



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**IMPACTO ACUSTICO DE AUTOPISTAS. ANALISIS DE CUATRO
CASOS EN CHILE**

DANIELA ISABEL ECHEVERRIA FAJARDO

PROFESOR GUIA:
CLAUDIO POO BARRERA

PROFESOR CO-GUIA:
GABRIEL RODRIGUEZ JAQUE

MIEMBRO INTEGRANTE DE LA COMISION:
CARLOS AGUILERA GUTIERREZ

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2011

Resumen de la memoria para optar al título de Ingeniero Civil
Por: Daniela Echeverría Fajardo
Fecha: 25-08-2011
Prof. Guía: Sr. Claudio Poo B.

Impacto acústico en autopistas

El presente estudio se engloba en un análisis de la situación actual de Chile respecto de las emisiones acústicas en autopistas y la verificación de medidas de mitigación en cuatro casos medidos in situ.

Se realiza un análisis en detalle del marco regulatorio y normativo vigente en Chile para el ruido ambiental. Desde el año 1994, la ley 19.300 (actual 20.417) sobre “Bases Generales del Medio Ambiente”, regula las emisiones acústicas y dicta los requerimientos ambientales generales que las autopistas deben cumplir. De esta ley surge con fuerza el DS-146 (1997) como norma para mitigar los efectos de emisiones de fuentes fijas, siendo su ámbito de aplicación, insuficiente para dada la existencia ampliada de fuentes móviles.

Situación distinta es la de otros países que han tomado las medidas necesarias para controlar este impacto. La investigación y aplicación de modelos, junto con las experiencias obtenidas in situ arrojan que países como Inglaterra, Suiza y Estados Unidos poseen condiciones similares a Chile que pudiesen ser replicables bajo ciertas consideraciones en el establecimiento de una norma definitiva de impacto acústico.

Este estudio propone un esquema metodológico para reducir los impactos, segregado en planes de acción concretos: acciones de corto plazo, como el control y auditoría de barreras acústicas existentes y que no cumplen con lo especificado; mejorar las coordinaciones entre los participantes de proyectos de construcción, como el MOP, Ministerio del Medio Ambiente o el SEIA; y por último, la inclusión de estudios que analicen el escenario de asumir los costos de las externalidades hacia las comunidades y el medioambiente. El plan de mediano plazo se enfoca en promover políticas y planificaciones optimizadas en diseño de carreteras por sobre barreras acústicas, así como definir roles encargados de la mejora legislativa en materia de regulación de autopistas. Esto apoya la estrategia a seguir para conseguir el objetivo de largo plazo, en el cual se integran las políticas para construir un consolidado Sistema Ambiental [1][2].

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Molestias a la comunidad.....	1
1.1.2 Legislación vigente	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcances de la Memoria	4
CAPITULO 2: CONCEPTOS Y DEFINICIONES	6
2.1 El ruido	6
2.2 Comportamientos de la onda de sonido frente a obstáculos.....	7
2.3 Nivel sonoro percibido por el ser humano	8
2.4 Impacto ambiental	9
2.5 Fuentes de ruido	11
2.6 Tipos de niveles.....	12
2.6.1 Cálculo de niveles	14
2.7 Propagación del sonido en espacios exteriores	16
2.7.1 Ejemplo de cálculo de atenuación total.....	21
CAPITULO 3: ESTUDIO NORMATIVO Y REGLAMENTARIO	24
3.1 Situación actual legislativa en materia de ruido	24
3.1.1 Directiva Unión Europea y regulaciones de países miembros.....	25
3.1.2 Norma suiza	27
Valores límites de exposición al ruido del tráfico vial.....	27
3.1.3 Norma USA Código Federal Parte 772 (23 CFR 772)	28
3.1.4 Norma Ottawa, Canadá	29
3.2 Resumen de regulaciones de normativas.....	31
CAPÍTULO 4: CONTROL DEL RUIDO.....	32
4.1 Estrategias de mitigación.....	32
4.1.1 Normativa y regulaciones	32
4.1.2 Planificación y diseño	33
4.1.3 Incentivos	34
4.2 Técnicas de control de ruido	35
4.2.1 Barreras acústicas.....	35
4.2.2 Pavimentos	36
4.2.3 Soterramientos.....	36
4.2.4 Aislamiento acústico en receptores	37
4.3 Análisis de casos: barreras acústicas	37
4.3.1 Análisis de casos en el extranjero	37
4.3.2 Análisis de casos en Santiago de Chile	41
CAPITULO 5: MODELAMIENTO DE EMISIONES ACUSTICAS	44
5.1 Distintos flujos	44
5.2 Ruido del tráfico rodado.....	44
5.2.1 Nivel de presión sonora a distancia definida.....	44
5.2.2 Factores influyentes en los niveles de ruido	46
5.3 Distintos tipos de modelamiento	47
5.3.1 Modelamiento suizo (STL-86).....	47

5.3.2	Modelamiento EEUU, Federal Highway Administration.....	48
5.3.3	Modelamiento Inglaterra, Calculation of Road Traffic Noise (CRTN).....	50
5.3.4	Modelamiento Alemania (RLS 90/DIN18005).....	52
5.3.5	Modelamiento países nórdicos, Statens Planverk 48.....	54
5.3.6	Modelamiento Chile, Ciudad de Valdivia.....	55
5.3.7	Modelamiento Chile, Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales.....	56
CAPITULO 6: MEDICIONES EN TERRENO		57
6.1	Procedimiento de medición	58
6.2	Realización de toma de datos	59
6.2.1	Ruta 68 – Autopista rural sin sistema de barreras.....	59
6.2.2	Autopista Central – Autopista urbana con sistema de barreras.....	60
6.2.3	Santa María de Manquehue (Costanera) – Autopista urbana sin sistema de barreras	63
6.2.4	Nogales (Ruta 5 Norte) – Autopista rural con sistema de barreras.....	65
CAPITULO 7: RESULTADOS.....		70
7.1	Resultado de los modelamientos	70
7.1.1	Ruta 68.....	70
7.1.2	Autopista Central	71
7.1.3	Costanera, Santa María	72
7.1.4	Ruta 5 Norte, Nogales.....	73
7.1.5	Barreras acústicas de Nogales.....	73
CAPITULO 8: ANÁLISIS Y PROPUESTAS.....		76
8.1	Planes y estrategia de mitigación de ruido	76
8.2	Planes de mediano plazo	78
8.3	Planes de acción de corto plazo.....	81
	Estudio de impacto ambiental	82
	Determinación costos-beneficio.....	83
	Análisis de externalidades.....	83
CAPITULO 9: CONCLUSIONES		84
BIBLIOGRAFIA		87
ANEXO I		90
ANEXO II.....		94
	Atenuación por barreras contra el sonido.....	95
	Barrera delgada	95
	Viento y temperatura.....	96
	Barrera gruesa	97
	Barrera de longitud finita	98
	Barreras con superficies absorbentes	99
	Diques de tierra, colinas.....	99
	Cálculo de los niveles en presencia de barreras	99
ANEXO III.....		100
	Normativa de barreras acústicas - Ottawa, Canadá.....	101
	Requerimientos para la altura y la ubicación de las barreras	101
	Diseño	103
	Materiales.....	104
	Instalación y construcción.....	105
	Otras consideraciones.....	106
	Resonancia (Efecto percusión).....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n° 1: Relación de aumento de fuentes v/s dB obtenidos.....	7
Tabla n° 2: Ejemplos de fuentes sonoras comunes.....	9
Tabla n° 3: Relación entre presión sonora y decibeles.....	12
Tabla n° 4: Valores de L_W para distintos tipos de fuente.....	13
Tabla n° 5: Valores del factor G para los distintos tipos de suelo.....	19
Tabla n° 6: Atenuación debida a la propagación a través de la vegetación.....	21
Tabla n° 7: Niveles de presión sonora límites de emisión de una fuente fija.....	24
Tabla n° 8: Resumen de los Límites de Inmisión de Ruido en algunos países de la Unión Europea.....	26
Tabla n° 9: Valores límites a la exposición del ruido en Suiza.....	28
Tabla n° 10: Valores Límites a la Exposición del Ruido utilizados por la FHWA.....	29
Tabla n° 11: Valores límites a la exposición del ruido para nuevos proyectos utilizados por Ottawa.....	30
Tabla n° 12: Corrección por pendiente.....	49
Tabla n° 13: Valores de S para porcentajes de absorción de suelo.....	51
Tabla n° 14: Corrección del nivel de ruido respecto al tipo de superficie y velocidad.....	51
Tabla n° 15: Corrección por tipo de carpeta.....	52
Tabla n° 16: Corrección por velocidad.....	55
Tabla n° 17: Corrección por tipo de carpeta.....	56
Tabla n° 18: Corrección por pendiente.....	56
Tabla n° 19: Resumen de toma de datos en Ruta 68.....	60
Tabla n° 20: Promedio del impacto acústico en Ruta 68.....	60
Tabla n° 21: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Ruta 68.....	60
Tabla n° 22: Resumen de toma de datos en Autopista Central sin barreras.....	61
Tabla n° 23: Promedio del Impacto Acústico en Autopista Central Sin Barrera.....	61
Tabla n° 24: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Autopista Central sin barrera.....	61
Tabla n° 25: Resumen de toma de datos en Autopista Central con barreras.....	62
Tabla n° 26: Promedio del impacto acústico en Autopista Central con barrera.....	62
Tabla n° 27: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Autopista Central con Barrera.....	63
Tabla n° 28: Resumen de toma de datos en Santa María.....	64
Tabla n° 29: Promedio del impacto acústico en Santa María.....	64
Tabla n° 30: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Santa María.....	65
Tabla n° 31: Registro de bandas de octava de toma de datos en Santa María.....	65
Tabla n° 32: Resumen de toma de datos en Autopista Central con barreras.....	66
Tabla n° 33: Promedio del impacto acústico en Ruta 5 Norte con barreras.....	67
Tabla n° 34: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Ruta 5 Norte con barrera.....	67
Tabla n° 35: Registro de bandas de octava de toma de datos en Ruta 5 con barrera.....	67
Tabla n° 36: Resumen de toma de datos en Ruta 5 Norte sin barreras.....	68
Tabla n° 37: Promedio del impacto acústico en Ruta 5 Norte sin barrera.....	68
Tabla n° 38: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Ruta 5 Norte sin barrera.....	69
Tabla n° 39: Registro de bandas de octava de toma de datos en Ruta 5 sin barrera.....	69

