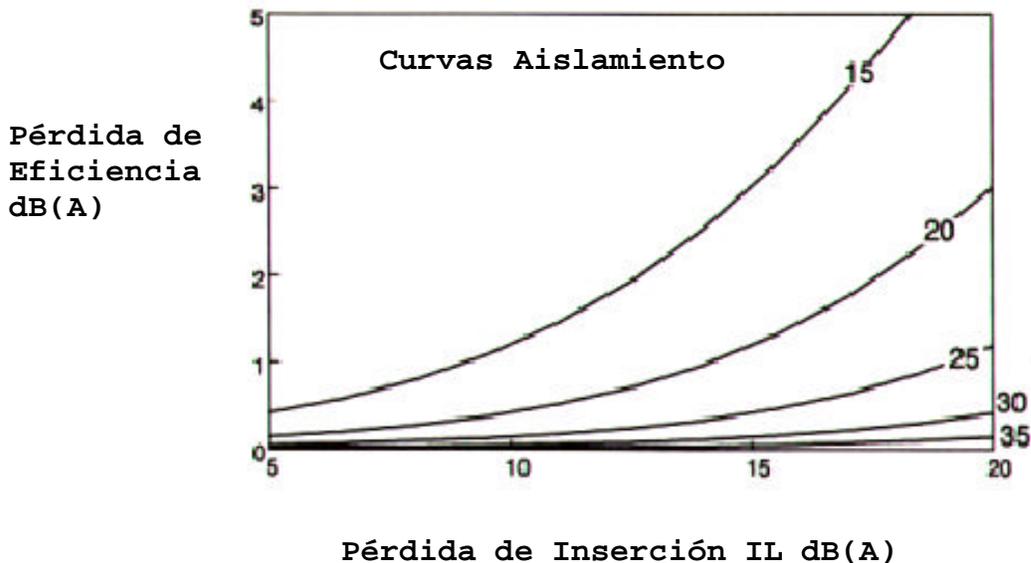
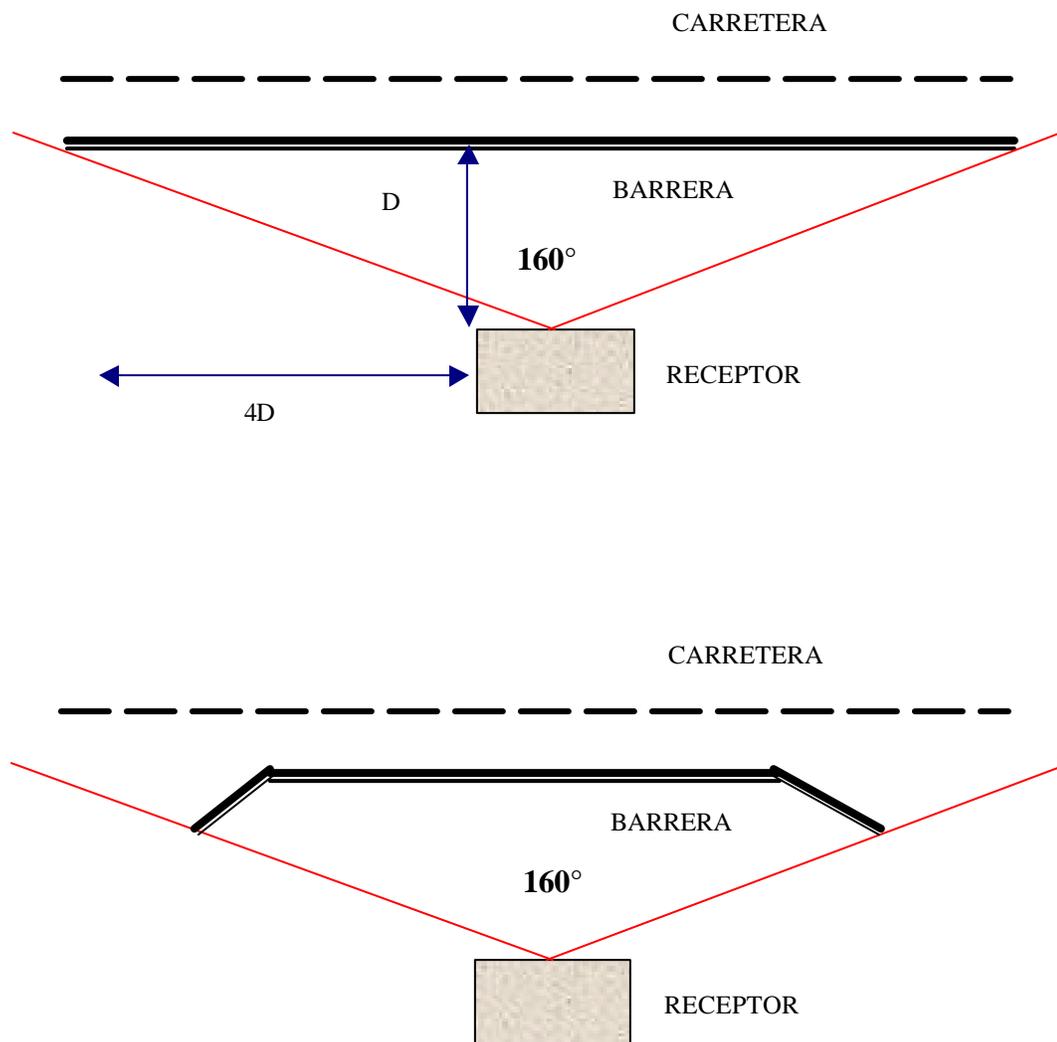


Figura 4.14. Incidencia del aislamiento acústico en la pérdida de inserción.

#### 4.14 Longitud de la barrera acústica [16]

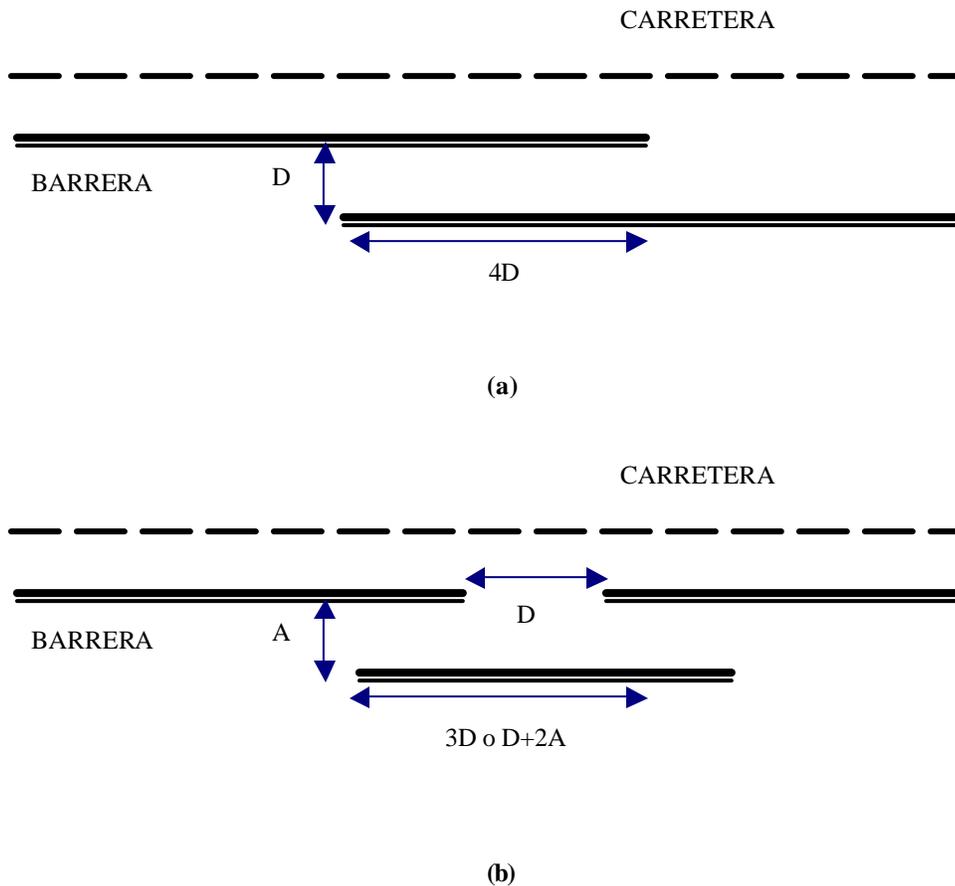
La difracción sonora no ocurre solamente en el borde superior (la cumbrera de la barrera), sino que también ocurre en los bordes laterales de ésta. Por lo tanto la atenuación de los niveles de ruido de tráfico que produce la instalación de una barrera no depende solamente de su altura, sino también de su longitud respecto al receptor.

Ante esta situación, se recomienda que la barrera acústica cubra un ángulo de  $160^\circ$  o tener una proporción de 4 veces entre la distancia receptor-barrera y la perpendicular entre receptor-borde lateral de barrera, como se muestra en la Figura 4.15.



**Figura 4.15. Longitud de la barrera necesaria para evitar transmisión por sus bordes laterales.**

Los accesos desde y hacia la carretera también deben cumplir ciertas dimensiones para que la pérdida de inserción producida por la barrera no se vea comprometida. Para estos casos se recomienda que el traslape entre ambas barreras sea 4 veces la distancia entre ellas, como se muestra en la Figura 4.16(a).



**Figura 4.16(a) y 4.16(b). Longitud de la barrera necesaria en accesos.**

Otra alternativa nos indica la manera de apoyar con una barrera trasera una apertura destinada a la mantención y acceso de emergencia, como lo muestra la Figura 4.16(b). Esta vez, se sugiere triplicar la longitud del acceso

#### 4.15 Barreras paralelas [16]

La energía recibida por la barrera puede eventualmente ser reflejada si ésta no cuenta con las características necesarias de absorción. El rayo reflejado puede ser considerado como una fuente imagen al otro lado de la barrera, y aunque este rayo está más lejos del receptor, no existe obstáculo difractante para atenuar su emisión. Es decir, existe una degradación de la atenuación aportada por la barrera más cercana. Para barreras de 2 m de altura, que son reflectantes y paralelas, a 34 metros de distancia se encontró que existía una pérdida de 4 dB(A) en la eficiencia. La eficiencia de las barreras disminuye si se reduce la separación entre ellas o si se aumenta su altura. Estudios han determinado que para barreras paralelas reflectantes de 4.5 m de altura y separadas a una distancia de 18, la pérdida de inserción decae 6 dB(A) [18].

Para superar este problema, es común darle una angulación a las barreras de manera de elevar la reflexión sobre el receptor. Se han realizado estudios con el objeto de encontrar la angulación necesaria para una distancia fija entre dos barreras y se encontró que para una distancia de 45 m, un ángulo de  $3^\circ$  es necesario para permitir una buena difracción; Sin embargo, para una distancia entre las barreras de 18 m, el ángulo requerido fue de  $10\text{-}15^\circ$  [19]. La Figura 4.17 ilustra el efecto angulación.

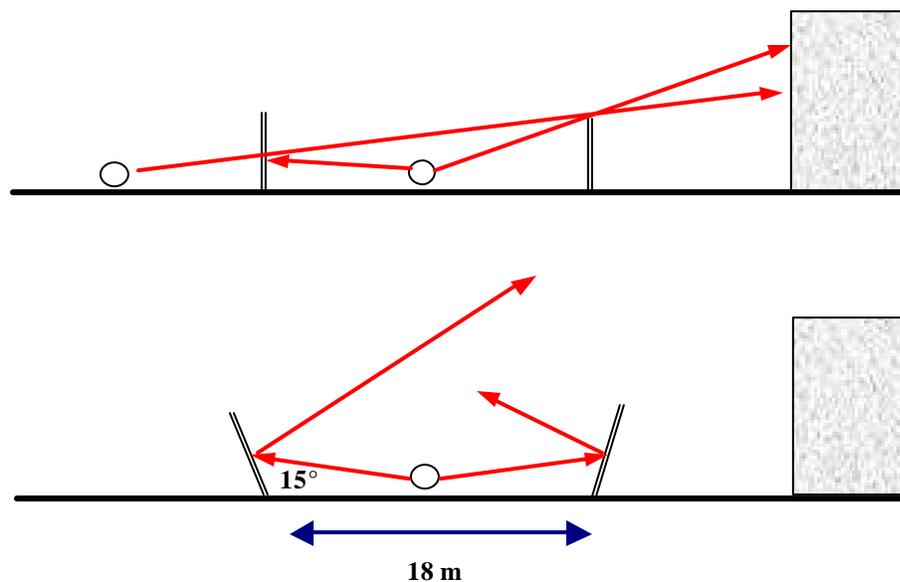
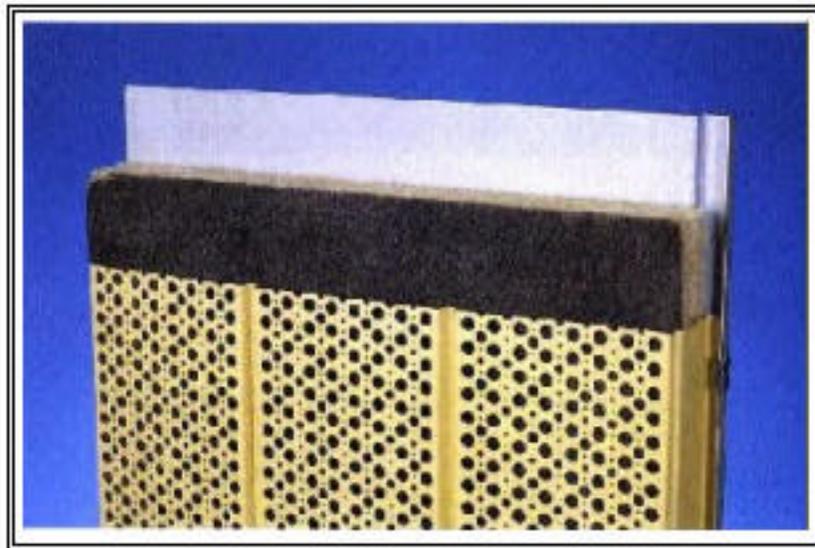


Figura 4.17. Rayos reflectantes en barreras paralelas y anguladas.

Sin embargo, la mejor alternativa al problema de las reflexiones acústicas ha sido transformar esa energía en calor a través de un material con cierta porosidad y resistencia al flujo para una absorción suave en el rango de frecuencia de interés, en este caso el ruido de tráfico. Como segundo caso existen los dispositivos del tipo selectivo cuando queremos atacar una frecuencia determinada, bajo la teoría de resonadores o cavidades.

De esta forma, los distintos materiales y diseños de las barreras acústicas presentan distintas capacidades absorbentes. Generalmente este tipo de barreras tiene la cara absorbente dirigida hacia la autopista. En el caso de ser una barrera ubicada entre dos vías de una autopista, las dos caras suelen tener buenas características de absorción. De las barreras absorbentes la más común es la de panel metálico perforado + lana de vidrio + panel metálico liso. El panel perforado permite la protección del material poroso que puede sufrir grandes deterioros frente a condiciones climáticas adversas. Un ejemplo de barrera absorbente se muestra en la Figura 4.18.



**Figura 4.18. Configuración de una barrera metálica absorbente.**

#### 4.16 Cimientos de las barreras [20]

Para el diseño de los cimientos las siguientes consideraciones son importantes:

- 1) Los efectos del viento afectan la estabilidad de la estructura dada la gran superficie de las barreras acústicas.
- 2) Las juntas en los puntos de contacto entre los elementos de la barrera pueden reducir las capacidades de atenuación.
- 3) Los cimientos pueden tener una proporción importante en el costo total. En zonas donde existe una gran carga de viento, los cimientos pueden representar un 30 % del costo del conjunto de la barrera.

Los tipos de cimientos más utilizados en los países que han instalado barreras acústicas son:

##### 1) *Fundación de concreto reforzado con postes anclados en su borde superior*

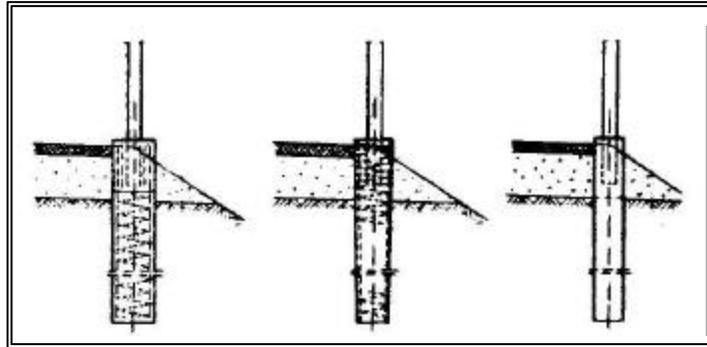
La fundación puede ser un cilindro de concreto o de base continua y los postes de acero, concreto reforzado o madera. La profundidad está en función de la altura de la barrera y la carga de los vientos locales. La fundación cilindro de concreto y base continua se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4.19. A) Cilindro de concreto; B) Base continua.**

## 2) Postes de madera empotrados en un orificio cilíndrico con piedras

Esta fundación es típica de las barreras de madera. Un ejemplo se indica en la Figura 4.20.



**Figura 4.20. Poste de madera empotrado.**

## 3) Fundación de concreto no reforzado con postes empotrados totalmente

Esta fundación está basada en cilindro de concretos con postes de acero o concreto reforzado. Los postes son usualmente empotrados en la fundación de concreto 300 mm desde el fondo del cimientto. Un ejemplo de poste metálico empotrado se muestra en la Figura 4.21.