Tabla n° 40: Resumen de modelamientos de la Ruta 68.....	71
Tabla n° 41: Resumen de modelamientos de la Autopista Central.....	71
Tabla n° 42: Resumen de modelamientos de la Costanera, Santa María.....	72
Tabla n° 43: Resumen de modelamientos de la Ruta 5 Norte.	73
Tabla n° 44: Cálculo de pérdida por inserción de las barreras de Nogales.....	74
Tabla n° 45: Pérdida por inserción de las barreras de Nogales in situ.....	75
Tabla n° 46: Coeficiente de atenuación del aire, dB/km, para una atmósfera normal a nivel del mar (101,3 kPa) para la propagación del sonido al aire libre.....	91
Tabla n° 47: Valores para la atenuación del suelo, A_{suelo} , en decibeles para propagación a corta distancia para suelo duro.....	92
Tabla n° 48: Valores para la atenuación del suelo, A_{suelo} , en decibeles para propagación a corta distancia para suelo blando.	92
Tabla n° 49: Expresiones empleadas en el cálculo de la atenuación A_{suelo} en bandas de octava, en decibeles para distancias largas.	93
Tabla n° 50: Cálculo de las pérdidas por inserción para cuatro bandas de octava para barrera delgada.....	96
Tabla n° 51: Ancho adicionales necesarias para bermas	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n° 1: Características fundamentales de la onda	7
Figura n° 2: Croquis del efecto de difracción	8
Figura n° 3: Croquis del efecto de reflexión	8
Figura n° 4: Croquis del efecto de absorción	8
Figura n° 5: Fotografía de un sonómetro con pantalla digital.....	11
Figura n° 6: Vías de propagación entre la fuente S y el receptor R, siendo P el plano de reflexión e I la imagen de la fuente	18
Figura n° 7: Gráfico para calcular A_{suelo} si $r_r - r_d \gg \lambda_{\text{max}}$	19
Figura n° 8: Planta de ejemplo de cálculo de atenuación total.....	22
Figura n° 9: Resumen de los valores límites diurnos de los países presentados.....	31
Figura n° 10: Resumen de los valores límites nocturnos de los países presentados.	31
Figura n° 11: Plano de diseño de tres barreras acústicas.....	38
Figura n° 12: Plano de diseño de barrera vertical de 140 m de largo con un diámetro variable de 20 a 23 m.	38
Figura n° 13: Barrera vertical de 140 m de largo con un diámetro variable de 20 a 23 m. .	38
Figura n° 14: Detalle de túnel.....	39
Figura n° 15: Barrera vertical 70 m de longitud y 4,5 m de altura.....	39
Figura n° 16: Barrera voladizo de 170 m de longitud y 6 m de altura.	39
Figura n° 17: Barrera Acústica fabricada de aglomerado de tapiz de vehículo.	40
Figura n° 18: Barrera acústica de madera verde.....	40
Figura n° 19: Gaviones Rothfuss Alemania	41
Figura n° 20: Gaviones Rothfuss como barreras acústicas	41
Figura n° 21: Barreras acústicas en Túnel San Cristobal, Pedro de Valdivia Norte	42
Figura n° 22: Barreras acústicas en Autopista Américo Vespucio Sur, sector Av. Grecia..	42
Figura n° 23: Barreras acústicas en Autopista Américo Vespucio Norte Express.....	43
Figura n° 24: Fuente lineal de longitud infinita. Donde S son las fuentes y R el receptor ..	45
Figura n° 25: Efecto de la divergencia sobre el nivel de ruido de una línea de tráfico	46
Figura n° 26: Corrección por distancia y ángulo visual.	48
Figura n° 27: Variables de corrección para flujos bajos.....	51
Figura n° 28: Esquema de representación para F, R y Ls.	53
Figura n° 29: Toma de datos en Ruta 68, Km 65.	59
Figura n° 30: Toma de datos en Autopista Central con sistema de barreras.....	62
Figura n° 31: Orificio en sistema de barreras acústicas en Autopista Central.	63
Figura n° 32: Toma de datos en Santa María, Costanera.	64
Figura n° 33: Toma de datos del ruido ambiente en Santa María, Costanera.	65
Figura n° 34: Toma de datos con sistema de barreras en Nogales, Ruta 5 Norte.	66
Figura n° 35: Toma de datos sin sistema de barreras en Nogales, Ruta 5 Norte.....	68
Figura n° 36: Sistema de barreras en Nogales, Ruta 5 Norte.	69
Figura n° 37: Dibujo de las distancias entre la fuente (S) y el receptor (R).....	74
Figura n° 38: Gráfico por bandas de octava de pérdida por inserción	75
Figura n° 39: Formulación estratégica de mitigación de ruido	76
Figura n° 40: Actores del proceso de licitación y concesión.....	79
Figura n° 41: Distancias fundamentales del método para calcular la pérdida por inserción de una barrera delgada.	96
Figura n° 42: Distancias fundamentales del método para calcular la pérdida por inserción de una barrera gruesa	98

Figura n° 43: Ejemplo del uso del método de cálculo de la pérdida por inserción de barreras en el caso de un dique de tierra o colina 99

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

La humanidad ha sido testigo a lo largo de su historia de los brillantes avances en tecnologías más eficientes para el transporte vehicular. Principalmente en la última década, en que el mercado automotriz ha incrementado su oferta y con ello facilitado el acceso a vehículos más económicos lo que ha gatillado el aumento sostenido del parque automotriz. Junto con esto ha generado un crecimiento preocupante en la tasa de accidentes que involucran vehículos motorizados, un mayor consumo de energía, y un alto nivel de contaminación, afectando no solo a la calidad del aire sino también a la calidad de vida de las personas debido a los altos índices de ruido.

El Libro Verde de la Comisión Europea indica que el ruido del transporte rodado es la fuente de ruido principal para nueve decimos de la población de la Unión expuesta a niveles de ruido superiores a 65 dBA. En diversos países se ha buscado fomentar el transporte público urbano e interurbano para reducir estos impactos, pero dado el elevado nivel de inversión requerido para implementar este tipo de proyectos, tanto en infraestructura como en la planificación, no ha sido posible establecer un mecanismo claro que permita reducir el número de automóviles en tránsito principalmente en países que cuentan con recursos limitados.

Ante la necesidad de reducir la congestión vehicular, se requiere de la construcción de nuevas autopistas a nivel urbano-rural, las cuales usualmente se trazan en zonas pobladas que son fuertemente afectadas acústicamente, siendo necesario tomar medidas de mitigación del ruido para cuando estas vías de alto tránsito se encuentren en operación.