**Figura 4.21. Poste metálico empotrado.**

#### 4.17 Normativa referente a barreras acústicas [21] [22] [23] [24] [25]

Referente a las barreras acústicas, existen estándares de medición y normativas respecto a su uso y evaluación. La evaluación de su eficiencia acústica en laboratorio, está dada por las Normativas ISO extraídas de las utilizadas al momento de evaluar parámetros acústicos de elementos constructivos. Éstas están ligadas a los conceptos de transmisión sonora y absorción sonora.

Estas Normativas son utilizadas en España como apoyo técnico a la construcción de barreras.

##### 4.17.1 EN 1793 Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras-método de ensayo para determinar el comportamiento acústico-Parte 1: Características intrínsecas relativas a la absorción sonora.

El objetivo de esta Norma consiste en especificar un método de ensayo para evaluar las prestaciones de absorción acústica de los dispositivos reductores de ruido diseñados para las carreteras (medición de características intrínsecas). Esta Norma no se refiere a la determinación de las prestaciones *in situ* (características extrínsecas), que dependen además de factores que no se relacionan con el producto en sí mismo, esto es, las dimensiones de la pantalla, la calidad de su instalación, impedancia del terreno, geometría del lugar, etc. Esta normativa tiene por función facilitar la selección de los dispositivos a emplear en aplicaciones específicas a lo largo de las vías.

##### 4.17.1.1 Objetivo y Campo de aplicación

Se utiliza para evaluar el comportamiento de absorción acústica de los dispositivos reductores de ruido en carreteras, que pueden ser montados dentro de las instalaciones de ensayo descritas en la Norma UNE EN 20354. Esta Norma es válida solo para planos absorbentes y excluye aquellos dispositivos que actúan como resonadores amortiguados.

##### 4.17.1.2 Disposición de ensayo

- La muestra a ensayar debe montarse en la cámara de ensayo de la misma manera en que el dispositivo se usa en la práctica, con los mismo ensamblajes y sellos.

- Todas las partes reflectantes del material, expuestas hacia la carretera, deben estar presentes.
- Cuando se incluyan postes en la construcción del dispositivo, se debe incluir al menos un poste en la muestra que se utiliza para el ensayo.

#### 4.17.1.3 Evaluación de la absorción acústica

Se determina un índice de evaluación  $DL_a$  para indicar el comportamiento. Los índices de absorción acústica  $a_i$  por bandas de 1/3 de octava se ponderan de acuerdo al espectro normalizado de ruido de tráfico definido en la Norma EN 1793 Parte 3, esto es.

$$DL_a = -10 \log \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} a_{Si} \otimes 10^{0.1L_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right] \text{ dB.} \quad \text{Ec. 4.57}$$

#### 4.17.1.4 Clasificación del Índice de Evaluación

La Norma especifica una tabla (Tabla 4.7), en la que se clasifica el comportamiento de absorción basado en categorías.

CATEGORIA	$DL_a$ dB
A0	No determinado
A1	<4
A2	4 a 7
A3	8 a 11
A4	>11

Tabla 4.7. Índice de absorción acústica, definido en la Norma EN 1793 Parte 1.

#### 4.17.2 EN 1793 Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras-método de ensayo para determinar el comportamiento acústico-Parte 2: Características intrínsecas relativas al aislamiento a ruido aéreo

El objetivo de esta Norma es evaluar el aislamiento a ruido aéreo proporcionado por el dispositivo, de modo que el sonido transmitido en forma directa sea irrelevante con respecto al sonido difractado por la parte superior. Esta Norma no se refiere a la determinación de las prestaciones *in situ* (características extrínsecas). Al igual que la parte número 1 de la Norma, su función es facilitar la selección de los dispositivos destinados a cumplir con la atenuación del ruido de tráfico en carretera.

##### **4.17.2.1 Objetivo y campo de aplicación**

Esta Norma especifica el método para medir el comportamiento de aislamiento a ruido aéreo de las barreras acústicas en carretera. Es válida para los dispositivos que se puedan ensamblar en las instalaciones de ensayo descritas por la Norma EN ISO 140-3.

##### **4.17.2.2 Disposición de ensayo**

- La muestra se debe montar en la ventana de ensayo y se ensambla de la misma forma que el dispositivo se usa en la práctica. Los soportes perimetrales no deben solaparse con la muestra sobre una distancia superior a 70 mm y se deben sellar para impedir fugas.
- Cuando se empleen postes, se debe incluir al menos uno. La longitud de los paneles de un lado del poste debe ser superior o igual a 2 m. La cara expuesta al ruido de tráfico se debe orientar hacia la sala de emisión.

#### 4.17.2.3 Evaluación del aislamiento al ruido aéreo

Se ponderan los índices de reducción sonora por bandas de 1/3 de octava, de acuerdo al espectro normalizado de ruido de tráfico definido en EN 1793-3. El índice de evaluación de aislamiento a ruido aéreo  $DL_R$  se calculan como:

$$DL_R = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i} \otimes 10^{-0.1R_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right] \text{ dB.} \quad \text{Ec. 4.58}$$

#### 4.17.2.4 Clasificación del Índice de Evaluación

La Norma especifica una tabla (Tabla 4.8), en la que se clasifica el comportamiento de aislamiento a ruido aéreo basado en categorías.

CATEGORIA	$DL_R$ dB
B0	No determinado
B1	<15
B2	15 a 24
B3	>24

Tabla 4.8. Índice de aislamiento acústico, especificado en la Norma EN 1793.

#### 4.17.3 ISO/FDIS 10847 Determinación *in situ* de la pérdida de inserción de barreras acústicas de todos los tipos

El estándar internacional ISO/FDIS 10847 especifica en detalle el procedimiento a seguir para la medición de la pérdida de inserción de una barrera *in situ*, incluyendo posiciones de micrófonos, características de la fuente acústica, condiciones meteorológicas y ambiente acústico del sitio de medición.

Este estándar permite la medición de la pérdida de inserción de una barrera en un sitio dado y con condiciones meteorológicas dadas. No permite la comparación de valores de pérdida de inserción de una barrera equivalente en un sitio diferente. Puede ser usado para comparar valores de pérdida de inserción de diferentes tipos de barreras en un mismo sitio y bajo las condiciones meteorológicas dadas por el método directo.

El procedimiento consiste en mediciones simultáneas del nivel de presión sonora en una posición de referencia y posiciones de recepción elegidas. Las posiciones de recepción representarán un espacio abierto detrás de la barrera.

Los tipos de fuentes acústicas utilizadas para determinar la pérdida de inserción *in situ* de una barrera son:

- 1) *Fuente natural*: Corresponde a un flujo de tráfico normal sin alteración.
- 2) *Fuente natural controlada*: Corresponde a la selección del flujo y del tipo de vehículos para crear una fuente típica.
- 3) *Fuente artificial*: Corresponde al manejo de los parámetros de la fuente para simular una fuente natural.

Las señales captadas se pueden describir mediante: Nivel continuo equivalente ponderado A, Nivel de exposición sonora ponderado A, Nivel de presión sonora por banda de octava o 1/3 de octava y/o Nivel de presión sonora máximo.

En este estándar se propone la metodología para calcular la pérdida de inserción:

1. Mediante la diferencia de niveles captados antes y después de la instalación de la barrera, llamado método directo.

2. O bien, mediante un método indirecto para estimar los niveles de presión sonora antes de la instalación de la barrera, midiendo en otro sitio el cual ha sido catalogado como equivalente.

Para sitios equivalentes, se requiere gran similitud en las características de la fuente, posicionamiento de micrófonos, características del terreno, estructuras artificiales cercanas y condiciones meteorológicas.

La Norma describe principios para asegurar que las condiciones de equivalencia sean mantenidas entre los casos de “antes” y “después”, y así proporcionar certeza y confianza a la determinación de la pérdida de inserción de la barrera acústica.

#### **4.18 Definiciones sobre barreras acústicas en algunos países [23]**

Algunos países han incluido, dentro de las recomendaciones de estructuras viales o de impacto ambiental, sugerencias respecto a las barreras acústicas.

##### **4.18.1 Australia**

- La barrera debe resistir al viento.
- Antes de que se acepte la instalación, los elementos estructurales deben ser homologados por la dirección de carreteras.
- La pérdida de transmisión acústica a través del material no debe ser inferior a 30 dB(A) (se exige un certificado de ensayo realizado por un laboratorio).
- La barrera no debe presentar ningún agujero o cavidad.
- La barrera debe ser diseñada absorbente.
- La barrera debe ser diseñada de tal manera que el ruido no pueda pasar por debajo.
- La barrera debe ser aceptable estéticamente.
- La barrera debe tener una masa superior a 10 Kg/m<sup>2</sup>.
- La barrera debe presentar un coeficiente de absorción comprendido entre 0.7 (125 Hz) y 0.9 (500-1000Hz).
- Todos los componentes de una barrera absorbente deben presentar cualidades de durabilidad.
- Las exigencias de mantenimiento deben ser mínimas.

#### 4.18.2 España

La elección de materiales queda determinada por dos propiedades: rendimiento de transmisión sonora y absorción sonora:

- Una pérdida de transmisión sonora de 25 dB(A) para el espectro normalizado de ruido de tráfico.
- Para evitar el efecto de reflexiones múltiples, al instalar barreras a ambos costados de la carretera se siguen las recomendaciones establecidas por el “*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Grenoble*”. [23]

Estas recomendaciones se indican en la Tabla 4.9.

H=altura de barreras; L=distancia entre barreras	
$H > L/5$	La pantalla debe llevar material absorbente
$L/5 > H > L/10$	La decisión de llevar material absorbente depende del medio o inclinación de las barreras
$L/10 > H > L/20$	Se sugiere barreras inclinadas
$H < L/20$	Puede ser material absorbente o barreras inclinadas

**Tabla 4.9. Consideraciones sobre la altura H y la longitud L de la barrera, establecidas por el “*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Grenoble*”.**

#### 4.19 TIPOS DE BARRERAS [16] [17] [20]

De acuerdo a las necesidades específicas de cada situación, el mercado ofrece una amplia gama de barreras de distintos materiales, montajes, propiedades de absorción y reducción sonora.

Existen tres tipos de barreras acústicas: a) Absorbentes, b) Reflectantes y c) Reactivas, las cuales son seleccionadas de acuerdo a su comportamiento acústico, costo y apariencia. Las de tipo absorbente y reactivo son generalmente opacas, mientras que las reflectantes pueden ser visualmente transparentes. Las barreras absorbentes contienen elementos porosos. Este material poroso puede formar parte de la superficie, como es el caso de barreras de concreto granular. Otra forma de hacer absorbente una barrera es agregar una capa de material (como lana de vidrio), tras una primera capa perforada, que puede ser de aluminio, acero, ladrillo o madera.

Autoridades en el mundo se han preocupado de parametrizar los diseños enfocados a estos propósitos. Es así como *The Highway Agency* en Inglaterra ha publicado el *Design Manual for Roads and Bridges*. Esta guía, creada para el diseño de barreras acústicas, forma parte importante de la mitigación contra el ruido de carretera en las autopistas del Reino Unido. Se aconsejan en el manual el uso de materiales y lugar de instalación. Para esto se basa en normativas específicas para cada material.

- Madera: *Specification for Highway Works* (MCHW 1) Parte 2, *Structural Use of Timber*.
- Ladrillo: *Specification for Highway Works* (MCHW 1) Parte 2, *Code for Use of Masonry*.
- Concreto: *Specification for Highway Works* (MCHW 1) Parte 1, *Structural Use of Concrete*.
- Metal: Partes 1 y 5, *Structural Use of Steelwork in Building*; *Structural Use of aluminum*.
- Materiales Transparentes: Standard Alemán ZTV L<sub>SW</sub>-88.

En el Manual se recomiendan las cualidades de cada material que pueden influenciar en la apariencia y el diseño de la barrera. Factores importantes, como la durabilidad, se requieren a la hora de la elección de un tipo de barrera. La idea es que los materiales tengan una duración mínima de 40 años, y 20 años sin mantención.

Por otro lado, la *Federal Highway Administration* (FHWA) en USA publica un Manual de diseño para barreras acústicas acompañado de un video y un CD-ROM que explica las características acústicas y no-acústicas relacionadas con el diseño de barreras en carreteras. Esta iniciativa americana de 1976 tiene por objetivo resolver los problemas de ruido de tráfico en carreteras. Su preocupación por el tema incentivó también a construir, a nivel gubernamental, un modelo de predicción de ruido de tráfico en carretera: el *FHWA Traffic Noise Model* (FWHA TNM). Tiene como fin, realizar una predicción computacional que mejore la precisión de una situación sonora modelada en carretera, así como evaluar el diseño costo/beneficio de las barreras acústicas.

#### 4.19.1 Diques de tierra o Trinchera

Generalmente, aprovechando una situación topográfica en un lugar determinado, se utilizan los diques de tierra como barreras acústicas. Son encontrados mayormente en zonas rurales o suburbanas. Estos diseños tienen algunas ventajas sobre las barreras acústicas. Estas ventajas son:

- Pueden tener una apariencia natural y disimular su verdadera función.
- Dan la sensación de un campo abierto a diferencia de una barrera vertical.
- Generalmente no requieren otros dispositivos de seguridad.
- Menor costo de construcción.
- Menor costo de mantención.
- Usualmente tienen una gran durabilidad.

Sin embargo, los diques de tierra generalmente requieren mayor espacio que una barrera vertical. También necesitan mayor altura para tener la misma eficiencia acústica que una barrera vertical, como lo muestran la Figura 4.22 y la Tabla 4.10.

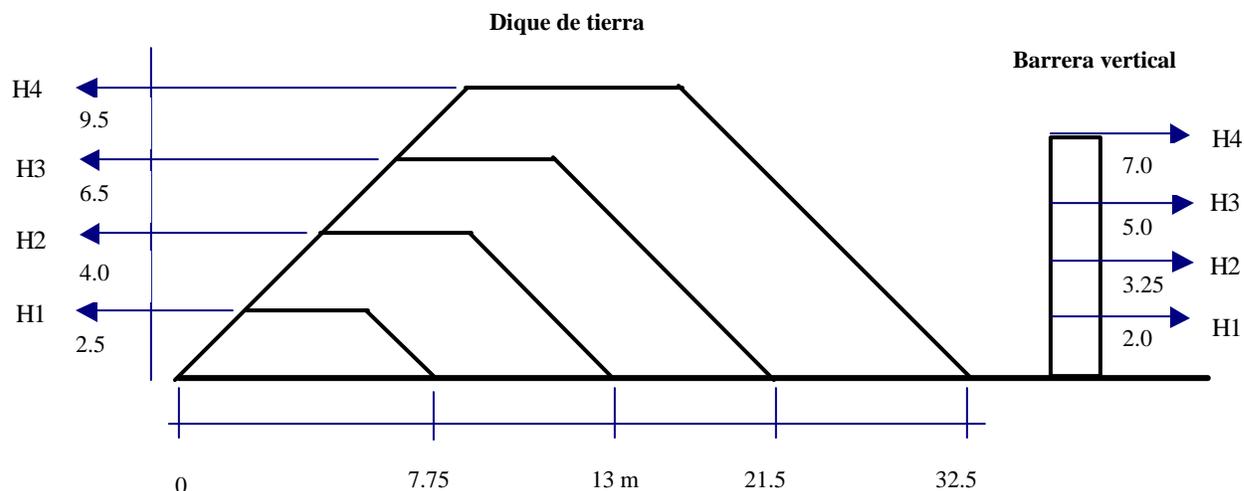


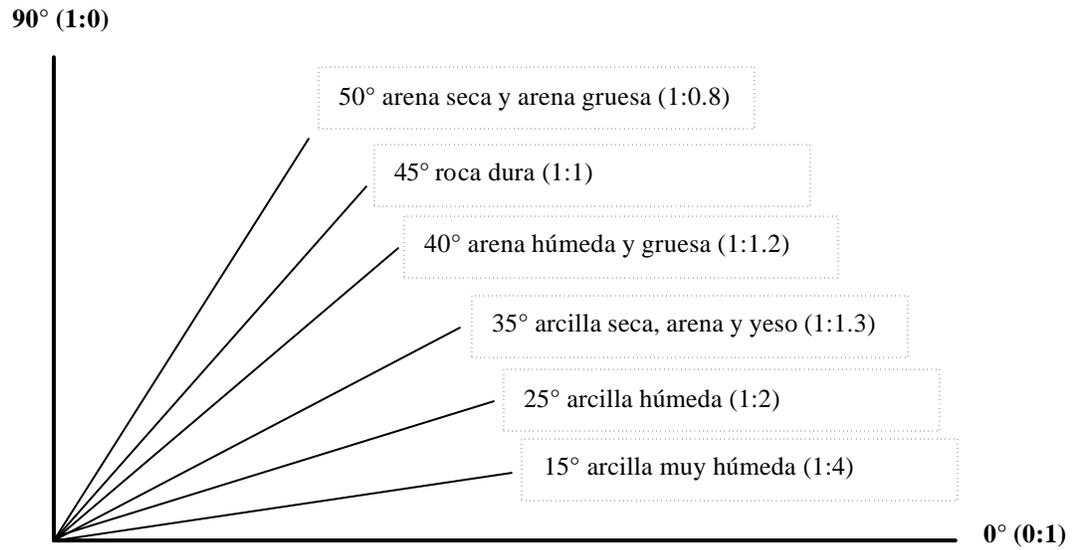
Figura 4.22. Comparación de dimensiones de dique y barrera vertical.