1.1.1 Molestias a la comunidad

Según encuestas y estudios, tales como la encuesta “Contaminación acústica y calidad de vida”, realizada por la empresa Gaes en 2009, revela que los encuestados identifican a la congestión vehicular como la principal fuente de molestia por ruido en los núcleos urbanos.[3]

Estudios de la Universidad Católica de Chile en el 2007 establecieron que la esquina de la capital más expuestas a la contaminación ambiental se encuentra en la intersección de Avenida 11 de Septiembre con Pedro de Valdivia, en la Comuna de Providencia, con mediciones mayores a los 87 dB, casi 90 dB, correspondiente al nivel recomendado por la OMS (Organización Mundial de la Salud) para discoteques y por un máximo de cuatro horas.[3]

Una de las consecuencias del ruido más alarmantes, y que ha sido manifestado en un gran sector de la población es el estrés. Siendo el 50% del estrés ciudadano debido al exceso de ruido [4].

Según un estudio del Ministerio de Salud, en Chile una de cada cuatro personas se siente en un estado permanente de estrés, siendo esta patología más elevada en las mujeres: más del 13% se siente estresada "siempre". Esto afecta la calidad de vida y salud no solamente del individuo, sino de todo su entorno (familiar, social y laboral).

En el caso del trabajo, el estrés tiene un impacto tanto en el ambiente laboral como en la productividad de una empresa. Según cálculos internacionales, cada persona que sufre de estrés representa un costo directo e indirecto -en ausentismo, gastos médicos, pérdida de tiempo y errores profesionales; y se estima que esta dolencia es responsable de hasta el 40% del ausentismo en el trabajo, pudiendo reducir el desempeño de los empleados en un 70%. En nuestro país, en tanto, el 30% de las licencias médicas se debe a estrés laboral [5].

Otros tipos de efectos en el organismo dependen de la cantidad de ruido a la que están expuestos y/o la cantidad de tiempo de exposición.

Si una persona está expuesta a más de 60 dB de manera permanente (correspondiente al ruido producido por una aglomeración de personas) puede producirle agitación de la respiración, aceleración del pulso y taquicardias, aumento de presión arterial y dolor de cabeza. Si la exposición es a más de 85 dB, puede producir secreción gástrica, gastritis o colitis, aumento de colesterol y de los triglicéridos con riesgo cardiovascular.

También la exposición excesiva al ruido provoca otro tipo de malestares, tales como: mareos, náuseas, falta de sueño, problemas de memoria, aprendizaje y atención, efectos en la mujer embarazada, etc. La OMS recomienda un nivel de 35 dB para escuelas, debido a la concentración que requiere el alumnado, pero este valor es superado en todas las esquinas que han sido sondeadas en Chile.[3][4]

1.1.2 Legislación vigente

Lo anteriormente expuesto, pone de manifiesto la importancia de la existencia de regulaciones y un control exhaustivo de las emisiones de contaminación acústica en todas sus posibles formas. Si bien

el tema ha presentado una mayor acogida durante los últimos años por el gobierno de Chile en el ámbito de instalación de sistema de barreras acústicas en autopistas tanto urbanas como interurbanas, todavía falta mucho para lograr un nivel de mitigación apropiado que logre evitar el malestar de los moradores aledaños.

El primer hito relevante con respecto de legislación ambiental, se verifica en el año 1994 con la promulgación de la Ley 19.300 “Ley de Bases del Medio Ambiente”, cuyo objetivo es dictar los principios básicos que resguarden el medio ambiente. En ésta se introducen conceptos tales como: impacto ambiental, evaluación de impacto ambiental y otros.

Dentro de la normativa vigente, existen 2 decretos supremos relativos a las emisiones de ruido:

Primero, el DS-146, que corresponde a la norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas, la cual establece los niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos y los criterios técnicos para evaluar y calificar la emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas hacia la comunidad, tales como las actividades industriales, comerciales, recreacionales, artísticas u otras. Segundo, el DS-129, que establece la norma de emisión de ruido para buses de locomoción colectiva urbana y rural.

Ambos decretos supremos, son efectivos en sus ámbitos de acción, sin embargo sus alcances y objetivos limita su aplicabilidad en autopistas. El decreto DS-146 toma validez al considerar una carretera como fuente fija, lo cual puede conllevar a discusión considerando que dado el flujo vehicular ésta puede ser considerada una fuente dinámica con emisiones variables. Bajo una línea argumentativa similar, el DS-129 considera como focos emisores sólo a los buses como se describió anteriormente, ignorando el efecto de vehículos livianos, pesados y su efecto conjunto.

Se verifica que existen espacios en las normativas que no están siendo cubiertas por ninguna de las disposiciones legales vigentes, lo cual amerita la realización de un estudio aplicado a casos reales chilenos en concordancia con países más avanzados en materias de regulación medio ambiental, tales como Unión Europea, Estados Unidos, Suiza y Canadá. El análisis de las normas de estos países, junto con el diagnóstico de las carreteras de Chile, permitirán generar líneas de acción con el objetivo de proponer metodologías de análisis y aplicación de una estrategia para una política medioambiental consolidada.[6][7]

1.2 Objetivos

1.2.1 **Objetivo general**

- Establecer estrategias y directrices para disminuir el impacto ambiental del ruido generado en carreteras en nuestro país.

1.2.2 **Objetivos específicos**

- Determinar en forma teórica el impacto acústico de una autopista, validando los modelos de cálculo con mediciones realizadas in situ.
- Determinar la aplicabilidad de modelos de predicción de ruido para los casos analizados.
- Determinar la situación actual chilena en la aplicación de requerimientos acústicos para proyectos de autopistas.
- Realizar una propuesta metodológica de una estrategia a aplicar a nivel nacional para disminuir el impacto acústico generado por autopistas urbanas y rurales.

1.3 Alcances de la Memoria

Este trabajo está enfocado en presentar directrices para establecer una metodología que apoye la elaboración de planes de acción estratégicos basados en el estudio de determinados países extranjeros, esto con el objeto de disminuir el impacto acústico en autopistas. Se analizan cuatro casos reales en Chile a modo ilustrativo del impacto acústico y la real eficiencia de las barreras acústicas, permitiendo establecer una comparación de estos casos in situ con los modelamientos de emisiones de los países disponibles¹. El objetivo de estudiar dichos casos es obtener el modelamiento que más se asemeje a las condiciones de nuestro país y obtener recomendaciones avaladas por las autoridades competentes.

El proyecto de memoria limita en el alcance del estudio en terreno y de los modelamientos respecto a materiales que logren eficacia en la mitigación de emisiones acústicas en las autopistas, tal como el tipo de carpeta.

¹ Suiza, EE.UU, Inglaterra, Alemania, países nórdicos, Chile

En el desarrollo del proyecto se analizan cuantitativamente cuatro localidades escogidas para complementar el análisis de la situación actual en nuestro país con países desarrollados, el estudio se basa en normativas, entrevistas con personas relevantes de las organizaciones involucradas, bibliografía y otros. No se le dará importancia a estimaciones de costo que maximicen los beneficios de todas las partes involucradas, lo cual, a pesar de ser un tema sumamente relevante, se dejará para el análisis en una fase de estudio posterior.

Algunos datos que se utilizarán como input:

- Pendiente y curvatura de la calzada
- Vibraciones

Sin perjuicio de lo anterior, se estudiarán normas de distintos países, los cuales se aplicarán a la realidad chilena, en cuyo caso se describirán las normativas ambientales vigentes y estudiar las maneras óptimas de plantear planes de corto, mediano y largo plazo para mejorar las deficiencias detectadas a lo largo de la investigación.

CAPITULO 2: CONCEPTOS Y DEFINICIONES

2.1 El ruido

Se entiende por ruido como cualquier sonido que es no deseado o que interfiere con la audición de otro sonido. Es por esta razón que para entender el ruido se hace necesario estudiar el comportamiento del sonido.

El sonido es un fenómeno vibratorio que se propaga como onda a través de un medio material generando variaciones de presión en el medio, el cual puede ser sólido, líquido o gaseoso (aire).

Una de las características que posee la onda de sonido es la frecuencia, que se define como el número de vibraciones por una unidad de tiempo del movimiento de la onda. Ésta nos entrega el tono del sonido, a mayor frecuencia, más agudo y a menor frecuencia, más grave. La frecuencia en el sistema internacional es medida en Hertz [Hz] que se define como el número de vibraciones en un segundo.[8]

$$F = 1/T [Hz]$$

Donde T es el periodo o tiempo entre un ciclo y otro de la vibración.