	H1	H2	H3	H4
Barrera vertical	2.0	3.25	5.0	7.0
Dique de tierra	2.25	4.0	6.0	9.5

Tabla 4.10. Comparación alturas de dique y barrera vertical.

Para la construcción del dique existen recomendaciones en cuanto a la proporción de su planicie respecto a sus lados. Así, el *New Metric Handbook* define los materiales que debería tener cada situación de la manera indicada en la Figura 4.23.

La Figura 4.24 muestra un ejemplo de un dique de tierra.



**Figura 4.23. Diagrama de inclinación y materiales del dique.**



**Figura 4.24. Dique de tierra.**

#### 4.19.2 Barreras de concreto

Casi la mitad de las barreras acústicas construidas en USA están hechas de concreto. Esto es porque el concreto es uno de los materiales de mayor durabilidad, normalmente también presente en otros productos usados en carretera. El concreto brinda protección contra impactos y soporta temperaturas extremas, y también se le puede dar la forma que el diseño requiere. Su masa, incluso en un grosor de sólo 12 mm, cumple los requerimientos mínimos de pérdida de transmisión sonora.

Existen dos tipos de mezclas de concreto:

- 1) *Molde de concreto húmedo*: esta mezcla contiene suficiente humedad como para permitir la apropiada reacción química entre todos los ingredientes. Su período de mezcla antes de ser removido es de 8 horas, su característica le permite el diseño de detalles en la barrera. Este tipo de mezcla se usa en los moldes construidos in situ y los moldes prefabricados.
- 2) *Molde de concreto seco*: Tiene sólo la cantidad de agua suficiente para producir la mezcla de los ingredientes y retener la forma luego de ser compactado en un molde. Debido a que no es un fluido como el tipo de concreto anterior, no permite la terminación de detalles finos en su superficie. Este tipo de concreto tiene mayor capacidad de fuerza de cohesión y su proceso de producción es de prefabricación.

La verificación de calidad del concreto con el cual se fabrican las barreras también ha sido motivo de preocupación para el Manual de la FHWA. De esta manera se exigen ensayos correspondientes a:

- Test de depresión: Apropiado sólo para el concreto húmedo, determina la rigidez y la consistencia de la mezcla de concreto. En general, es un buen indicador de la cantidad de agua del material.
- Contenido de Aire: Apropiado sólo para el concreto húmedo, determina la cantidad de aire presente en la mezcla. Es un buen indicador de la durabilidad del concreto, el cual puede ser frecuentemente expuesto a temperaturas extremas.
- Fuerza compresiva: Este test determina la máxima capacidad de compresión de las muestras.

- Análisis de aire: Apropriado para los productos de concreto seco. Este test determina la forma y tamaño de los espacios de aire en las muestras de concreto.
- Densidad: Determina la densidad del concreto de acuerdo al grado de compactación del material.
- Absorción de agua: Este test determina la cantidad de agua que puede absorber la muestra en un tiempo determinado. El concreto será de mala calidad si absorbe una gran cantidad de agua.

La Figura 4.25 muestra un ejemplo de barreras de concreto.



**Figura 4.25. Barrera de concreto.**

### 4.19.3 Barreras de ladrillo

Los ladrillos son construidos usando una mezcla de arcilla y arena, los cuales son fusionados a alta temperatura para aumentar la fuerza de cohesión y la durabilidad. Pueden ser producidos en varios tamaños, pero el más común es 70x95x200 mm.

En USA se utiliza el ladrillo convencional y el tipo albañilería. Este último se construye de concreto de molde seco. Este tipo de ladrillo puede ser de cualquier tamaño, siendo más común en un rango de 200-300mm de grosor, 200-250mm de altura y 355-460 mm de largo.

Todo tipo de barrera de ladrillo requiere de una fundación de concreto. La barrera debe ser anclada a la fundación con barras metálicas de refuerzo. Barras verticales y horizontales se necesitan para incrementar la fuerza estructural de la barrera.

Se verifica la calidad del material del cual se fabrica este tipo de barrera mediante la siguiente evaluación:

- Fuerza compresiva: La fuerza compresiva de los ladrillos, el concreto utilizado para llenar los espacios dentro de la barrera, y el concreto utilizado en la fundación deben ser evaluados, debido a que son los componentes estructurales del sistema.

La Figura 4.26 muestra un ejemplo de barreras de ladrillo en etapa de construcción.



**Figura 4.26. Barrera de ladrillo tipo albañilería.**

#### 4.19.4 Barreras metálicas

Estas barreras son ampliamente utilizadas sobre todo por su relación costo/beneficio. Al momento de realizar esta tesis, este tipo de barreras es el único instalado en las autopistas del país.

Los tipos de metal más usados en barreras son:

1. Acero
2. aluminio
3. Acero inoxidable

Los paneles metálicos tienen una ventaja en cuanto a su peso, lo que lo hace un buen material para extensiones verticales y por ende barreras acústicas.

Este tipo de barrera es usualmente diseñado usando un panel de metal perforado frontal (cara hacia la fuente de ruido de tráfico), y un panel sólido trasero el cual no es perforado. La absorción está dada por el material instalado entre ambas caras, que generalmente cumple con las características absorbentes idóneas para un ambiente de ruido de tráfico. Muchas veces, en esta cara frontal, se intercala el panel absorbente metálico perforado con otro transparente reflectante, que permite una mejor luminosidad y visión del paisaje natural.

La Figura 4.27 muestra un ejemplo de barrera metálica.



**Figura 4.27. Barrera metálica**

#### 4.19.5 Barreras Transparentes

Las barreras transparentes, que por excelencia son de carácter reflectante, están construidas de vidrio laminado, templado o de algún producto plástico como el acrílico o el policarbonato. El vidrio templado está tratado con un proceso en el cual el calor aumenta su resistencia haciéndolo un material preparado contra impactos. Además de templado el vidrio puede ser laminado, que es un panel donde se adhieren dos capas de vidrio templado separadas de una capa compuesta por un material flexible y elástico. Cuando este material es impactado, el vidrio se quiebra granularmente en pequeñas piezas que no se desprenden de la capa elástica. Esto permite la mantención modular de la barrera.

Este tipo de material transparente en barreras es la forma ideal de prevenir el impacto visual y su uso está dirigido a:

- Prevenir la obstaculización de la vista de los conductores.
- Prevenir la obstaculización de la vista de los residentes.

Debido a que este tipo de barreras tiene un costo bastante elevado, la instalación de estas barreras suele ser una difícil decisión.

Los grosores típicos de las capas son 9-19 mm para vidrio y 15-20 mm para acrílico y poli carbonato. Un ejemplo de esta barrera se muestra en la Figura 4.28.



**Figura 4.28. Barrera transparente**

#### 4.19.6 Barreras de madera

La mayor función de este tipo de barreras es mantener un compromiso con el paisaje que lo rodea. En zonas donde existe una gran producción de madera es una buena alternativa para la construcción de estructuras viales, no tan solo barreras acústicas. Mantener el entorno utilizando barreras acústicas de madera, como podría ser en el Sur de nuestro país, es motivo de preocupación de algunos investigadores chilenos que ya estudian la materia.

Este tipo de material permite formar capas que pueden contener en su interior material absorbente. No obstante, existen barreras acústicas en madera que son reflectantes y otras absorbentes. Las latifoliadas (maderas rígidas), son utilizadas para barreras del tipo reflectantes, y las coníferas (maderas más blandas), son utilizadas para absorción.

Generalmente se sostienen en postes que pueden ser construidos de hormigón armado, acero o de madera maciza. Existen barreras acústicas en madera maciza, en especies de gran duración como el roble, el castaño y el irako, que no necesitan ningún tratamiento. En estos momentos la más utilizada es el pino. Todas estas estructuras, ya sea, hormigón-madera, madera-metal, o sólo madera, se soportan sobre soleras de hormigón cimentadas en apoyos individuales o continuos. Un ejemplo de barrera de madera (instalado en carreteras europeas), se observa en la figura 4.29.

**Figura 4.29. Barrera de madera absorbente.**

## 5. MATERIAL Y MÉTODO

### 5.1 Medición de espectro sonoro en Autopista del Itata

La necesidad de mejorar las vías que comunican las distintas zonas de nuestro país, crea inevitablemente el problema del incremento de los niveles de ruido en los sectores aledaños a las autopistas. De ahí que la optimización de las medidas de mitigación en esta etapa, se transforma un factor determinante para mantener o mejorar la calidad de vida de esas comunidades.

La experiencia práctica de este trabajo se enmarcó en una medición de la pérdida de inserción de una barrera acústica a escala real. Para la evaluación acústica de una barrera *in situ*, se hicieron mediciones de niveles de presión sonora en el tramo de la Autopista del Itata, Acceso Norte a Concepción. El tramo sometido a evaluación correspondió al kilómetro 15,7 donde se encuentra una barrera de 3 m de altura.

En primer lugar, para conocer las características de los niveles generados en esta autopista, se hizo una medición de 30 minutos a 10 metros del eje central y a 1,5 metros del suelo en horario punta 14:20 - 14:50 hrs. También se hizo un conteo de vehículos lo cual nos permite analizar la composición demandada por esta carretera. Los resultados se muestran en la Figura 5.1.

Humedad relativa: 65.5%	Vehículos livianos: 62.2 %
Temperatura: 25°C	Vehículos pesados: 37.8%

Espectro autopista Itata

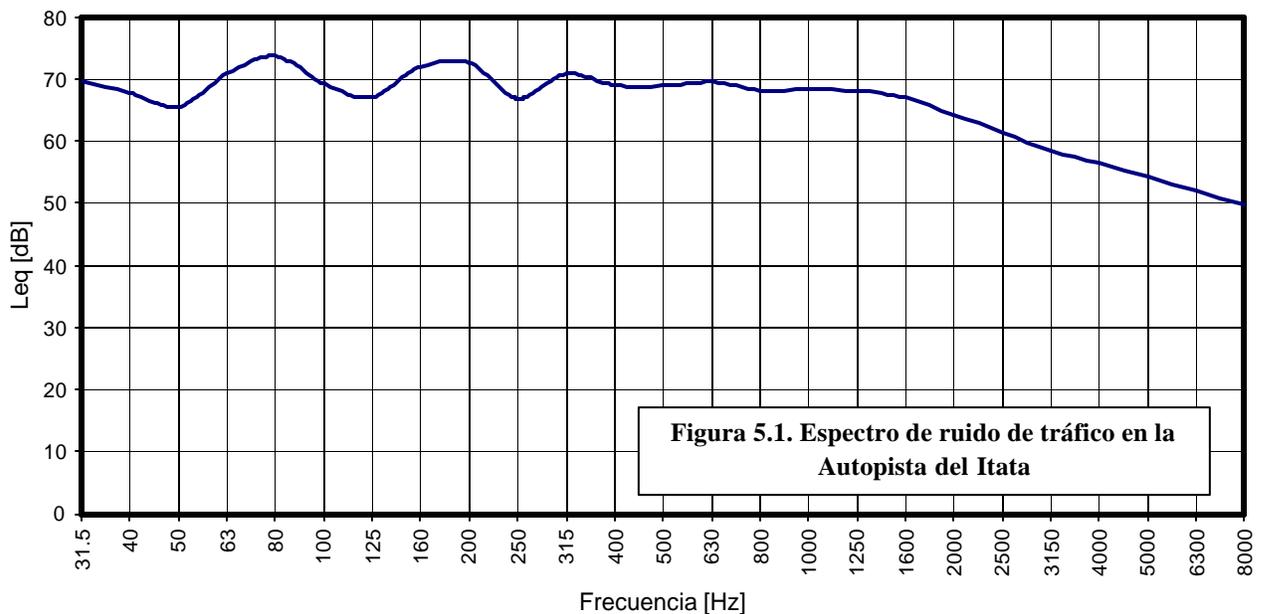


Figura 5.1. Espectro de ruido de tráfico en la Autopista del Itata

## 5.2 Características de la barrera acústica [26]



**Figura 5.2. Barrera Autopista del Itata.**

La barrera acústica instalada en la Autopista del Itata es una pantalla metálica fonoabsorbente construida mediante superposición de paneles modulares con relleno de lana mineral (ver Figura 5.2). El cuerpo del panel está constituido por dos chapas de aluminio formando una pared absorbente con perforaciones y una pared reflectante trasera. El peso por metro cuadrado es 12,7 Kg/m<sup>2</sup>. Consta de un panel perforado al 34 % que le permite garantizar las condiciones de absorción acústica necesaria. En su interior tiene 70 mm de lana mineral de una densidad de 70 Kg/m<sup>3</sup>.

Las características acústicas fueron ensayadas y certificadas por el Laboratorio de Acústica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de acuerdo a la Norma EN-1793 partes 1 y 2 dando los siguientes resultados:

- Absorción Acústica:  $DL_{\alpha} = 10$  dB; A3
- Aislamiento Acústico:  $DL_R = 25.9$  dB; B3

### 5.3 Ubicación de puntos de medición

Para realizar las mediciones se ubicó un lugar de la carretera que tuviera una topografía plana detrás de la barrera. Esto no se cumple a lo largo de todos los tramos de la barrera, por lo que se eligió el Km. 15,7.

Se construyó una grilla de puntos de medición, la cual sirve para la evaluación de la zona de sombra efectiva que existe tras la barrera como etapa mitigadora del ruido de tráfico generado en la Autopista del Itata.

La grilla consiste en un plano imaginario vertical perpendicular a la barrera, de 80 m<sup>2</sup> de superficie. Este plano tiene 4 m de altura y 20 m de longitud, y los 20 puntos de medición fueron elegidos equidistantemente cada 1 m de altura y 4 m de longitud. El punto 1 se encuentra a 1 m de altura y a una distancia de 4 m tras la barrera (ver Figura 5.3).

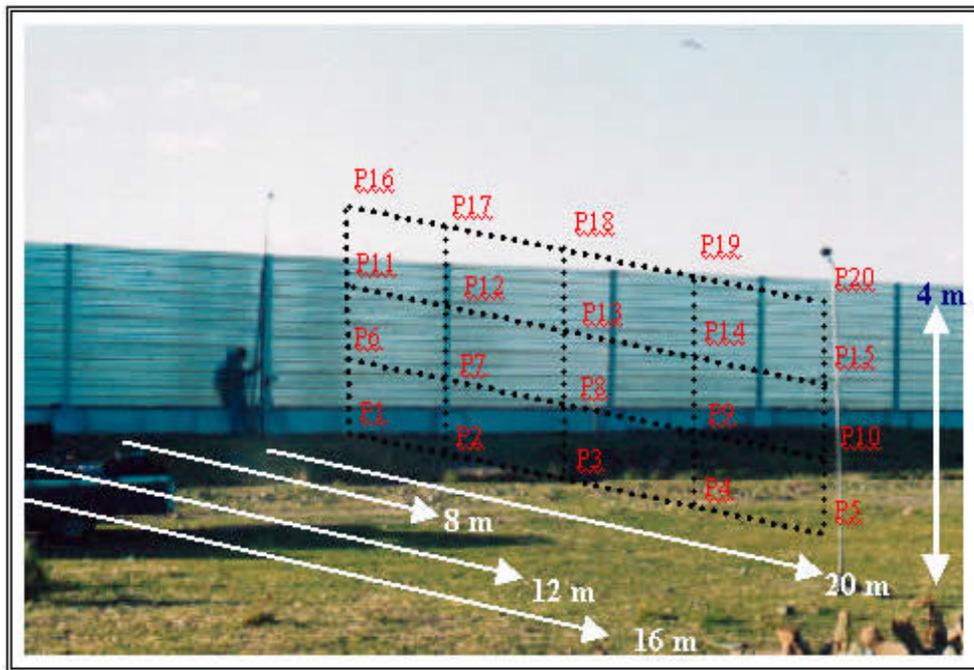
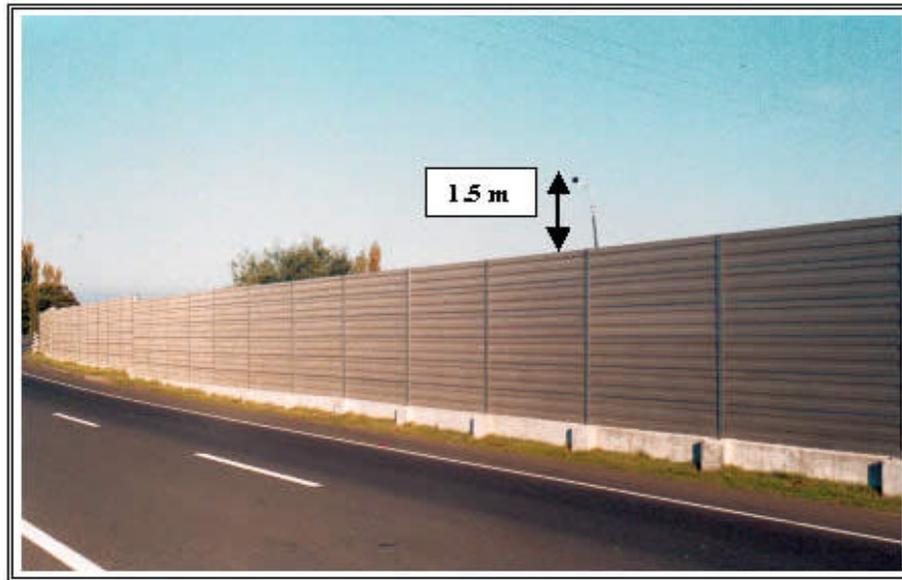


Figura 5.3. Grilla de puntos de medición.

## 5.4 Adquisición de señal

Se utilizaron dos micrófonos de campo libre conectados a distintos canales de un analizador de tiempo real. El micrófono del canal 1 estaba en una posición fija a 1,5 metros sobre el borde superior de la barrera (ver Figura 5.4).



**Figura 5.4. Micrófono fijo de referencia.**

Este micrófono es la referencia para captar el nivel directo desde la carretera. Este registro se utilizó para el cálculo de los niveles equivalentes en cada uno de los puntos de la grilla, existentes antes de la instalación de la barrera. Esta situación nos permitirá hacer la comparación “antes”-“después”.

El micrófono correspondiente al canal 2 del analizador, toma las 20 posiciones en la grilla de la zona de sombra. Los espectros registrados en este canal corresponden al nivel de ruido difractado por la barrera acústica.

Se estableció un tiempo aproximado de captación simultánea de ambos canales de 5 minutos por punto, cuidando en cada caso la estabilización del  $Leq$  y del flujo vehicular.

Las mediciones se hicieron en horario diurno un fin de semana, que es donde existe mayor demanda de esta autopista.

El registro se hizo linealmente para poder hacer una comparación con los algoritmos teóricos de barreras acústicas. Los datos fueron trasladados a un PC mediante el Software RTAUTIL 32-bit.

## 5.5 Materiales

Los equipos utilizados fueron facilitados por la empresa CONTROL ACUSTICO Ltda., y se listan a continuación:

- 1) Analizador en tiempo real Larson Davis 2900 de dos canales, con filtros de 1/3 de octava
- 2) Calibrador de Niveles Sonoros Larson Davis modelo CAL200
- 3) 2 Micrófonos de campo libre de 1/2" Larson Davis modelo 2541
- 4) Pre-Amplificador de Micrófono Larson Davis modelo PRM-900B
- 5) Higo-termómetro *Extech* modelo 445900
- 6) Atriles de 4 metros para elevar los micrófonos
- 7) Huincha de medir
- 8) Disquetera DVX003 Larson Davis para respaldo de datos
- 9) Software Larson Davis RTAUTIL 32-bit interfaz, Analizador-PC
- 10) Software SoundPLAN™ versión Windows y DOS [27]

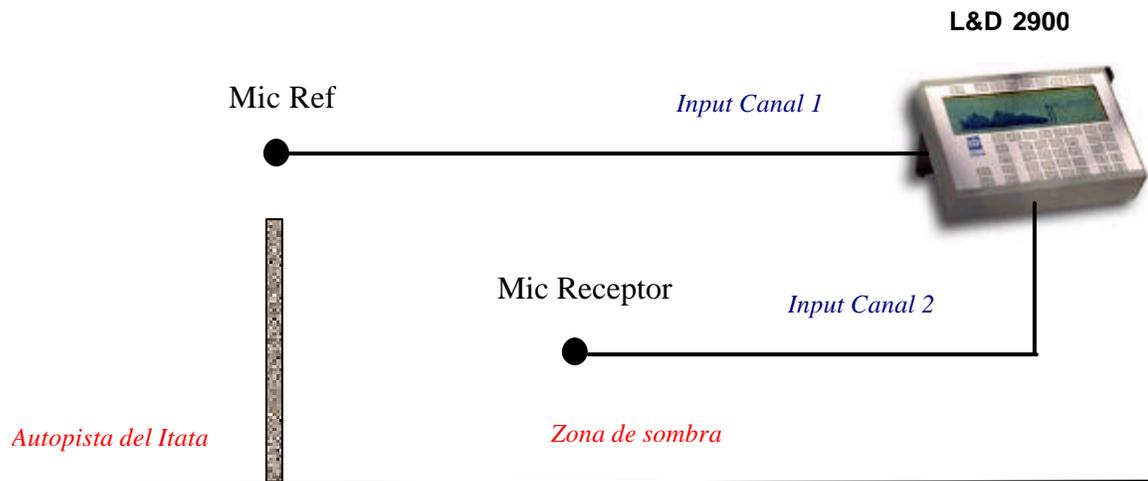


Figura 5.5. Registro de la señal.

## 6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las distancias en terreno fuente-barrera, barrera-receptor, altura de barrera y alturas de fuente y receptor, son los datos necesarios para predecir el comportamiento teórico de la barrera.

Utilizando los algoritmos expresados en la sección teórica de esta tesis se obtiene la pérdida de inserción por punto espectralmente para las frecuencias centrales de las bandas de 1/3 de octava, mediante el cálculo del Número de Fresnel. Estos resultados pueden ser contrastados luego con la pérdida de inserción que se obtiene al realizar las mediciones.

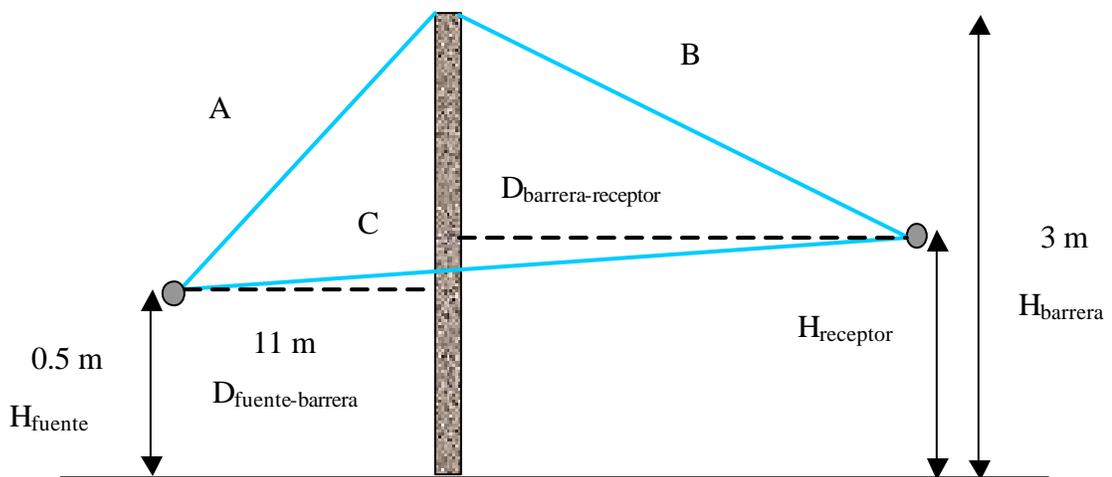


Figura 6.1. Distancias en terreno.

La Figura 6.1 indica los datos fijos que corresponden a la altura de la fuente, distancia del eje central hasta la barrera y la altura de la barrera. Todos los demás datos son variables y dependen de la posición en la grilla de medición.

A, B y C corresponden a las variables necesarias para el cálculo del número de Fresnel. Se construyó una planilla de cálculo Excel para facilitar la entrega y precisión de los datos. En ésta, se ingresan las distancias en línea recta y tras calcular el número de Fresnel por frecuencia entrega finalmente el gráfico espectral de pérdida de inserción teórica según los algoritmos de Kurze-Anderson, Tatge, Rathé, Maekawa, ISO 9613, por cada punto, expresados en las Ec. 4.39-4.42 y Ec. 4.45.

En la planilla, también se ingresan los niveles de ruido registrados por los canales del analizador en cada punto de la grilla de la zona de sombra. Mediante una corrección por distancia del canal 1, punto de referencia, se estima el nivel de ruido que existía en cada punto antes de la instalación de la barrera.

Con estos datos, el nivel de la situación “antes” captado por el canal 1 y el nivel de la situación “después” captado por el canal 2, se puede calcular la pérdida de inserción práctica, a través de la Ec. 4.13.

Así, la planilla entrega un gráfico por punto de la pérdida de inserción teórica de los algoritmos mencionados anteriormente y la pérdida de inserción practica, medida *in situ*. El algoritmo de análisis se muestra en la Figura 6.2.

De estos gráficos se eligieron puntos representativos para mostrar la formación de la zona de sombra y la pérdida de inserción en algunos de estos puntos tras la barrera.

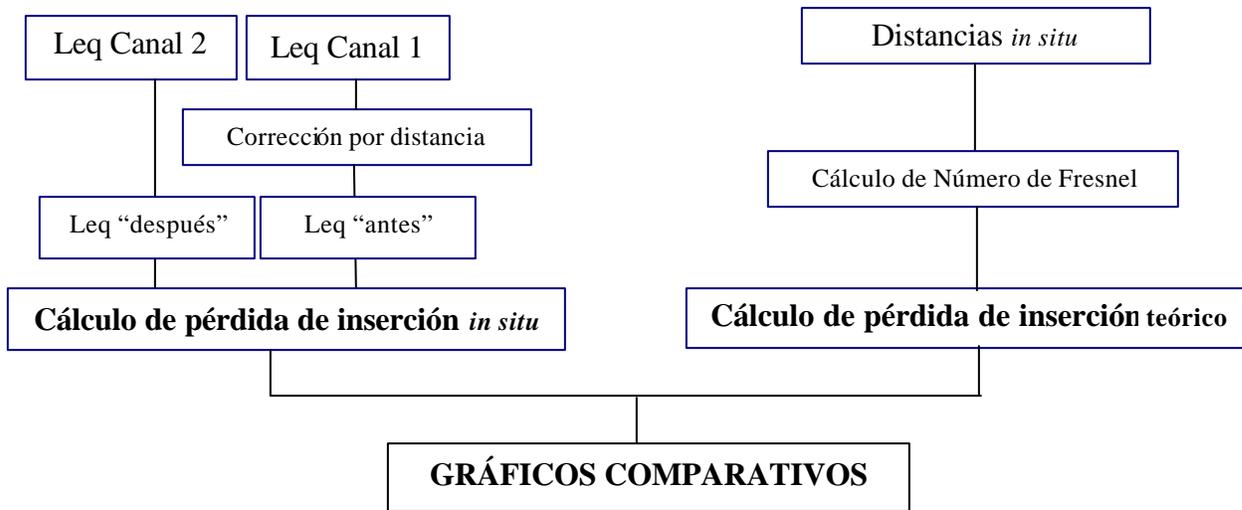
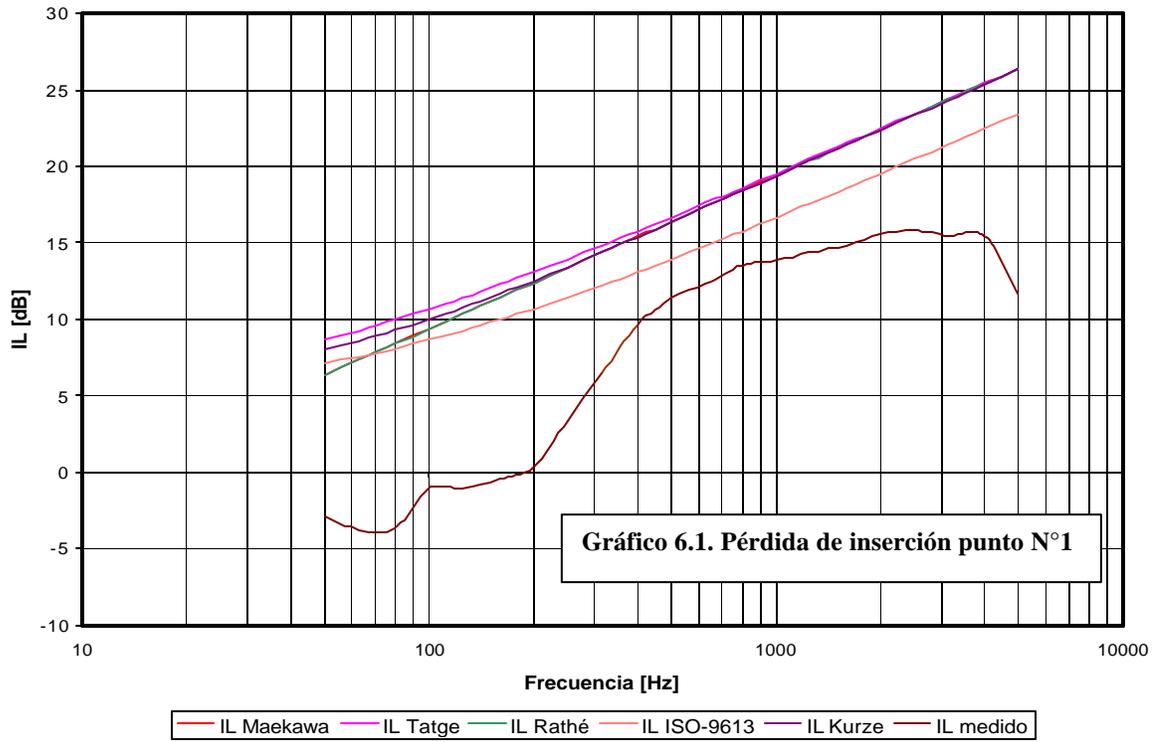


Figura 6.2. Algoritmo de análisis.

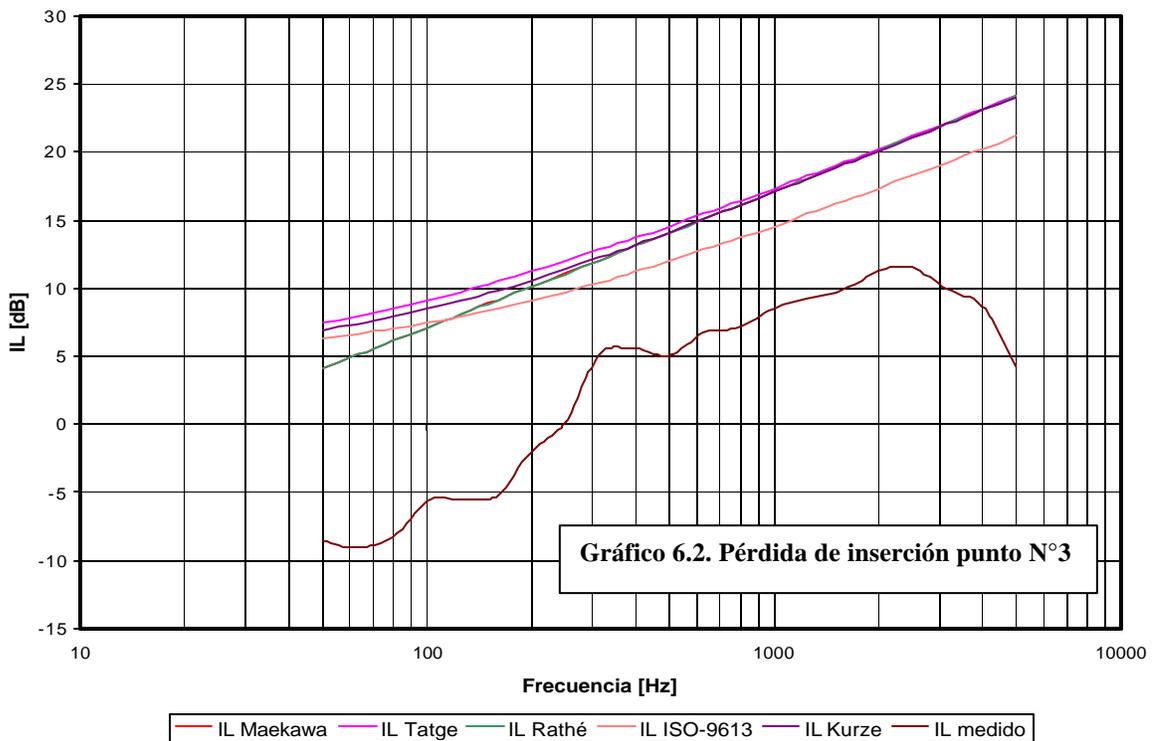
A continuación, se muestran los gráficos de pérdida de inserción por frecuencia de 3 puntos de medición por cada altura de la grilla, según lo que indica la Figura 5.3.