El espectro audible humano está comprendido entre los 20 Hz hasta los 20.000 Hz, el oído es más sensible entre los 2-3 kHz que al resto, estando la voz humana comprendida entre los 125 Hz y 4 kHz.

El espectro se divide normalmente en bandas de octavas, las cuales están normalizadas:

16 – 31,5 - 63 – 125 – 250 – 500 – 1000 – 2000 – 4000 – 8000 Hz

Utilizándose éstas para los ensayos de laboratorio, y así poder distinguir el comportamiento de frecuencias altas y bajas.[4]

Otras de las características del sonido es la longitud de onda (λ), distancia recorrida para realizar un ciclo, es decir, una oscilación completa; y la amplitud, es la altura máxima que alcanza una oscilación.

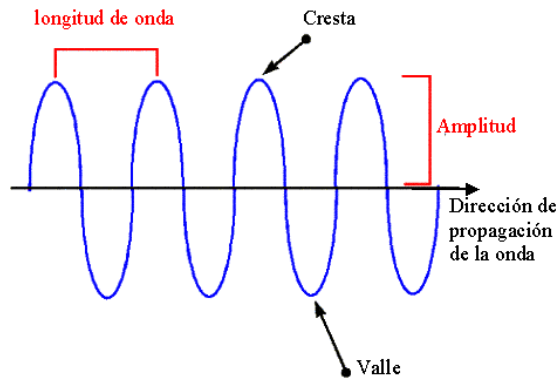


Figura n° 1: Características fundamentales de la onda

La amplitud de la onda representa la intensidad, la que causa la sensación de “fuerza” del sonido que el oído escucha. La intensidad del sonido es determinada objetivamente por el nivel de presión sonora, que se mide en decibeles (dB), la cual es una unidad adimensional. El dB es una unidad relativa de escala logarítmica, por lo que al duplicar la intensidad del sonido, el nivel de sonido aumenta en tres decibeles.

A continuación se presenta una tabla del aumento en el nivel de sonido al aumentar el número de fuentes, asumiendo que el grito de una persona tiene una intensidad de 70 dB.

Tabla n° 1: Relación de aumento de fuentes v/s dB obtenidos.

N° de personas gritando	dB que producen
1	70
2	73
4	76
8	79
10	80
100	90
1000	100
10000	110
100000	120

2.2 Comportamientos de la onda de sonido frente a obstáculos

A continuación se presentan tres de los comportamientos más característicos de la onda sonora, los cuales se producen al enfrentarse a un obstáculo en su medio de propagación. Estos fenómenos son característicos del ruido del tráfico rodado frente a la medida de mitigación del sistema de barreras acústicas.

Difracción

Este fenómeno ocurre al encontrarse un obstáculo en el medio de propagación de las ondas, impidiendo la propagación de una parte de éstas. El borde del obstáculo o el orificio si el obstáculo esta perforado, se convierte en una fuente secundaria que emite ondas de la misma frecuencia, misma longitud de onda y misma amplitud de las ondas originales.[8]

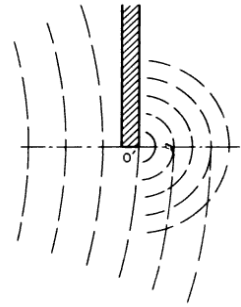


Figura n° 2: Croquis del efecto de difracción

Reflexión

En éste fenómeno la onda se refleja cuando se encuentra con un obstáculo que no puede traspasar ni rodear. El tamaño del obstáculo en comparación con la longitud de onda determinan si la onda rodea el obstáculo o si se refleja. La longitud de onda de las bajas frecuencias son capaces de rodear la mayoría de los obstáculos (difracción), en cambio las altas frecuencias rebotan (reflexión).

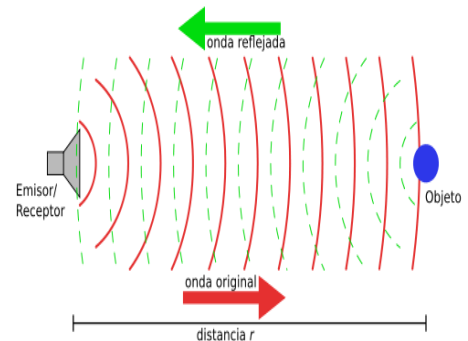


Figura n° 3: Croquis del efecto de reflexión

Absorción

Al chocar una onda sonora con una superficie, un porcentaje de la onda se refleja, otro se transmite por el otro medio y un porcentaje es absorbido por el material de la superficie. Todo tipo de material absorbe un porcentaje de energía de la onda sonora, unos más que otros. Una superficie porosa tiende a absorber más sonido a mayor frecuencia (sonidos agudos).

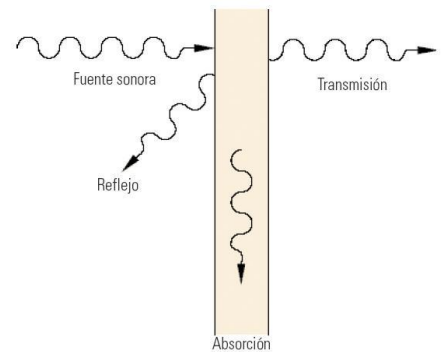


Figura n° 4: Croquis del efecto de absorción

2.3 Nivel sonoro percibido por el ser humano

Como ya se explicó anteriormente el sonido se mide en decibeles, pero el oído humano tiene diferentes sensibilidades a diferentes frecuencias, es decir, es capaz de filtrar unas más que otras, por lo que se ajusta el nivel de ruido de dB a una escala de ponderación A. Los “decibeles ponderados A” (dB (A)), entregan la molestia subjetiva que produce el ruido, incorporando la

atenuación del oído humano. El oído humano es menos sensible a las frecuencias más graves, por ejemplo si hay una frecuencia de 100Hz y se miden 80 dB, el humano escucha 60,9 dBA.

El ser humano al escuchar sonidos sobre los 130 dBA percibe la sensación de dolor, al estar expuesto a sonidos sobre los 160 dBA podría sufrir una perforación instantánea del tímpano.

Dado que la gama de nivel de presión sonora que el oído humano puede detectar es tan grande, la escala que se utiliza frecuentemente para medir este nivel es una escala basada en múltiplos de 10 (dBA). El umbral de audición (sonido más leve que puede detectar el oído humano) se le asigna un nivel sonoro de 0 dBA.[9]

La siguiente tabla muestra algunos sonidos comunes con una estimación de su nivel de presión sonora en dBA.[4]

Tabla n° 2: Ejemplos de fuentes sonoras comunes

Fuente	Nivel de Presión
	sonoro [dBA]
Umbral de audición (THO)	0
Murmullo de las hojas	10
Susurro	20
Voz normal, música suave	40
Taller, gran oficina, comercio	70
Oficina y restaurante ruidoso, gritos	80
Imprenta, calle ruidosa	90
Sierra, compresor, interior metro	100
Martillo neumático	110
Umbral del dolor	130
Avión a reacción	140
Perforación instantánea del tímpano	160

Si la persona está expuesta permanentemente a un nivel sonoro, considerable como para afectar su salud o su estado anímico, se podría estar en presencia de un impacto acústico. En la Tabla n° 2 se observa que sobre los 70 dBA, se considera un ambiente molesto acústicamente.

2.4 Impacto ambiental

Se conoce como impacto ambiental a la alteración del medio ambiente provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

Todo proyecto vial puede ser sometido a una Declaración de Impacto Ambiental o a un Estudio de Impacto Ambiental. Por lo general los grandes proyectos tienden a ser más contaminantes, por lo que se someten a un Estudio, y los proyectos más pequeños a una Declaración.

La Ley 20.417, en reemplazo de la Ley 19.300, de Bases Generales del Medio Ambiente, Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental, artículo 11, postula los tipos de proyectos que requieran la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, al generar o presentar los siguientes efectos, características o circunstancias:

- Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o riesgos.
- Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.
- Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos
- Localización próxima a población, recursos y áreas protegidas susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar
- Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona
- Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.[9]

Existe la posibilidad que un proyecto vial cumpla con estas características, provocando grandes molestias a los moradores de las viviendas aledañas. En consecuencia, se debe hacer un Estudio de Impacto Ambiental que posteriormente será aprobado por el SEIA (Sistema de Estudio de Impacto Ambiental), si cumple con la normativa de carácter ambiental y propone medidas de mitigación, compensación o reparación apropiadas, de lo contrario, será rechazado.