Humedad relativa	55,6% - 54,2%
Temperatura	33,3 °C - 17,4°C
Velocidad del viento	1 m/s – 1,8 m/s
Hora de medición	15 Hrs – 18 Hrs

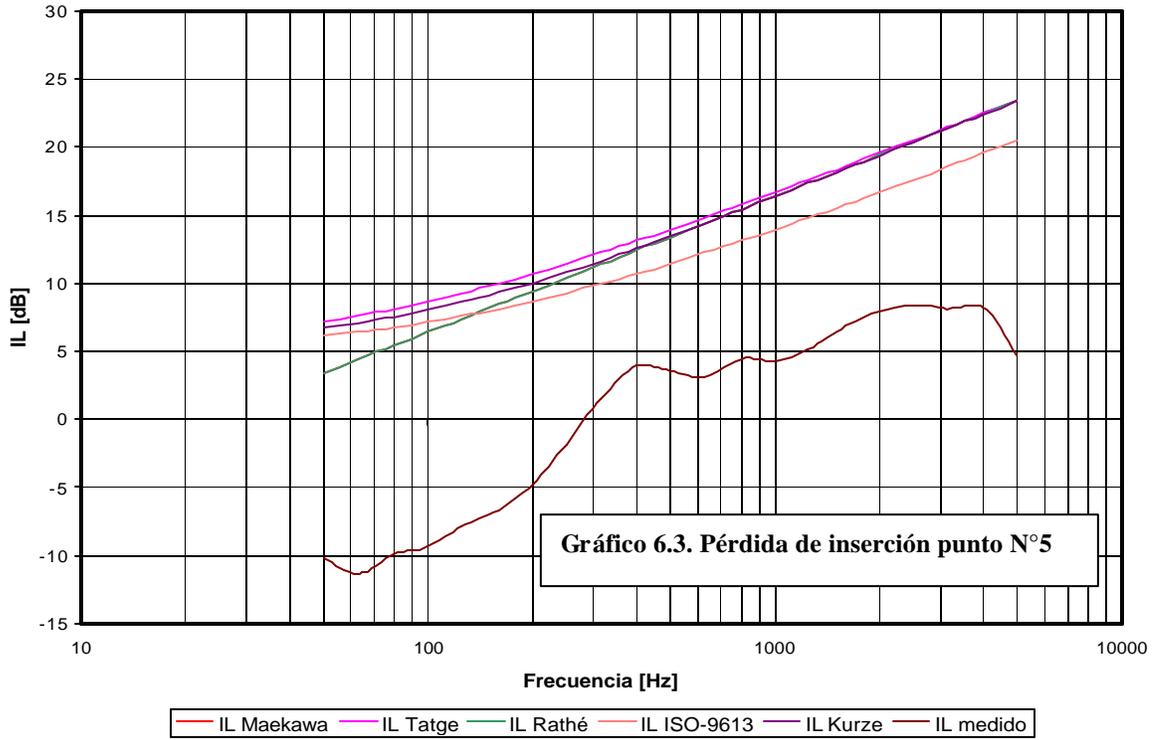
Pérdida de Inserción Punto N° 1



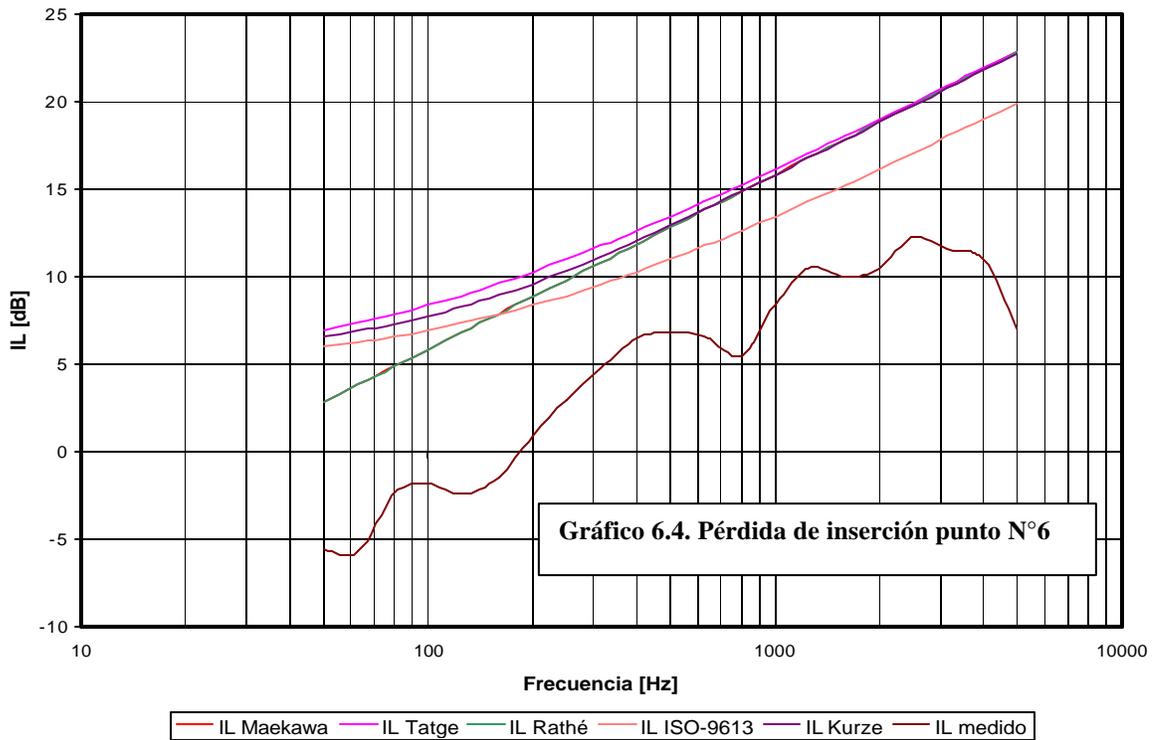
Pérdida de Inserción Punto N° 3



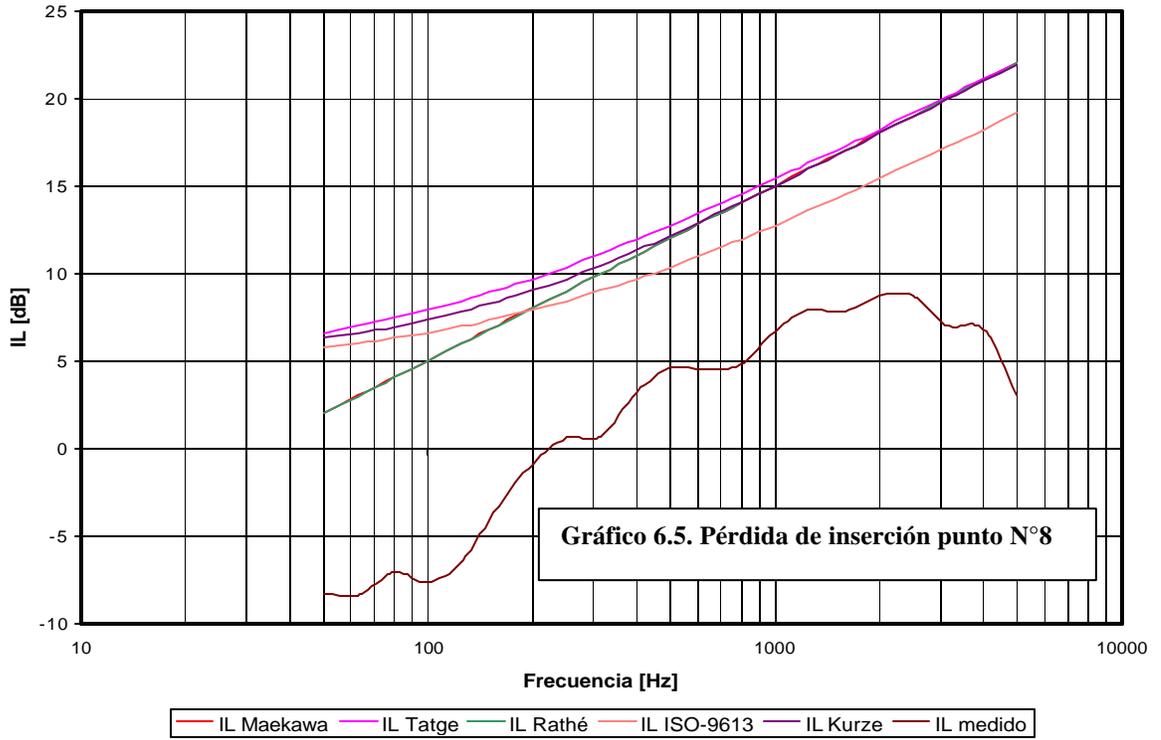
**Pérdida de Inserción Punto N° 5**



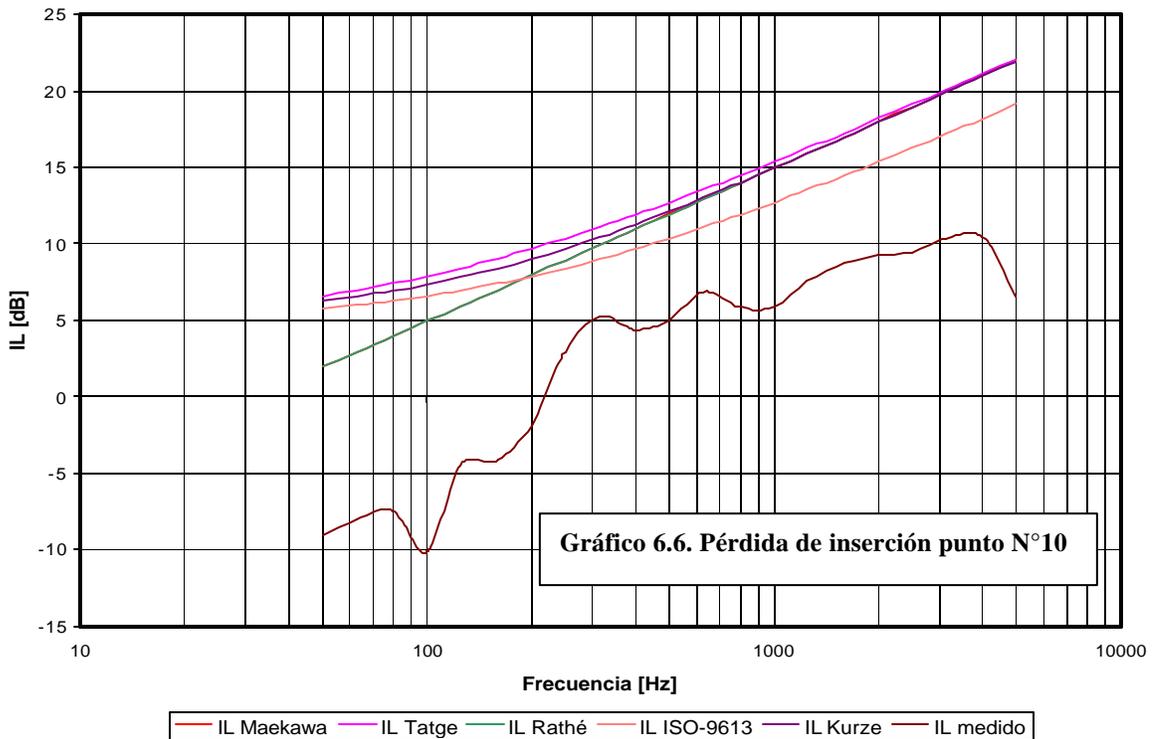
**Pérdida de Inserción Punto N° 6**



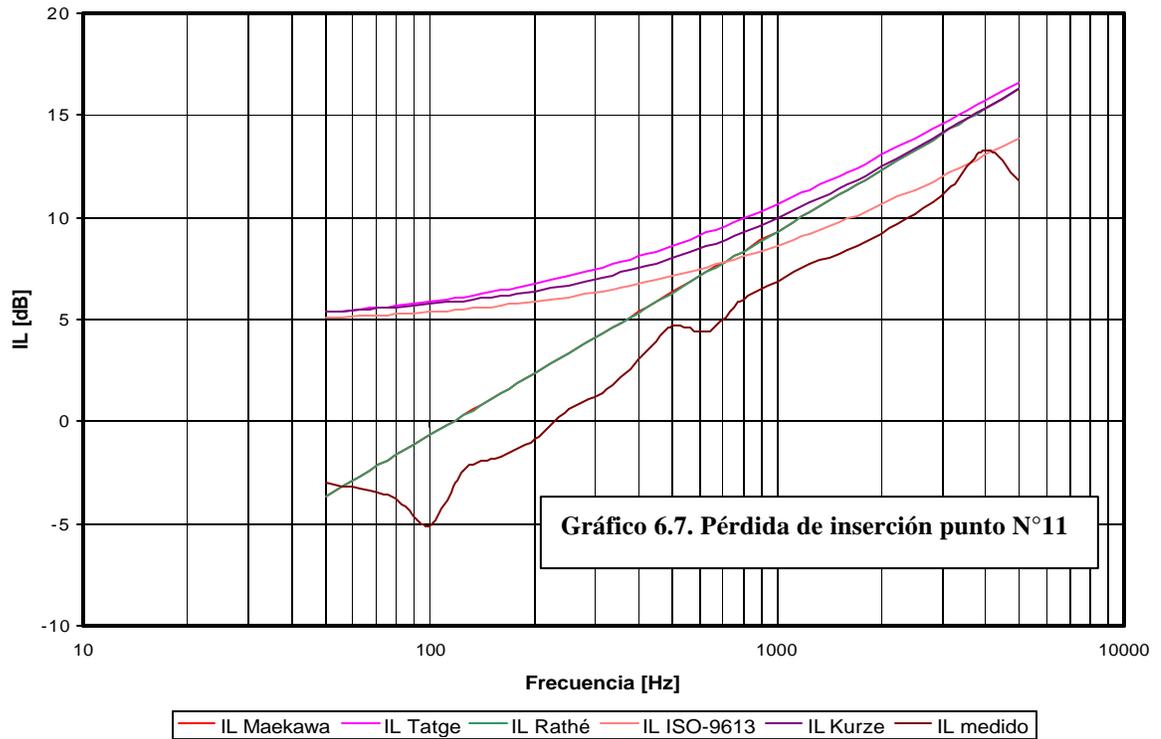
**Pérdida de Inserción Punto N° 8**



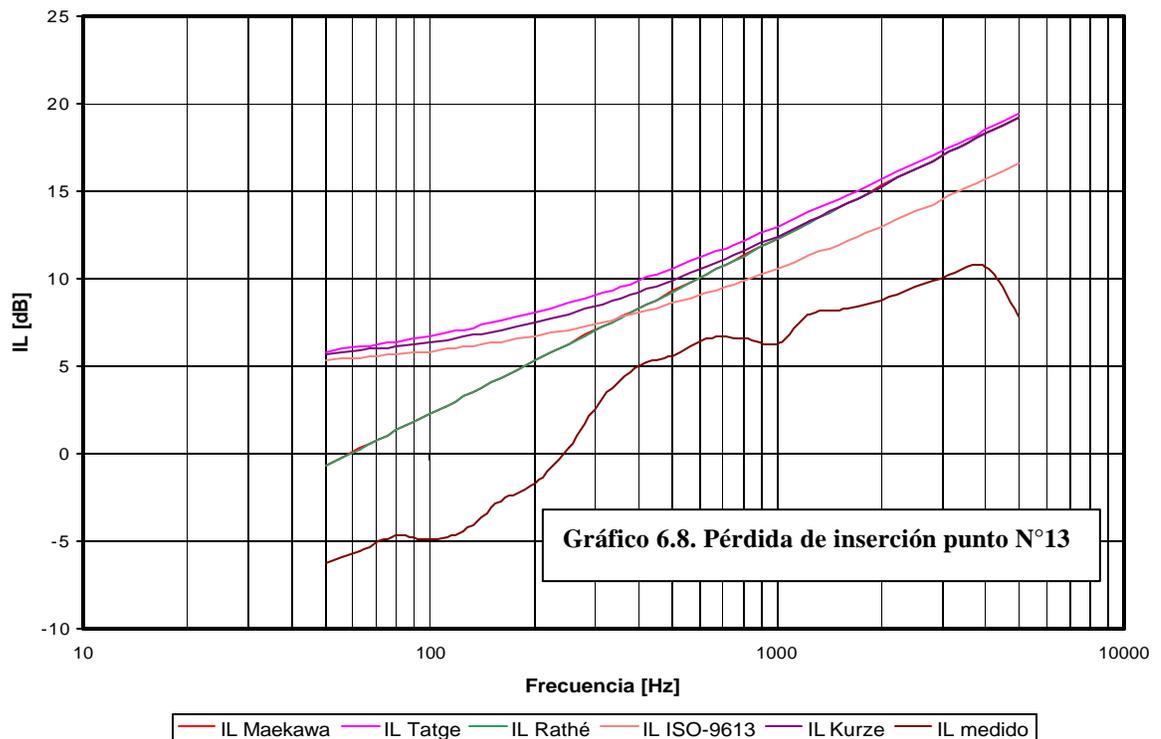
**Pérdida de Inserción Punto N° 10**



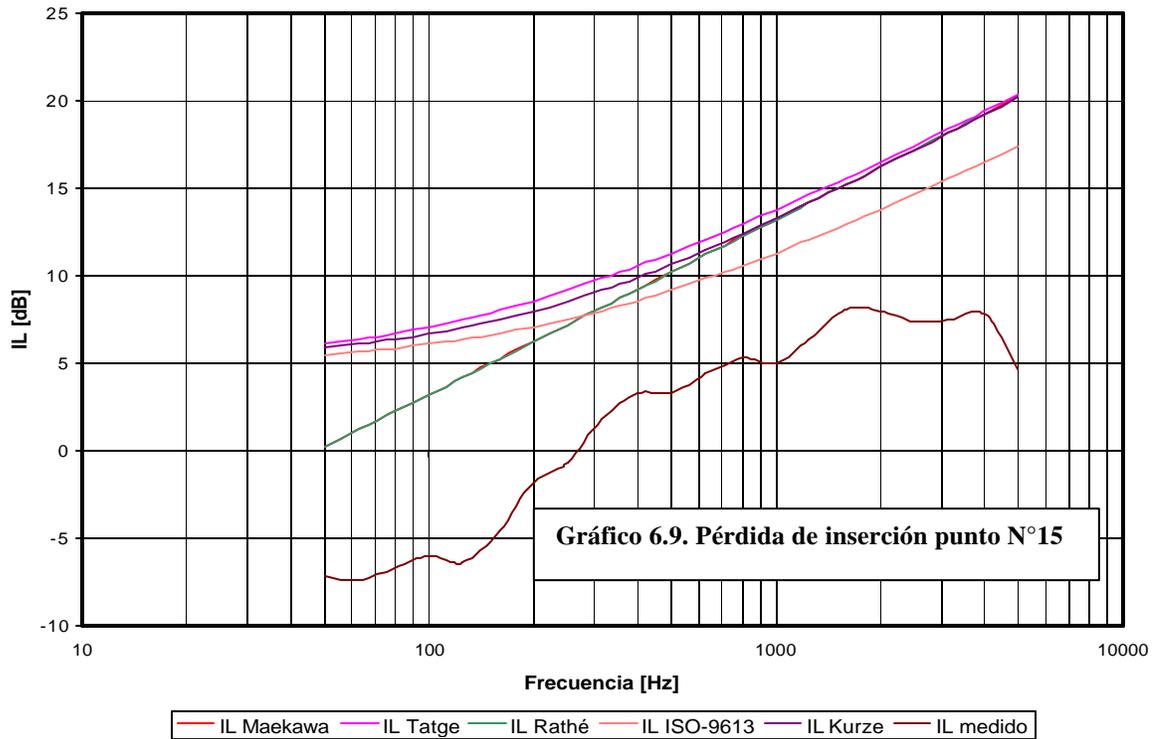
**Pérdida de Inserción Punto N° 11**



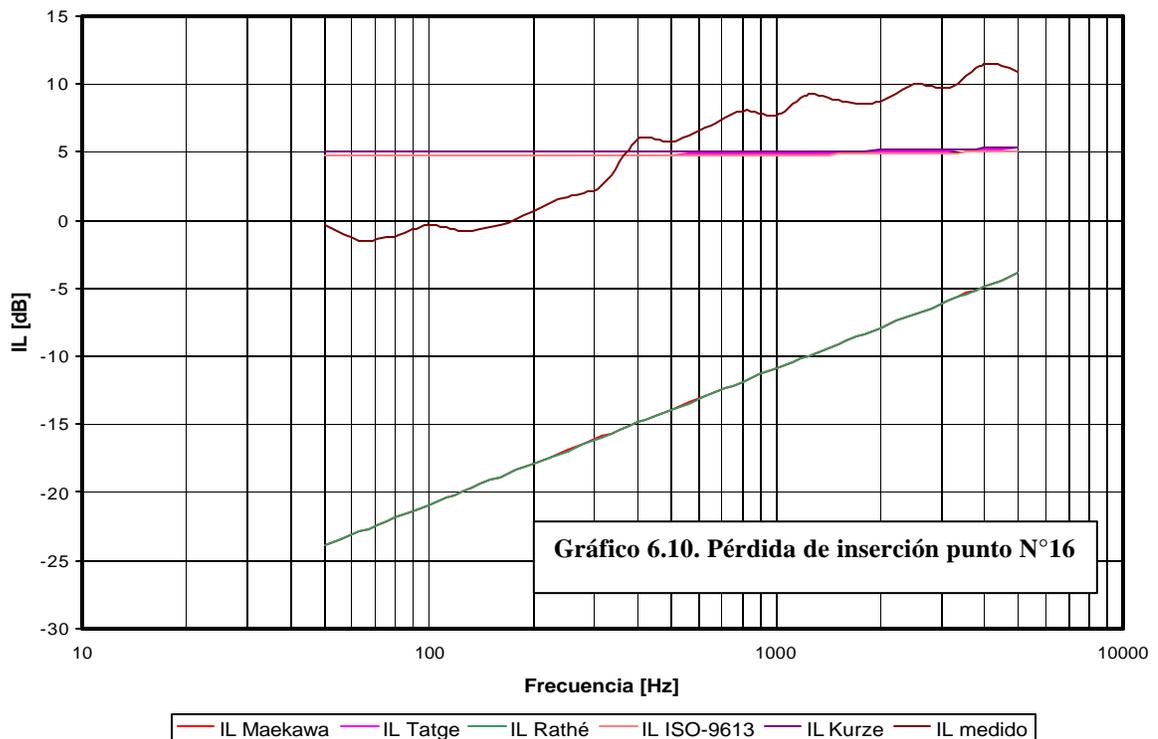
**Pérdida de Inserción Punto N° 13**



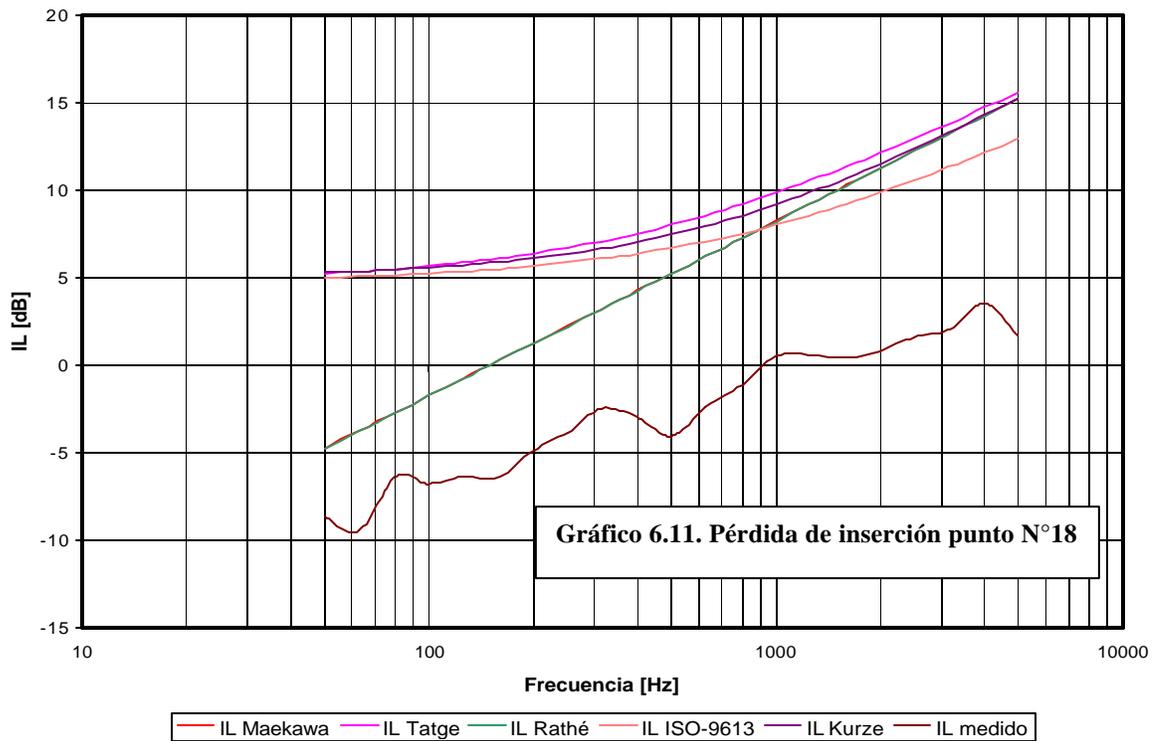
**Pérdida de Inserción Punto N° 15**



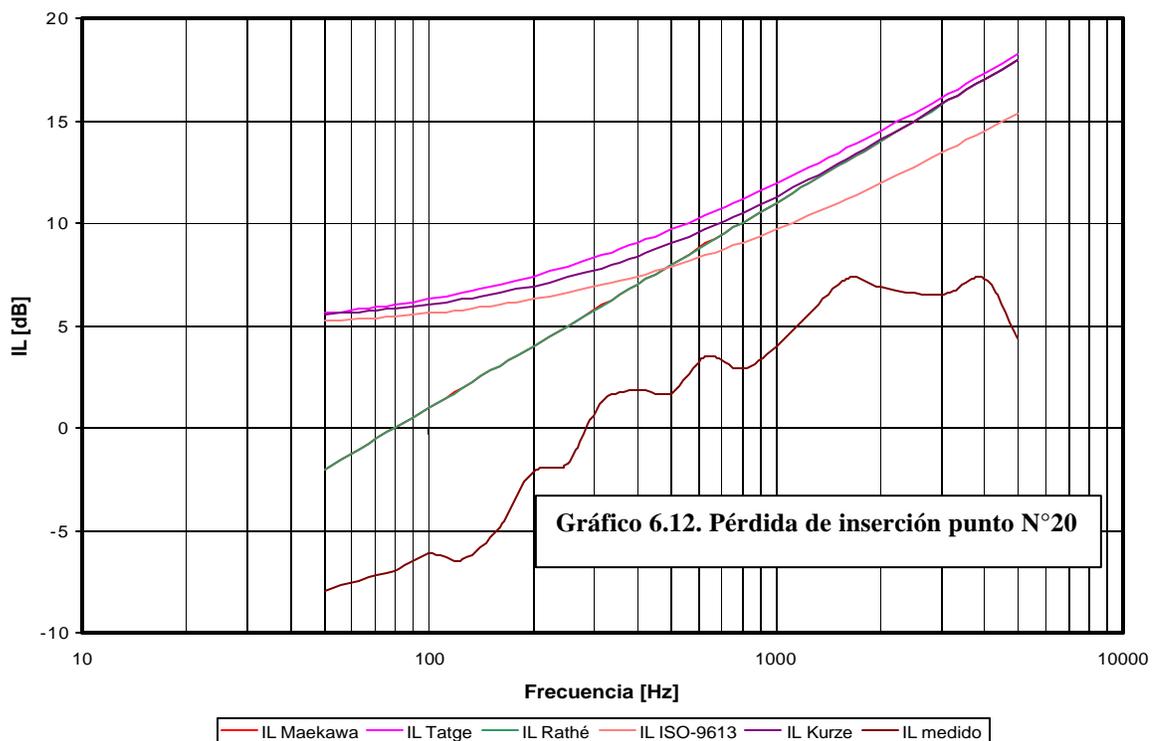
**Pérdida de Inserción Punto N° 16**



**Pérdida de Inserción Punto N° 18**



**Pérdida de Inserción Punto N° 20**

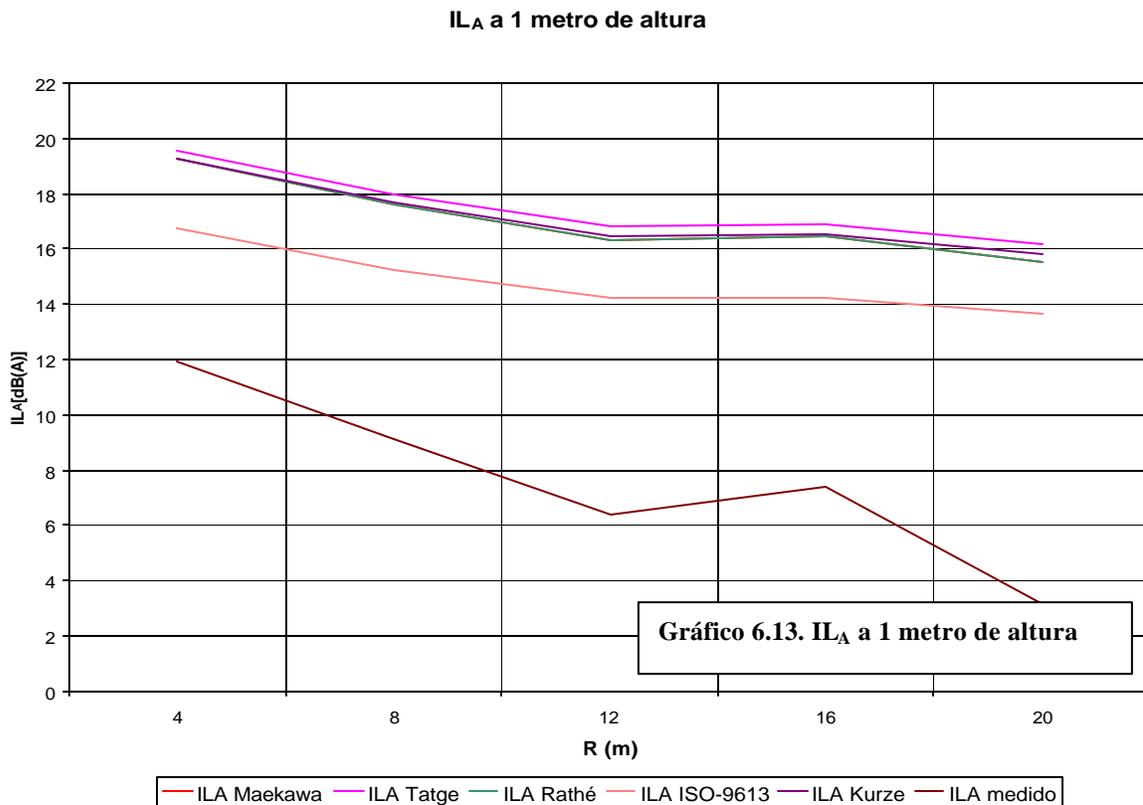


### 6.1 Cálculo de $IL_A$

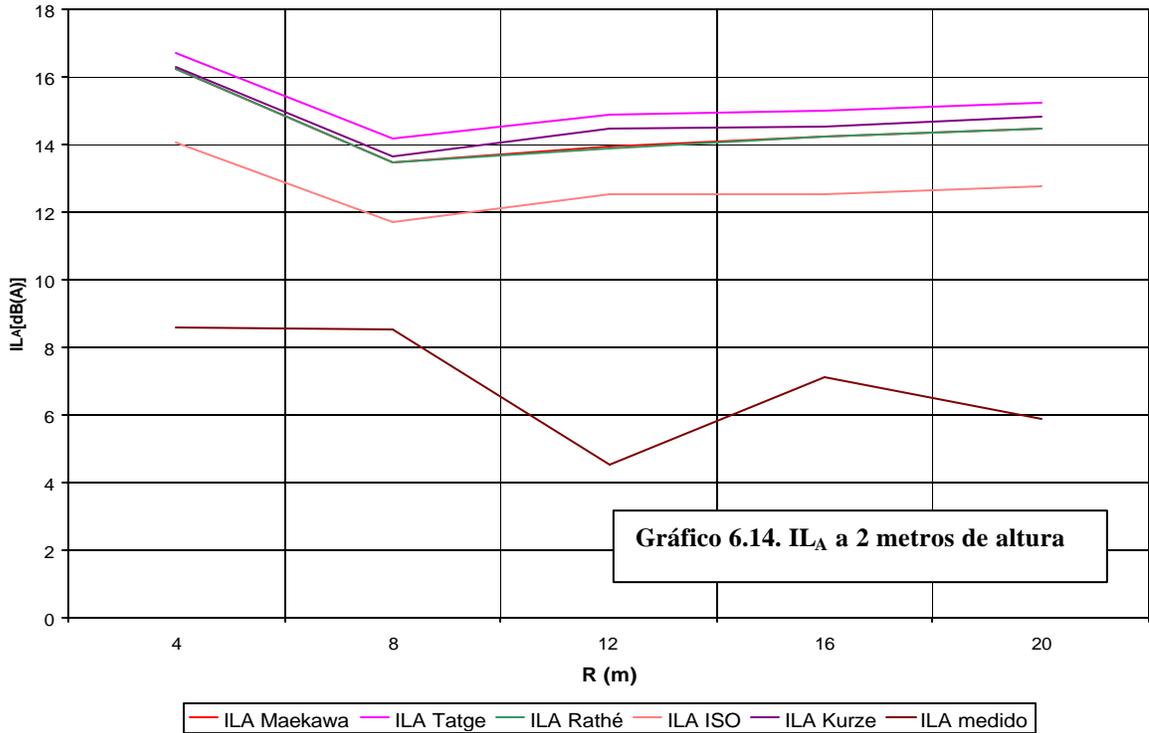
Tomando en cuenta la expresión de la Ec. 4.49, podemos calcular, el índice global de la pérdida de inserción en dB(A).

Este índice tiene por objeto, valorizar en un número único la pérdida de inserción en cada punto. De esta manera podemos tener una valorización más cómoda para analizar la zona de sombra creada por la difracción de la barrera.

Se construyó un gráfico por altura, donde la variable pérdida de inserción ponderada en A depende de la distancia tras la barrera. Luego con estos 4 gráficos se logra tener toda la información de los puntos de la grilla.