Dentro del mismo reglamento, artículo 3, se presentan en detalle los proyectos o actividades susceptibles de causar un impacto ambiental en cualquiera de sus etapas.

Para describir la situación de impacto acústico, se deben tener en cuenta tres conceptos involucrados:

- Fuente
- Camino de propagación
- Receptor

Siendo la fuente el origen y fundamento del ruido en cuestión. La fuente puede ser del tipo puntual (equipos, maquinarias), lineal (autopistas) o plana (superficies grandes), y en cada caso su efecto será diferente. El camino es el medio por el cual la onda acústica se propaga, éste puede ser sólido, líquido o gaseoso, y el receptor, es el individuo que percibe el sonido.

Los estudios de impacto acústico se complementan con mediciones de ruido en los lugares de emplazamiento, estas medidas pueden considerar la etapa de diseño, construcción, operación y cierre. La medición del ruido se realiza mediante un aparato llamado sonómetro, equipo que es operado manualmente y que debe cumplir con condiciones mínimas indicadas en la normativa. Este instrumento esta constituido por un micrófono conectado a un circuito que procesa electrónicamente la señal y se pueden ver los resultados en una unidad de lectura. Entrega el nivel de presión sonora, intensidad del ruido en un determinado lugar en la unidad de [dBA].



Figura n° 5: Fotografía de un sonómetro con pantalla digital.

2.5 Fuentes de ruido

Los tipos de fuentes se pueden separar en dos criterios:

1^{er} formas: - puntuales

- lineales

- planas

- complejas

2^{do} patrón de radiación: - no direccionales

- direccionales

Las fuentes puntuales emiten energía en todas las direcciones, no privilegian ninguna región del espacio y distribuyen la energía en forma de frentes de onda esféricos. Mientras que en la fuente lineal predomina una dimensión sobre las otras dos. Emite energía desde todos sus puntos distribuyendo la energía en forma de frentes de onda cilíndricos. También se tiene el caso particular

de la fuente compleja, se le considera así a un objeto voluminoso, como por ejemplo un edificio. A suficiente distancia, en relación a sus dimensiones, su comportamiento es similar al de las fuentes puntuales.

Las fuentes planas emiten energía en una sola dirección, la distribuye en forma de frente de onda planos, como un pistón pulsante dentro de un tubo.

Teniendo en consideración el segundo criterio, la fuente no direccional emite energía en todas direcciones con igual intensidad, éstas pueden ser puntuales o lineales. Mientras que la fuente direccional presenta una distribución de la energía no uniforme en relación con la dirección considerada [10].

A modo de ejemplo, el tipo de fuente que caracteriza el tráfico rodado corresponde a una fuente lineal, ya que presenta una magnitud mayor de ruido en una de sus dimensiones, propagándose en forma cilíndrica y extendiendo el sonido más o menos uniforme a lo largo de la vía.

2.6 Tipos de niveles

Para entender lo que significan los niveles sonoros, y su comportamiento, se debe introducir al concepto de presión sonora, la cual está ligada a la presión atmosférica, presión del aire ambiental en ausencia de sonido. En el sistema internacional de unidades (SI) la unidad de medida de la presión es el Pascal (Pa), correspondiendo un Pa a la fuerza de un newton aplicada sobre una superficie de un metro cuadrado. Se define la presión sonora como la diferencia entre la presión instantánea debida al sonido y la presión atmosférica. Generalmente la presión sonora tiene valores mucho menores que la presión atmosférica y la relación de presión sonora entre el ruido más intenso y el más débil es muy alta, por lo que se adapta una escala logarítmica, la cual define los niveles sonoros.

Tabla n° 3: Relación entre presión sonora y decibeles

Fuente sonora	Lp [dB]	Presión sonora [N/m²]
Despegue de un avión	120	20
Bar de copas; autopista a 6 m	100	2
Calle con mucho tráfico	80	$2 \cdot 10^{-1}$
Conversación, restaurante	60	$2 \cdot 10^{-2}$
Ruido ambiente en áreas residenciales	40	$2 \cdot 10^{-3}$
Nivel ambiental en estudios de grabación	20	$2 \cdot 10^{-4}$

La potencia sonora (L_w) es definida como la energía acústica total emitida por unidad de tiempo. Ésta sólo depende de la propia fuente y no del medio donde ella se encuentra. La ventaja de conocer el nivel de potencia de algún elemento o maquinaria, es que se puede obtener mediante cálculo el nivel de presión sonora (L_p) a cualquier distancia de este elemento.

Tabla n° 4: Valores de L_w para distintos tipos de fuente.

Nivel de potencia sonora, dB re 1 pW	Fuente
200	Motor de un cohete
160	Motor de un avión turbojet
140	Aeroplano ligero en crucero
110	Tractor oruga 150 hp
100	Motor eléctrico 100 hp, 2600 rpm
80	Aspiradora
70	Gaita escocesa
40	Hablando susurrando

Es difícil conocer el valor de L_w para el caso de tráfico rodado, ya que éste valor es propio del vehículo, pudiendo ser tal vez el ruido emitido por el motor o de su forma aerodinámica o por el roce, y todas estas posibles opciones de ruido dependen de la velocidad a la cual circula el vehículo. En el caso de las autopistas el mayor ruido es emitido por el contacto neumático-calzada, el cual depende del tipo de suelo, del tipo de neumático, de la velocidad de circulación, por lo que no se puede tener un valor de L_w para este caso. Una alternativa al no contar con este valor es conocer L_p a cierta distancia y bajo condiciones conocidas, parámetro recurrente en los procedimientos de cálculo de este tipo de ruido y que permite conocer en forma directa el impacto acústico de una autopista.

En general existen tres métodos fundamentales para obtener un valor del nivel de presión sonora efectiva L_p de una fuente de ruido:

- 1- Conociendo la potencia sonora de la máquina o equipo, que debe venir especificada por el fabricante.
- 2- Puede calcularse rigurosamente a partir de un conjunto de medidas de nivel de presión sonora para una variedad de fuentes de sonido en situaciones prácticas utilizando varios métodos estabilizados.
- 3- Puede deducirse de una medida única del nivel de presión sonora, donde el camino de propagación entre la fuente y el receptor es la dirección deseada.

Para el caso estudiado en este trabajo se utiliza el tercer método mencionado para calcular el nivel de presión sonora.

Representación de fuentes grandes.

En la práctica una fuente de ruido, independiente de su tamaño, puede representarse como una fuente puntual situada cerca de su centro si el receptor está suficientemente alejado, para esto la distancia entre el receptor y la fuente debe ser al menos el doble de la dimensión más larga de la fuente. Si la distancia es menor, la fuente se convierte en una “fuente grande”, en este caso suele dividirse en varias fuentes discretas, y luego cada una de ellas se estudian como fuentes puntuales.[10]

2.6.1 Cálculo de niveles

La mayoría de las fuentes sonoras generan un ruido que es variable en el tiempo. Debido a esto, para poder hacer una medición del impacto sonoro, se requiere calcular el descriptor L_{eq} , nivel sonoro equivalente, que es la media energética de un nivel de ruido que es variable en el tiempo. Este valor representa con un nivel de sonido continuo, a un ruido que en el mismo período de medición es variable.

Para obtener el valor L_{eq} hay dos métodos de cálculo, los cuales dependen la exactitud que se requiera en el resultado:

- Método general
- Método directo

El método general consiste en calcular el nivel de presión para cada banda de octava de la siguiente manera:

$$L_p = L_w - A_{total} - 11$$

Dónde:

L_w = nivel de potencia sonora efectivo de la fuente puntual en esa banda de octava.

A_{total} = atenuación del sonido que incluye todos los parámetros importantes (ver 2.7).

Este procedimiento se repite para todas las bandas de octava que tengan contribución apreciable al nivel sonoro medio L_{eq} .

Para distancias menores a 100 m entre receptor y fuente, dado que la propagación es esencialmente independiente de las condiciones atmosféricas, el cálculo servirá para un L_{eq} con prácticamente cualquier valor de promedio temporal, siempre y cuando durante este periodo de tiempo no hayan grandes variaciones en las emisiones. Para distancias mayores a los 100 m, donde el nivel sonoro depende de las condiciones atmosféricas, las predicciones se restringen a:

- 1- Condiciones favorables a la propagación.
- 2- Un promedio temporal de aproximadamente 1 hora.

El método general se debe emplear cuando se precisa un nivel sonoro ponderado con una exactitud razonable (aproximadamente 1 dB) en presencia de atenuaciones que dependen de la frecuencia.