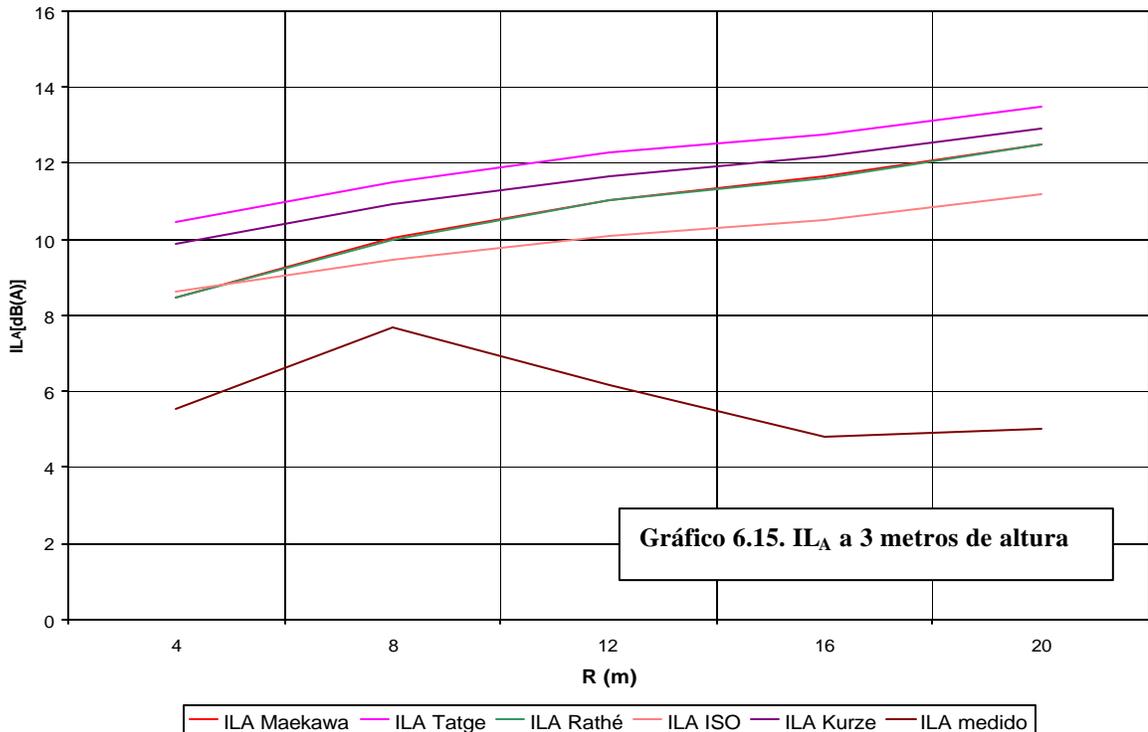


**IL<sub>A</sub> a 2 metros de altura**

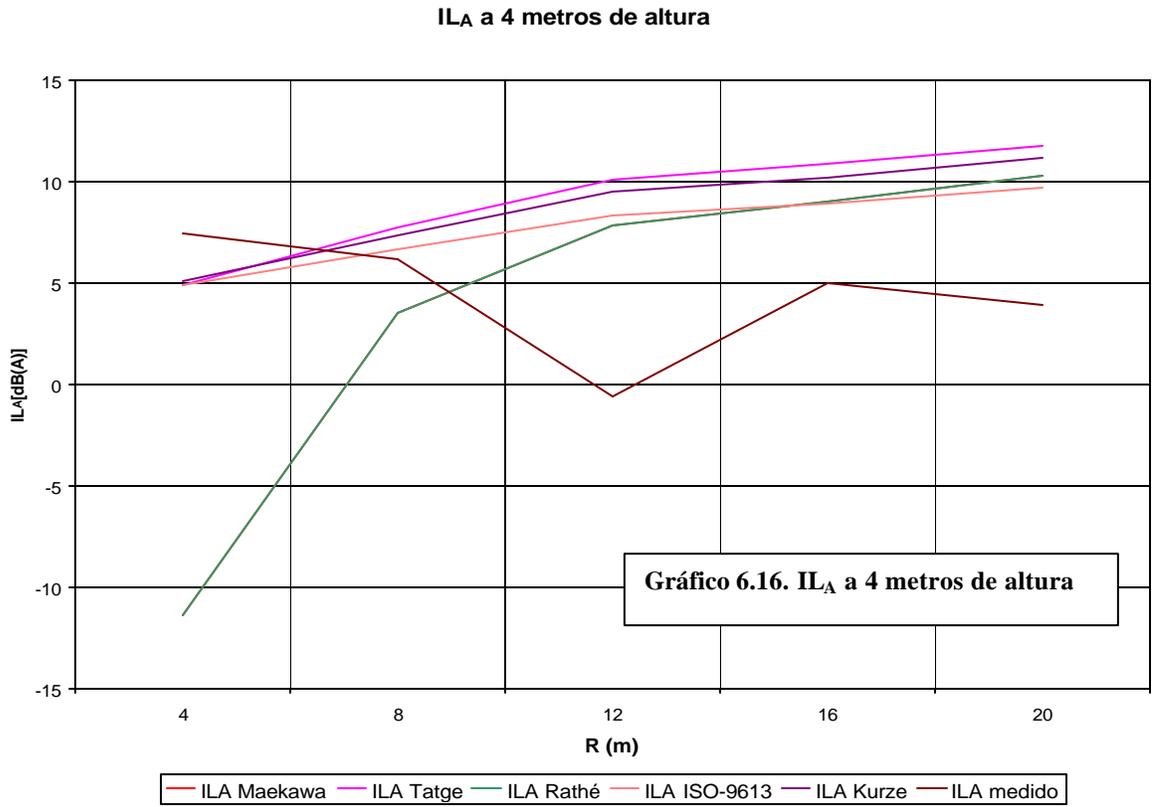


**Gráfico 6.14. IL<sub>A</sub> a 2 metros de altura**

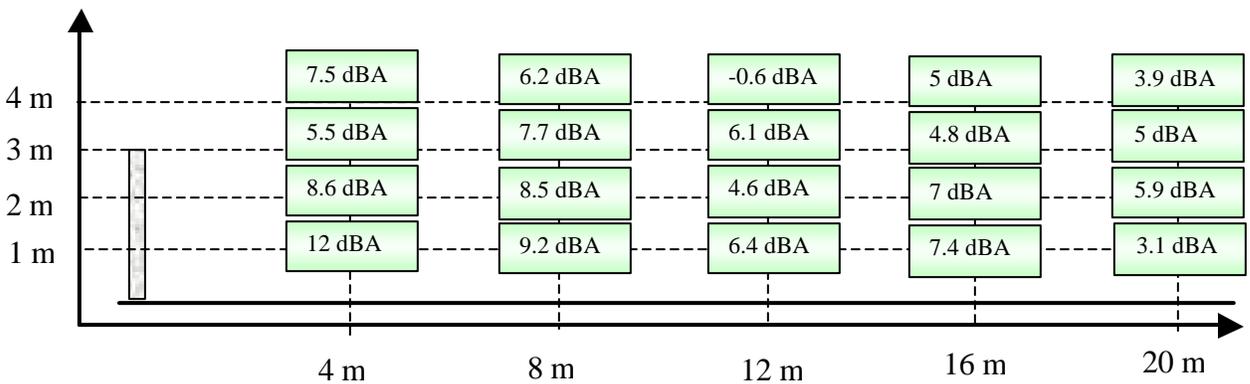
**IL<sub>A</sub> a 3 metros de altura**



**Gráfico 6.15. IL<sub>A</sub> a 3 metros de altura**



La Figura 6.3, muestra la valoración global de la pérdida de inserción en cada punto de la grilla. Los ejes representan la distancia horizontal desde la barrera y vertical desde el suelo.

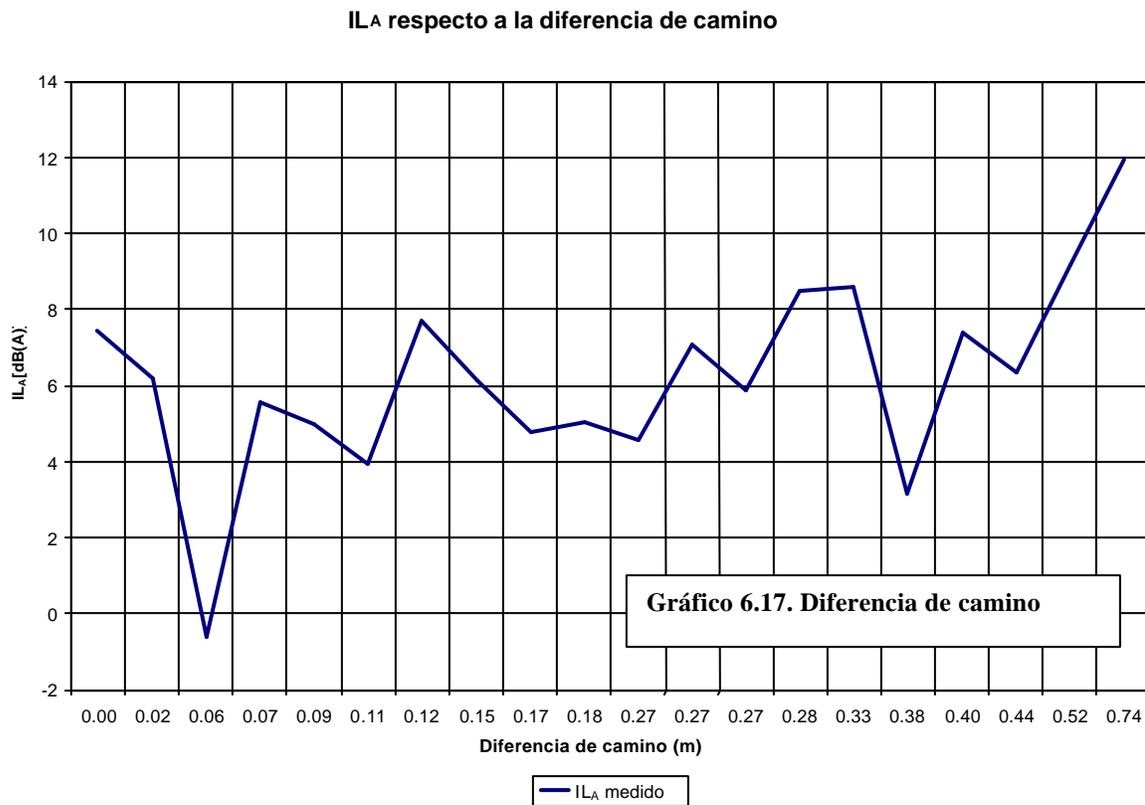


**Figura 6.3. IL<sub>A</sub> medidos.**

## 6.2 Diferencia de camino

La diferencia de camino recorrido por el frente de onda propagado desde la carretera, tiene directa incidencia en la pérdida de inserción. Este parámetro es utilizado en el Número de Fresnel para el cálculo de la eficiencia acústica de la barrera. Es otra forma de representar la pérdida de inserción dependiendo de la distancia, pero a diferencia de los gráficos anteriores, éste integra las distancias horizontales y verticales en un solo gráfico.

La diferencia del camino recorrido por la onda difractada y la onda directa antes de la instalación de la barrera se muestra en el siguiente gráfico.



El Gráfico 6.17 muestra la pérdida de inserción medida versus la diferencia de camino, permitiendo graficar una variable independiente de la frecuencia en todo los puntos de la grilla de medición.

### 6.3 Modelación SoundPLANä [27]

Para contrastar las mediciones realizadas *in situ*, se realizó una modelación sonora con el programa de predicción SoundPLAN™ 5.0. Con este software se crea una situación sonora de propagación en exterior que simula el evento ocurrido en terreno.

Se crearon los mapas de ruido ingresando los siguientes datos:

- Los datos topográficos de la Autopista del Itata en el tramo correspondiente, desde un plano Autocad.
- Los datos de flujo vehicular de la Autopista del Itata para la utilización de la Norma Alemana RLS-90.
- Ubicación de receptores simulando la grilla utilizada en terreno.

Los mapas se subdividieron en las situaciones “antes” y “después” de la instalación de la barrera acústica. Cada mapa de ruido muestra las curvas de igual nivel de ruido ponderado en cortes transversales. En total, se realizaron 3 mapas: 2 para las situaciones con y sin barrera, y 1 mapa que representa la pérdida de inserción.

La modelación, entrega también los niveles puntuales en cada receptor insertado en el GEO File, archivo administrador de las características topográficas. Esto nos permite obtener los niveles de ruido en los mismos puntos medidos *in situ* y calcular la pérdida de inserción haciendo una resta de las situaciones “antes” y “después”. Los resultados son niveles globales ponderados en A.

En la Figura 6.4 se muestra la pérdida de inserción puntual ponderada A que entregó el software:

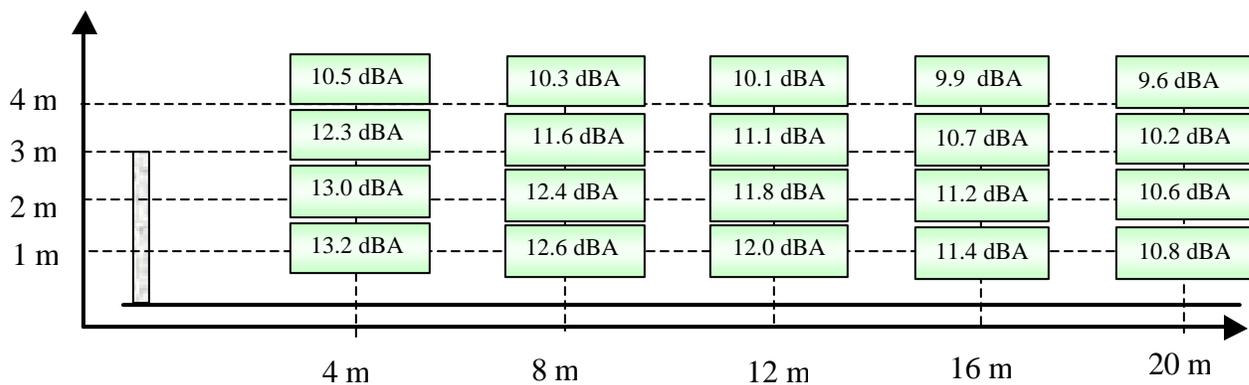


Figura 6.4.  $IL_A$  calculado por SoundPLAN™.

Los mapas de ruido SoundPLAN™ son los siguientes:

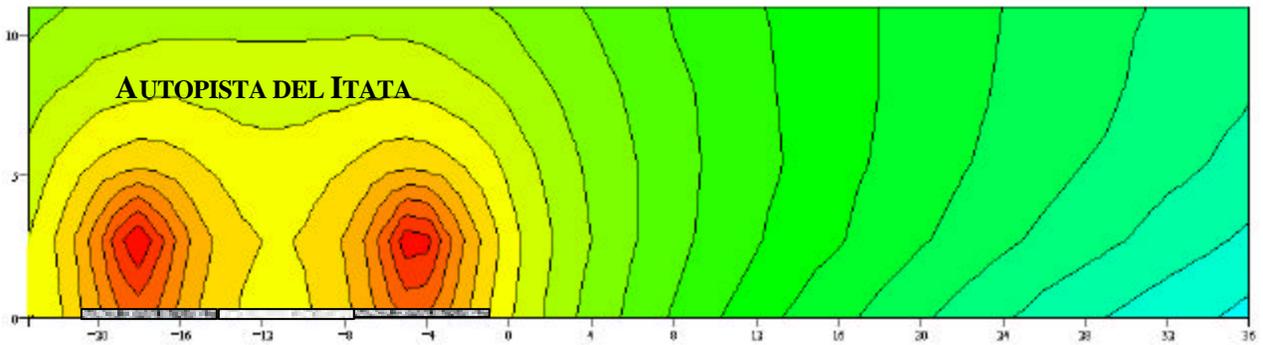


Figura 6.5. Mapa de ruido de la situación "antes".

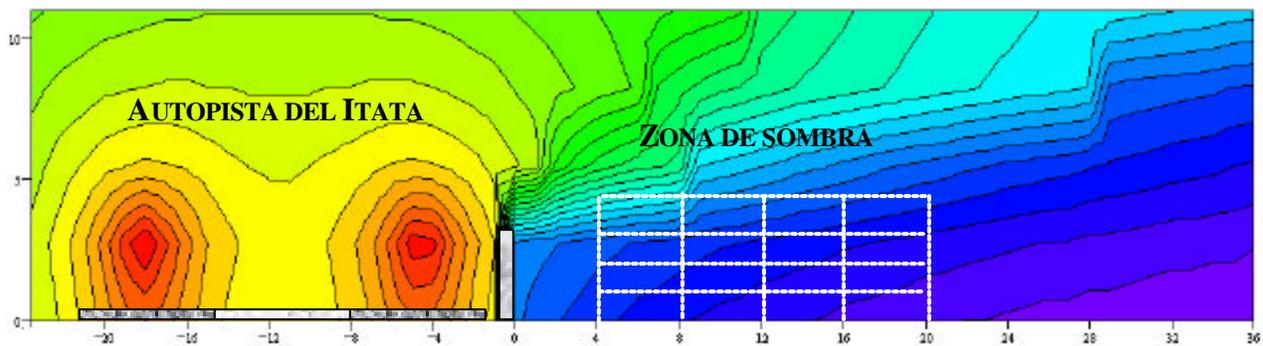
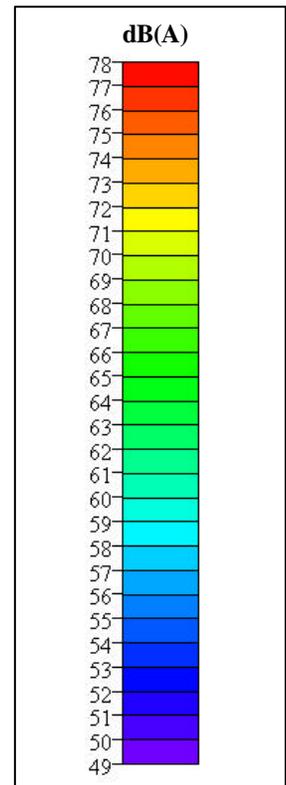


Figura 6.6. Mapa de ruido de la situación "después".

Los mapas muestran los niveles de ruido antes y después de la instalación de la barrera. La escala de color a la derecha indica las curvas de igual sonoridad. Se representa también en los mapas la grilla de medición utilizada tras la barrera. Estas posiciones de micrófonos son las mismas usadas para la elección de receptores en el software SoundPLAN.

Los ejes en las figuras detallan las distancias medidas en metros.