El método directo se utiliza en las ocasiones que sólo los términos de atenuación independiente de la frecuencia son relevantes, tales como A_{div} (atenuación por divergencia), A_{suelo} (atenuación debido al suelo) y A_{casa} (atenuación debida a un obstáculo). En este caso es posible calcular el nivel sonoro con ponderación A directamente y más fácilmente, mediante una secuencia única de cálculos descrito anteriormente en el método general, en lugar de la secuencia múltiple usando los niveles de banda de octava.

Se utiliza la misma ecuación del método general pero con los siguientes cambios en los términos a utilizar:

L_w = nivel de potencia sonora efectivo con ponderación A de la fuente puntual.

A_{total} = atenuación total independiente de la frecuencia.

L_p es reemplazado por L_{eq} = nivel sonoro medio con ponderación A.

Para la estimación con menor precisión, mediante este método, es posible aproximar un término de atenuación dependiente de la frecuencia mediante el valor para la banda de octava dominante (a menudo la de 500 Hz).

Cálculo de niveles medios en períodos largos

Con el fin de realizar algunas proyecciones en los alrededores de una vía en estudio, se puede utilizar como parámetro el que se explicita a continuación.

Para un periodo de tiempo que comprende entre un mes y un año, se hablará de una media a largo plazo del valor de L_{eq} . En estos períodos existe una gran variedad de condiciones meteorológicas, algunas de las cuales son menos favorables a la propagación.

Para distancias de propagación inferiores a 100 m, el nivel medio a largo plazo es el mismo que el nivel para el peor de los casos, L_{1h} , ya que en este caso la propagación es independiente de las condiciones atmosféricas.

Para distancias superiores a 100 m no es posible predecir directamente los niveles para distintas condiciones meteorológicas con una precisión comparable, pero se puede utilizar la misma metodología que para distancias cortas, utilizando un término de corrección que depende de las estadísticas meteorológicas locales. Éste término se debe considerar debido al decremento gradual de L_{eq} , debido al aumento de la distancia entre el receptor y la fuente, a largo plazo respecto a L_{1h} . Empíricamente se ha demostrado que este término de corrección no supera los 5 dB [10].

2.7 Propagación del sonido en espacios exteriores

La emisión sonora de una fuente al propagarse por un campo libre se ve disminuida por muchos factores, tales como la distancia de la fuente, el tipo de suelo entre fuente-receptor, pérdida de energía por roce del aire y la reflexión con las edificaciones aledañas, que en este caso pueden aumentar o disminuir la intensidad.

A continuación se presenta la fórmula para calcular la atenuación total del sonido al aire libre, dado todos los factores que apaciguan este efecto.

$$A_{Total} = A_{div} + A_{aire} + A_{suelo} + A_{misc} \quad [dB]$$

Donde:

A_{Total} = atenuación total

A_{div} = divergencia geométrica (depende del tipo de fuente: puntual, lineal, plana)

A_{aire} = absorción del aire

A_{suelo} = efecto suelo

A_{misc} = efecto de los mecanismo adicionales (casos específicos)

$$A_{misc} \begin{cases} A_{refl} = \text{reflexión en edificios.} \\ A_{veget} = \text{propagación a través de la vegetación.} \\ A_{casa} = \text{propagación a través de áreas con casas.} \end{cases}$$

↓
Mecanismos
Adicionales

Cada término se debe evaluar de forma independiente, como si fuese el único factor influyendo, y al sumar los resultados de cada uno de ellos, se obtendrá el valor de la atenuación final.

Algunas de estas atenuaciones dependen de la frecuencia, como A_{aire} , A_{suelo} , y A_{misc} por lo general se trata de igual forma que la atenuación por suelo, dependiendo del tipo de material de los obstáculos, dependerá el tipo de suelo que se le asocie. Comportamiento que se explicará más adelante en este capítulo.

Estos términos evaluados individualmente en un punto determinado pueden arrojar resultados positivos, descenso de nivel, o negativos, un aumento.

A continuación se presenta la forma de calcular cada una de estas atenuaciones de sonido.

A_{div} = expansión esférica de la energía acústica en campo libre a partir de una fuente puntual.

La atenuación por divergencia geométrica está directamente relacionada con la distancia a la cual se encuentra el receptor de la fuente. Esta atenuación se debe a que el sonido se propaga como esfera de energía y ésta cantidad de energía se debe expandir por la superficie de la esfera. Al aumentar el volumen de esta esfera a medida que se aleja de la fuente, se tendrá una menor cantidad de energía por unidad de área de la esfera, por lo que hay una atenuación acústica.

$$A_{div} = 20 * \log rd + 10,9 - C \text{ [dB]} \quad \text{No depende de la frecuencia.}$$

Donde:

rd = distancia desde la fuente puntual hasta el receptor [m].

C = termino de corrección pequeño = 3 dB. Factor que depende del tipo de fuente, para el caso de tráfico rodado éste será el valor.

20 * log \rightarrow nivel sonoro decrece 6 dB cada vez que se duplica la distancia desde la fuente, o, 20 dB cada vez que la distancia se multiplica por 10.

A_{aire} = disminución de la energía sonora al transformarse gradualmente en calor al propagarse por la atmósfera.

$$A_{aire} = \frac{\alpha * d}{100} \text{ [dB]}$$

Donde:

d = distancia entre el receptor y el emisor [m].

α = coeficiente de atenuación del aire en decibeles por kilómetro.

El factor α depende de la frecuencia, humedad relativa, en menor medida de la temperatura y ligeramente de la presión ambiental. El valor de éste factor se puede obtener utilizando la Tabla n° 46 del ANEXO I de este trabajo.

El factor A_{aire} es despreciable para distancias cortas, dado que se requiere una gran distancia para que provoque una disminución del sonido.

$A_{\text{suelo}} = \text{interferencia entre el sonido directo y el reflejado por el suelo.}$

Este factor depende de:

r_d : trayectoria entre receptor y fuente [m].

r_r : trayectoria con la reflexión del suelo [m].

Ψ : ángulo de rozamiento, depende del tipo de superficie del suelo [°].

h_s : altura de la fuente [m]

h_r : altura del receptor [m]

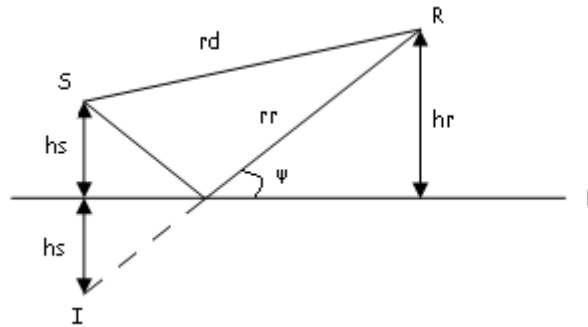


Figura n° 6: Vías de propagación entre la fuente S y el receptor R, siendo P el plano de reflexión e I la imagen de la fuente

Tipos de suelo para $\psi < 20^\circ$:

- suelo duro: asfalto, hormigón, agua; superficies con poca porosidad.
- suelo blando: cubierto por hierba, árboles, vegetación.
- suelo muy blando: superficie muy porosa, nieve, agujas de pino.
- suelo mixto: superficie que incluye áreas duras y blandas.

Dependiendo si se desea calcular la atenuación del suelo para distancias cortas ($r_d < 100$ m) o distancias largas ($r_d > 100$ m), se utilizan distintos métodos.

Para distancias cortas, los valores de la atenuación se presentan en la Tabla n° 47 (suelo duro) y Tabla n° 48 (suelo blando) que se presenta en el ANEXO I, para distintas frecuencias.

Si se abarca toda la gama de frecuencias presentes en el periodo de tiempo que dura el impacto acústico, entonces se utiliza el siguiente método:

Siendo λ la longitud de onda . $\lambda = v/f$ (inversamente proporcional a la frecuencia)

Si $(r_r - r_d) \ll \text{todos los } \lambda$, entonces $A_{\text{suelo}} = -6,0$ dB.

Si $(r_r - r_d) \gg \text{todos los } \lambda$, se utiliza el siguiente gráfico:

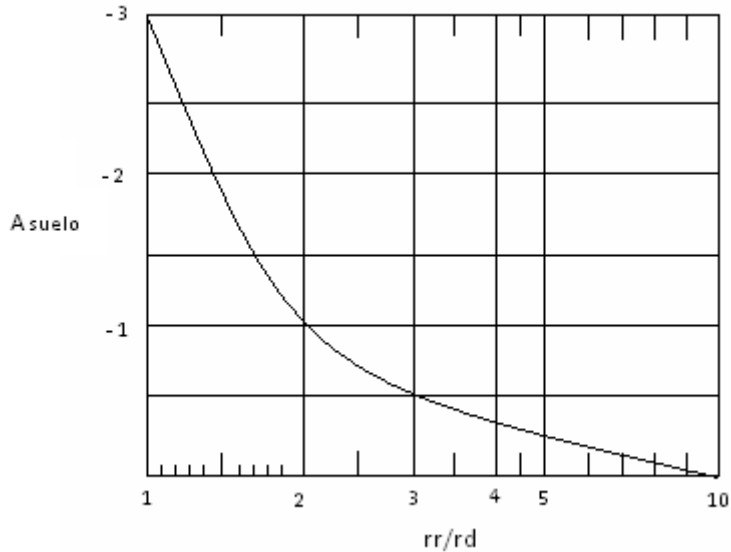


Figura n° 7: Gráfico para calcular A_{suelo} si $r_r - r_d \gg \lambda_{max}$

La superficie del suelo entre la fuente y el receptor se divide en tres zonas, y a cada una de ellas se le asigna un factor de suelo:

- zona de la fuente: distancia de $30 \cdot h_s$, desde la fuente hacia el receptor, con una distancia máxima de la distancia entre la fuente y el receptor.
- zona del receptor: distancia de $30 \cdot h_r$, desde el receptor hacia atrás, con una distancia máxima de la distancia entre la fuente y el receptor.
- zona media: distancia entre la zona de la fuente y la zona del receptor, pueden solaparse ambas zonas y en ese caso no existe la zona media.

El factor del suelo G de cada zona es:

Tabla n° 5: Valores del factor G para los distintos tipos de suelo.

<i>Tipo de suelo</i>	<i>G</i>
<i>Duro</i>	0
<i>Blando</i>	1
<i>Mixto</i>	% suelo blando

Para calcular la atenuación del suelo en cualquier banda de octava se emplea la Tabla n° 49 del ANEXO I.

Para calcular la atenuación de la zona de la fuente se debe considerar el valor de G respectivo y análogamente calcular la atenuación de la zona del receptor.

En caso de que se cumpla que $r_d > 30 \cdot (h_s + h_r)$, se calcula la componente de atenuación de la zona media.

Finalmente la atenuación total del suelo para cualquier banda de octava es la suma de los tres componentes de atenuación.

$$A_{\text{suelo}} = A_s + A_r + A_m$$

Siendo A_s , la atenuación producida en la zona de la fuente, A_r , la atenuación de la zona del receptor y A_m la atenuación de la zona media.

Para lograr utilizar la Tabla n° 49 del ANEXO I, se requiere el conocimiento de los siguientes parámetros:

G = factor de suelo

h = altura de la fuente o del receptor, depende de la zona que se esta evaluando [m]

r = distancia entre fuente y receptor [m].

e = factor = $\{1 - [30 * (h_s + h_r) / r]\}$

Para ángulos de rozamiento $\psi > 30^\circ$, éste caso se presenta habitualmente en distancias cortas, los suelos blandos y muy blandos se convierten en buenos reflectores del sonido, por lo que la componente A_{suelo} se obtiene de la Tabla n° 47.

A_{misc} : atenuación de los factores que no se incluyen en los otros factores.

Tales como: A_{refl} , A_{veget} , A_{casa} .

A_{refl} : efecto de la reflexión de las paredes de los edificios o de superficies verticales próximas.

Este factor se calcula con la misma analogía de A_{suelo} , suponiendo que la superficie del muro sea un suelo duro.

A considerar:

- Para ser un reflector razonablemente eficiente, la superficie ha de ser plana en el punto de reflexión.
- A_{refl} tendrá signo negativo, ya que la reflexión aumenta el nivel.
- Si hay más de una superficie reflectante, puede haber más de un término en A_{refl} .

A_{veget} : es la atenuación producida cuando el sonido se propaga a través de la vegetación.

No debe tenerse en cuenta una longitud de propagación superior a 200 m a través de la vegetación. Árboles y arbustos no son buenas barreras contra el ruido, pero sus raíces al mantener el suelo poroso, aportan cierta atenuación por efecto suelo. Si la vegetación es suficientemente densa como para obstruir completamente la visión y si también intercepta la vía de propagación acústica, se produce una atenuación adicional debida a la propagación a través de ella.

La atenuación adicional A_{veget} de la propagación a través de cada metro de vegetación densa se presenta en la siguiente tabla.

Tabla n° 6: Atenuación debida a la propagación a través de la vegetación

	Frecuencia central de banda de octava, Hz							
	31,5	63	125	500	1000	2000	4000	8000
Aveget dB/m	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,12

A_{casa} : es la atenuación producida cuando el sonido se propaga a través de casas.

Este método de cálculo permite variar la densidad de edificaciones incluyendo áreas urbanas y suburbanas.

$$A_{casa} = 0,1 * B * S_b$$

Dónde:

S_b = longitud del camino acústico a través de la zona de viviendas.

B = densidad de edificación a lo largo de la misma.

$$B = \frac{\text{área total del suelo con casas}}{\text{Área total del suelo}}$$

A_{casa} es independiente de la frecuencia.

Se calcula A_{suelo} sin casas, luego se calcula A_{casa} y el menor se iguala a cero.[10]

2.7.1 Ejemplo de cálculo de atenuación total

Se estudia el caso de un vehículo (fuente direccional), el cual tiene un espectro de ruido que se extiende desde los 125 Hz hasta 4000 Hz, por lo tanto:

Asumiendo que la temperatura de la atmósfera terrestre es de 20°C, se tiene una velocidad del sonido en el aire de: $V_{sonido} = 340$ m/s

$$\lambda = v/f$$

$$\lambda_{min} = 340/4000 = 0,085 \text{ m} \rightarrow \text{longitud de onda para la mayor frecuencia (4000 Hz)}$$

$$\lambda_{max} = 340/125 = 2,72 \text{ m} \rightarrow \text{longitud de onda para la menor frecuencia (125 Hz)}$$

Como se muestra en la Figura n° 8, S representa a la fuente, R a un micrófono, y un muro cercano genera una reflexión del sonido.

Se conocen los valores de:

$$r_d = 15 \text{ m}$$

$$h_s = 5 \text{ m}$$

$$h_r = 10 \text{ m}$$

La altura efectiva de la fuente es de 0,3 m y la del micrófono sobre el pavimento es 1,2 m.

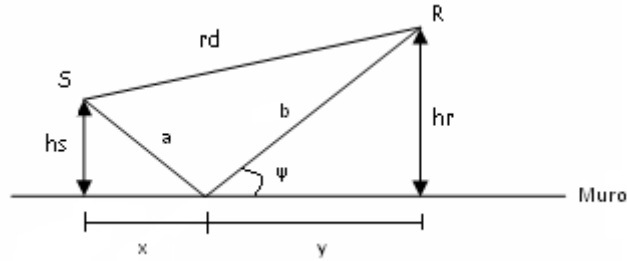


Figura nº 8: Planta de ejemplo de cálculo de atenuación total.

Solución:

$$A_{\text{total}} = A_{\text{div}} + A_{\text{aire}} + A_{\text{suelo}} + A_{\text{refl}}$$

1- De la ecuación mencionada para A_{div} , se obtiene:

$$A_{\text{div}} = 20 \cdot \log(15) + 10,9 - 3 = 31,42 \text{ dB}$$

2- El factor A_{aire} se asume despreciable para distancias cortas.

$$A_{\text{aire}} = 0$$

3- Para calcular A_{suelo} primero se debe conocer r_r , la reflexión con el suelo tiene el mismo comportamiento que se muestra en la Figura nº 8, sólo que en este caso $h_s = 0,3 \text{ m}$ y $h_r = 1,2 \text{ m}$.

$$r_d = \sqrt{15^2 + 0,9^2} = 15,03 \text{ m}$$

$$\left. \begin{array}{l} x + y = 15 \\ a^2 + b^2 = 15,03^2 \\ y^2 + 1,2^2 = b^2 \\ x^2 + 0,3^2 = a^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = 0,3 \text{ m} \\ b = 15,03 \text{ m} \end{array}$$

$$r_r = a + b = 15,33 \text{ m}$$

$$r_r - r_d = 0,3 > \lambda_{\text{max}}$$

Utilizando el gráfico de la Figura nº 7, se obtiene el valor de la atenuación del suelo.

$$r_r / r_d = 1,02$$

$$A_{\text{suelo}} = -3 \text{ dB}$$

4- Para la reflexión del muro se hace el mismo procedimiento.