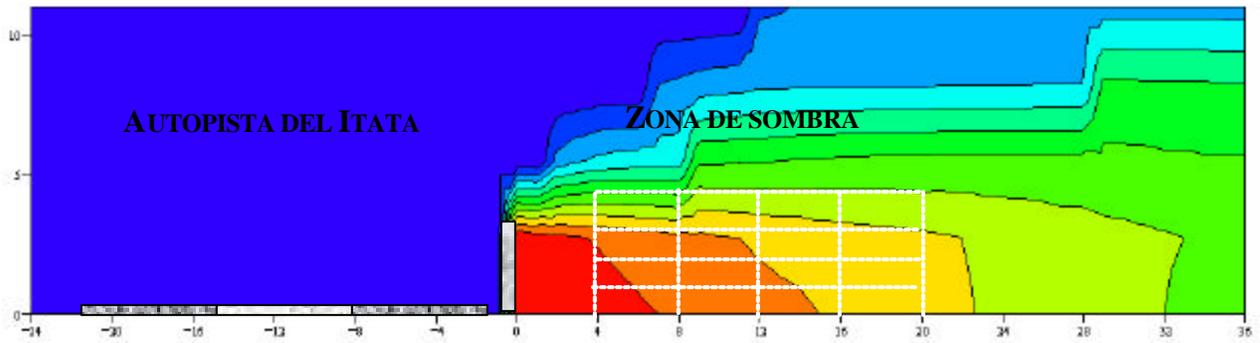
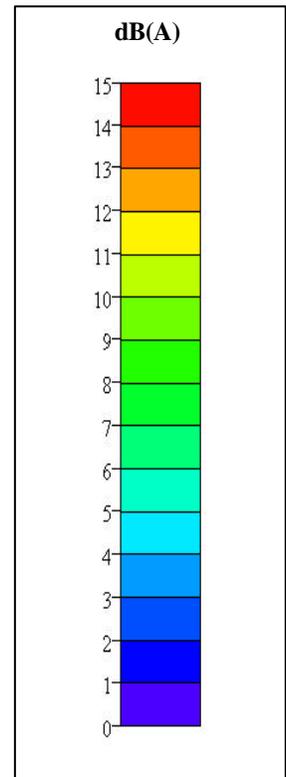


Figura 6.7. Mapa de ruido de pérdida de inserción.

Este mapa de ruido corresponde a la pérdida de inserción de la barrera acústica. Es la resta de niveles de ruido de las situaciones “antes” y “después”.

Se observa la formación de la zona de sombra, que se crea debido a la obstaculización sonora proporcionada por la barrera acústica.

La escala a la derecha representa los valores de atenuación en cada zona.



## 6.4 Discusión de resultados y conclusiones

- La comparación de los algoritmos teóricos con la pérdida de inserción calculada luego de las mediciones en terreno, muestra ciertos patrones en común. La correlación entre los distintos algoritmos muestra una tendencia muy similar entre ellas. Esto es debido a la similitud algebraica de sus expresiones, notándose ampliamente en la fusión de las curvas de pérdida de inserción de Maekawa y Rathé.
- La corrección por distancia que se aplicó a los niveles captados como referencia, fue considerando fuente lineal, es decir,  $L = L_{ref} - 10 \log(d)$ . Esta divergencia cilíndrica permite obtener la situación acústica en cada uno de los puntos de la grilla antes de la instalación de la barrera [28]. De esta forma se puede comparar los algoritmos teóricos con el práctico. La pérdida de inserción medida siempre dio valores menores que los teóricos .
- El algoritmo que presenta la Norma ISO 9613-2 muestra siempre los resultados más conservadores. Esto mismo lo hace ser el algoritmo teórico de pérdida de inserción que presenta los resultados más cercanos a los calculados a partir de las mediciones.
- Aunque la memoria técnica de la barrera acústica instalada en la Autopista del Itata [26] tiene una clasificación de B3 según la norma EN-1793-2, el aislamiento acústico de ruido aéreo es deficiente para baja frecuencia. La memoria técnica contiene el ensayo realizado en los laboratorios del Instituto de Acústica del CSIC, España. Esta curva de aislamiento grafica la atenuación menor que 20 dB bajo los 250 Hz. Esto sumado con la composición de 38% de vehículos pesados y los peaks de baja frecuencia en el espectro medido de la autopista en la Figura 5.1, son la causa de los valores negativos de la pérdida de inserción en los puntos de la grilla.
- La diferencia de los valores medidos con los algoritmos teóricos se puede explicar por la cercanía del micrófono de referencia (a 1,5 metros sobre la cumbre), con el borde difractante. Esta zona, definida por la Teoría de Keller [29], produce variación de los niveles de presión sonora y cambios en la frecuencia del sonido difractado.

- Según la Ec. 4.54 la atenuación por concepto de aislamiento al ruido aéreo debe ser 10 dB mayor que la que se produce por la onda difractada en el borde de la barrera. Al ser menor a 20 dB y tener una caída bastante abrupta bajo los 200 Hz, el aislamiento al ruido aéreo de la barrera ensayada muestra que no podría ser muy efectiva como elemento difractante en ese rango de frecuencias.
- La masa de este tipo de barrera metálica, dependiendo de sus fijaciones al terreno y su instalación, adoptará modos resonantes en baja frecuencia que disminuirá aún más la eficiencia de atenuación al ruido aéreo ensayada en laboratorio. Esto se traduce en una transmisión del ruido de tráfico que provoca en ciertas frecuencias incrementos de los niveles de ruido en las zonas más cercanas a la barrera.
- La absorción acústica ensayada muestra que la barrera tiene un índice  $DL_a$  de 10 dB según la Norma EN 1793-1. Espectralmente tiene su máximo de absorción en 1 KHz con  $\alpha = 0.99$ . El resto de las bandas centrales de octavas de frecuencia que fueron ensayadas muestran coeficientes de absorción menores. Esto se logró con orificios de 3, 4, 5 y 6 mm con una perforación de 34 %.
- El espectro de ruido normalizado en la Norma EN 1793-3 es una curva que tiene como máximo 1 KHz, por lo que diseñar una barrera acústica absorbente que se centre en esa banda de frecuencia es algo lógico. Sin embargo, este espectro normalizado es un parámetro que puede ser bastante variable dependiendo del parque vehicular y de la composición del flujo vehicular. Hay zonas que demandan mas vehículos pesados, o por lo menos hay horarios y días en que la composición cambia sustancialmente. Conocer el estudio de demanda de flujo cuando se va a construir una carretera, es fundamental para la proposición de medidas de mitigación en la etapa de operación de ésta. Luego, si se analiza la composición vehicular y su incidencia en las zonas sensibles, se puede optimizar un diseño de barreras, que asegure una eficiente sombra acústica en los lugares que se necesite.

- La ausencia de interferencia destructiva que se produce con el efecto suelo y meteorológico, hace disminuir los valores de pérdida de inserción en la zona de sombra. La interferencia destructiva del rayo directo con el correspondiente rayo reflejado disminuye el nivel sonoro en el receptor. Al existir suelo con características absorbentes, disminuye la cantidad de rayos reflejados y si más aún aumenta el ángulo de incidencia de las ondas sobre el suelo, se reducen los cambios de fase de reflexión y por ende la interferencia destructiva.
- Según la Sección 4.14 la longitud de la barrera debe cumplir con ciertos requisitos para asegurar una eficiencia en una zona receptora determinada. En este caso, hacia cada lado, la barrera tenía más de 100 metros, lo que permitía realizar las mediciones sin perjuicio de una mala relación entre la distancia tras la barrera y la longitud de ésta. La relación dice que la distancia tras la barrera debe ser un cuarto de la longitud de la barrera desde el inicio de nuestras coordenadas. Por ende, los 20 metros de distancia tras la barrera que se utilizó para la grilla de mediciones están cubiertos por esta relación.
- El Número de Fresnel calculado geoméricamente a través de las distancias hacia los 20 puntos de medición, entrega resultados que no escapan a las restricciones de los algoritmos teóricos. El rango de valores va desde 0 para las frecuencias menores que 1000 Hz en el punto N°16 hasta 21.64 en el punto 1 para la frecuencia de 5000 Hz. Los algoritmos Ec. 4.39, Ec. 4.40 y Ec. 4.41 restringen el valor del Número de Fresnel en cada caso de forma distinta.
- El algoritmo de Rathé (Ec. 4.41), tiene validez sólo en la zona en que  $N \geq 1$ . El Número de Fresnel toma valores menores que cero en la mayoría de los puntos en la zona de baja frecuencia. Luego, a medida que se aumenta en altura en la grilla de medición y se baja en frecuencia, estos valores se van acercando más al cero. Esto hace que en la zona más cercana al suelo, es decir, en 1 y 2 metros de altura, no presente muchos problemas y el algoritmo grafique algo coherente. Luego desde el punto N°11, que está a 3 metros de altura, el espectro de la pérdida de inserción muestra que la predicción de la eficiencia de una barrera colapsa con el algoritmo de Rathé, mostrando valores negativos en baja frecuencia como se puede apreciar en los Gráficos 6.7-6.12.

- Lo mismo ocurre con el algoritmo de Maekawa (Ec. 4.42), que entrega valores muy similares a los de Rathé y que toma valores negativos para un Número de Fresnel menor que 0.05. Es decir, a medida que el Número de Fresnel va disminuyendo a 0.05 en cada punto de la grilla, la pérdida de inserción irá tendiendo a cero. Esto sucede a medida que se disminuye en frecuencia y se sube en altura. Esto explica por que los puntos a mayor altura tienen una pérdida de inserción tan poco efectiva en baja frecuencia. En general, el Número de Fresnel es inversamente proporcional a la longitud de onda, es decir, directamente proporcional a la frecuencia.
- La distancia tras la barrera también incide en los algoritmos a través del Número de Fresnel, puesto que éste depende de la diferencia de caminos que recorren la onda directa y la onda difractada en forma directamente proporcional. El Gráfico 6.17 muestra como la pérdida de inserción medida *in situ* tiene una tendencia a subir a medida que aumenta la diferencia de camino.
- Utilizando la Ec. 4.49 se creó un número único de pérdida de inserción ponderada, lo cuál entrega la idea en forma global de la atenuación en cada punto. La Figura 6.3 muestra los resultados de este cálculo y corrobora las condiciones de mejor eficiencia de esta barrera en el primer punto. Luego, en general los valores tienden a bajar con la altura y con la distancia, aunque se dan casos opuestos (como en los puntos que están a 16 metros tras la barrera). En esta zona las condiciones de reflexión en el suelo y viento pueden jugar un rol importante y permitir obtener datos no muy coherentes respecto a la teoría de propagación. En el caso de pérdida de inserción global se puede ver en los Gráficos 6.13 - 6.16 que a medida que aumenta la altura se va haciendo más estrecha la correlación entre casos teóricos y prácticos, acentuándose en todos los casos a la distancia de 8 metros tras la barrera. Es una distancia cercana a la barrera y en banda ancha presentó un buen ajuste de las mediciones con la predicción teórica.
- El software de modelación SoundPLAN™ crea una visualización de los niveles de ruido a través de las curvas isofónicas en un corte transversal. Para esto, la emisión sonora de la

autopista fue calibrada de acuerdo al modelo alemán RLS-90, mediante los niveles medidos *in situ* en los puntos de referencia y receptores. Los mapas de ruido en el receptor, opción elegida en la etapa de cálculo del modelo, fueron utilizados para conocer el nivel exacto en cada punto. Los niveles globales en la Figura 6.4 entregan resultados mayores que los prácticos. En general, la medición difiere de la modelación en 5 dB, observándose la mayor concordancia en la pérdida de inserción ocurrida en el punto N°1 con una diferencia de 1,2 dB y la menor, en el punto N°18 con una divergencia de 10,7 dB. Se observa también, que la mayor atenuación ocurre en la zona cercana al suelo y la barrera, alcanzando así una tendencia similar a lo observado *in situ*.

- Finalmente, las situaciones con y sin barrera graficadas en SoundPLAN™, muestran el efecto sombra acústica mediante una escala de colores. El software representa el rango de niveles de ruido para los receptores en cada caso. En la Figura 6.7, correspondiente a la modelación de la pérdida de inserción, se observa que los primeros 15 puntos al estar en la zona de atenuación sobre 10 dB, concuerdan con los resultados de los algoritmos teóricos ponderados en A mostrados en los Gráficos 6.13-6.15.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NELSON, P.M. (1987). *Transportation Noise Reference Book*. Butterworths. Inglaterra.
- [2] COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. (1997). Talleres de entrenamiento para manejo de contaminación ambiental. *Taller de acústica ambiental I*.
- [3] JOHNSON, D. R. Y SAUNDERS, E. G. (1968). The evaluation of noise from freely flowing road traffic. Journal of Sound and Vibration. N° 7, pp. 287-309.
- [4] ISO 9613-2. (1994). Acoustic- Attenuation of sound during propagation outdoors.
- [5] SIMON, F. (1996). Tesis doctoral. *Caracterización acústica de pantallas antirruído mediante un índice global*. Universidad Complutense de Madrid.
- [6] <http://www.tpd.tno.nl/tpd/smartsite882.html>. Modelling the effect of wind on noise screens. Holanda.
- [7] MORENO, A. Y DE LA COLINA, C. (2000). *Acústica de la edificación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid.
- [8] REDFEARN, S. W. G. (1940). Some acoustical source-observer problems. Phil. Mag. 7(30), pp. 223.
- [9] MAEKAWA, Z.(1968). Noise reduction by screens. Applied Acoustics. N° 1, pp. 157-173.
- [10] PIERCE, A. D. (1974). Diffraction of sound around corners and over wide barriers. Journal of Acoustical Society of America. 5(55), pp. 941-955.
- [11] KURZE, U. J. Y ANDERSON, G. S. (1971). Sound attenuation by barriers. Applied Acoustics. N° 4, pp. 35-53.
- [12] KURZE, U. J. (1974). Noise reduction by barriers. Journal of Acoustical Society of America. 55(3), pp. 504-518.
- [13] SIMON, F. PFRETZSCHNER, J. (1992). Viabilidad de un índice del grado de apantallamiento introducido por las barreras anti-ruído. Tecniacústica, pp. 227-230.
- [14] MAY, D.N. Y OSMAN, M.M. (1980). Highway noise barriers: new shapes. Journal of Sound and Vibration 71(1), pp. 73-101.
- [15] CROMBIE, D. H. HOTHERSALL, D.C. Y WATTS, G. R. (1994). Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: Full scale tests. Journal of Sound and Vibration. 177(3), pp. 289-305.

- [16] **KOTZEN, B. Y ENGLISH, C. (1998).** Environmental Noise Barriers. *A guide to their acoustic and visual design.* E&FN Spon.
- [17] **THE HIGHWAY AGENCY (1992).** *Design Manual for Roads and Bridges.* HMSO. Londres.
- [18] **WATTS, G. R. (1995).** Acoustical performance of parallel traffic noise barriers. Applied Acoustics. N° 47, pp. 95-119.
- [19] **SLUTSKY, S. Y BERTONI, H.L. (1988).** *Analysis and programmes for assessment of absorptive and tilted parallel barriers.* National Research Council. Washington, DC.
- [20] **FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1976).** *FHWA Highway Noise Barrier Design Handbook* . USA.
- [21] **EN 1793. (1997).** Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras-Método de ensayo para determinar el comportamiento acústico. España.
- [22] **ISO 10847 (1997).** Acoustics – *In situ* determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types.
- [23] **MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE (1995).** Dirección general de carreteras. Reducción del ruido en el entorno de carreteras. España.
- [24] **UNE-EN ISO 140-3 (1995).** Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de la construcción. España.
- [25] **UNE-EN ISO 20354 (1994).** Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. España.
- [26] **HIERROS Y APLANACIONES S.A. (1998).** *Memoria técnica: aplicación de la pantalla antirruido HA-500 acceso norte a Concepción.* España.
- [27] **SOUNDPLAN™ (1996).** Handbook of Technical Acoustics in SoundPLAN™. Alemania.
- [28] **YAMAMOTO, K. (1995).** *Efficiency of Highway noise barriers.* Kobayasi Institute of Physical Research. Japón.
- [29] **KELLER, J. B. (1962).** Geometrical theory of diffraction. Journal of Optical Society of America. 2(52), pp. 116-130.

## Agradecimientos

En esta sección me permito expresar mi gratitud a todas aquellas personas quienes de una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo, como documento cúlmine de la carrera Ingeniería Acústica en la Universidad Austral de Chile.

En primer lugar agradecer el apoyo incondicional mostrado por mi familia a lo largo de todo mi proceso en la educación superior. Así como también a quienes fueron mis docentes en la Escuela de Ingeniería Acústica durante los años que cursé en esta casa de estudios.

En forma especial quisiera agradecer a mi Profesor Patrocinante Christian Gerard B., por su siempre buena disposición e interés en el tema. Todas mis preguntas e inquietudes fueron recibidas de muy buena forma y apoyó mi iniciativa desde un primer momento para el logro de este objetivo.

Quiero expresar mi mas sincero agradecimiento a toda la gente de Control Acústico Ltda., quienes me proporcionaron las herramientas para el desarrollo de esta tesis. La instrumentación y el transporte fueron vitales para la ejecución de la parte práctica de este trabajo. De esta misma empresa, cabe destacar el apoyo de Aldo Campos, quién con su experiencia en el tema me guió en la realización de la modelación SoundPLAN™.

Agradecer también, al grupo de investigadores del Instituto de Acústica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Madrid, en especial a los catedráticos Antonio Moreno A. y Carlos de la Colina T. por su iniciación en el tema de barreras acústicas y traspaso de su experiencia en las técnicas de laboratorio y por proporcionarme valiosa literatura que fue utilizada en forma directa o indirecta en esta tesis.

Quiero agradecer a Felipe Ochoa, quién me colaboró en forma muy eficiente para la etapa de mediciones en la autopista. Su conocimiento en el tema de predicción de niveles de ruido en

carreteras fue un gran aporte. Me gustaría agradecer también a Javier Hernández por su apoyo en Concepción, el día de la campaña de medición y a Tamara Fernández por su gestión en Valdivia.

He de agradecer a quienes respondieron mis inquietudes a través de emails o me enviaron literatura por correo tradicional: Antonio Marzzano, Jorge Arenas, Francisco Simón, Rosa Rodríguez, Dietrich Heimann y Finn Jacobsen.

En general, dar las gracias a todos aquellos quienes me apoyaron durante mi carrera y la realización de este trabajo.