Del sistema de ecuaciones se obtiene:

$$a = 8,56 \text{ m}$$

$$b = 12,32 \text{ m}$$

$$r_r = 20,88 \text{ m}$$

$r_r - r_d = 5,88 > \lambda_{\max}$ utilizando el gráfico de la Figura nº 7.

$$r_r / r_d = 1,4$$

$$A_{\text{refl}} = - 2,2 \text{ dB}$$

$$A_{\text{total}} = 31,42 + 0 - 3 - 2,2 = 26,22 \text{ dB atenúa el entorno para el rango de frecuencias involucradas.}$$

CAPITULO 3: ESTUDIO NORMATIVO Y REGLAMENTARIO

Con el considerable incremento de la población se ha reconfigurado la estructura física de las ciudades, lo cual se verifica con el incremento de autopistas urbanas e interurbanas. Estos dos tipos de autopistas se diferencian en su ubicación y por el estándar que tiene cada una de ellas, como el tipo de cobro, las autopistas interurbanas tienen el sistema de casetas y las urbanas el sistema de Tag. También las componentes de estas dos autopistas son distintas, tanto del punto de vista estructural como medio ambiental.

En este capítulo se presentan algunas normas que regulan las emisiones de este tipo de autopistas, analizándose la situación actual en Chile y diversas regulaciones extranjeras que pueden ser aplicadas en el país.

3.1 Situación actual legislativa en materia de ruido

En Chile existen dos decretos supremos que regulan las emisiones de ruido, el DS-146, norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas y el DS-129, norma de emisión de ruido para buses de locomoción colectiva urbana y rural.

Ambos decretos no pueden ser aplicados al caso de emisiones por flujo vehicular, ya que el tránsito por autopistas tiene las características de una fuente lineal, como se detalla en el punto 2.5 Fuentes de Ruido del Capítulo 2. Por otra parte el DS-129 está enfocado a mitigar el ruido propio de buses, es decir, no considera el ruido rodado, siendo éste el más predominante en las autopistas interurbanas, ya que sobrepasan la velocidad de 80 km/h.

El DS-146 tiene un fuerte uso durante el periodo de construcción del proyecto, ya que los frentes de trabajo se comportan como fuentes fijas.

En la Tabla n° 7 se presentan los niveles de presión sonora límites de emisión de una fuente fija establecidos por el DS-146.

Tabla n° 7: Niveles de presión sonora límites de emisión de una fuente fija.

Niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos (NPC) en dB(A) lentos		
	de 7 a 21 Hrs.	de 21 a 7 Hrs.
Zona I	55	45
Zona II	60	50
Zona III	65	55
Zona IV	70	70

Debido a esta carencia de normativa de emisiones acústicas en nuestro país, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, artículo 7º, presenta los distintos países cuyas normas de calidad ambiental y de emisiones se pueden consultar, como referencia. Los países son los siguientes: Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelanda, Países Bajos, Italia, Japón, Suecia y Suiza. Siendo las normativas de Suiza y de EE.UU (FTA) las más utilizadas en nuestro país.

A continuación se presentan algunas de las normativas extranjeras que pueden ser consultadas para ser aplicadas en nuestro país.

3.1.1 Directiva Unión Europea y regulaciones de países miembros

La Directiva abarca a todos los Estados miembros, que en este caso son 27 países que componen a la Unión Europea:

Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Dinamarca, España, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Holanda (Países Bajos), Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumania y Suecia [10].

Todos estos países tienen la necesidad de uniformar criterios y definir los mismos estándares de protección ambiental, estándares económicos y de libre comercio entre otros. Rigiendo en este caso la norma llamada Directiva 2002/49/CE de 25-06-2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, en todos estos países.

Una directiva presenta disposiciones que afectan a todos los países miembros enfocada en los resultados a alcanzar, pero cada país tiene la libertad de elegir la forma y los medios para llegar a esos objetivos a través de regulaciones. Las regulaciones son la intervención gubernamental por medio de una política pública (puede ser una norma, ley, control de precios), cuyo objetivo es, modificar la conducta de los participantes en una actividad económica específica.

Esta directiva en particular se enfoca en mitigar los efectos nocivos, incluyendo las molestias, de la exposición al ruido ambiental.

Para esto se toman las siguientes medidas:

- a) determinar la exposición al ruido ambiental mediante la elaboración de mapas de ruidos según métodos de evaluación comunes a los estados miembros.
- b) poner a disposición de la población la información sobre el ruido ambiental y sus efectos.
- c) adoptar planes de acción por los estados miembros, tomando como base los resultados de los mapas de ruidos, con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental siempre que sea necesario y, en

particular, cuando los niveles de exposición puedan tener efectos nocivos en la salud humana, y a mantener la calidad del entorno acústico satisfactoria.

Su enfoque se aplica al ruido ambiental al que estén expuestos los seres humanos en particular en zonas urbanizadas, en parques públicos u otras zonas tranquilas con aglomeración, en zonas tranquilas en campo abierto, en las proximidades de centros escolares y en los alrededores de hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido [11].

En el Anexo V de esta directiva, se mencionan algunas medidas de mitigación que pueden prever las autoridades, tales como:

- regulación del tráfico
- ordenación del territorio
- aplicación de medidas técnicas en las fuentes emisoras
- selección de fuentes más silenciosas
- medidas o incentivos reglamentarios o económicos [11].

Dado que esta directiva sólo presenta objetivos generales, a continuación se presentan las principales normativas relativas a la inmisión de ruido de tráfico rodado en los países de la Unión Europea.

Tabla nº 8: Resumen de los Límites de Inmisión de Ruido en algunos países de la Unión Europea.

País	Límites [dBA]	
	Diurnos	Nocturnos
Austria	N: 50-55 F: 60 R: 65	N: 40-45 F:50 R:55
Bélgica (Bruselas)	55	50
Dinamarca	50-60	-
Finlandia	45 (ZC)-55	40 (ZC)-50
Francia	57-65	55-60
Alemania	NE: 50-55 N: 57-69 R: 70-75	NE: 40-45 N: 47-59 R:60
Grecia	Leq(12h): 67 L10(18h): 70 S: -5-10 Db	-
Irlanda	65-68	-
Italia	FE: 45-65 Todas: 55-70	FE: 35-65 Todas: 40-70
Holanda	55-70	45-55
Portugal	Zonas <= 65, <= 75, < 75	Zonas <= 55, <= 65, < 65
España	N: 55-75 NE: 50-75	N: 45-70 NE: 40-70
Suecia	N: 40-55 NE: 65-70	-
Reino Unido	Leq(16h): 55,63,72 L10(18h): 68	Leq(16h): 45,57,66

- N: Nuevos caminos
- F: Caminos federales
- R: Reparaciones de caminos
- FE: Fuentes Específicas
- NE: Nuevas Edificaciones
- S: Lugares sensibles
- ZC: Zonas de camping

3.1.2 Norma suiza

La norma de la Confederación Suiza es importante de analizar dado que es una de las más utilizadas en nuestro país debido a la carencia de reglamentos asociados al ruido emitido por carreteras en Chile[12].

La normativa se divide en dos ámbitos: gestión y control del ruido a partir del establecimiento de límites al ruido producido por diversas actividades y de la implementación de medidas de aislamiento acústico de las edificaciones.

Esta norma reglamenta la limitación de las emisiones del ruido exterior producidas por la explotación de instalaciones nuevas o existentes como así la delimitación y el equipamiento de zonas a construir en los sectores expuestos al ruido.

También reglamenta el aislamiento contra el ruido exterior e interior de los edificios nuevos que disponen de locales sensibles al ruido, el aislamiento contra el ruido exterior de los edificios existentes que disponen de locales sensibles al ruido y la determinación de las inmisiones de ruido exterior y su evaluación a partir de valores límites de exposición [13].

Valores límites de exposición al ruido del tráfico vial

Los diversos procedimientos de evaluación del ruido de tráfico rodado son utilizados para la planificación de proyectos viales estableciendo límites de planificación, inmisión y alarma. Los cuales se definen según los grados de sensibilidad asociado al acondicionamiento del territorio. Las diversas zonas se presentan a continuación:

- a. El grado de sensibilidad I en las zonas que requieren una mayor protección contra el ruido, especialmente en las zonas de descanso;
- b. El grado de sensibilidad II en las zonas donde ninguna empresa perjudicial es autorizada, especialmente en las zonas de habitación así como en aquellas reservadas a las construcciones e instalaciones públicas.
- c. El grado de sensibilidad III en las zonas donde se admiten empresas medianamente perjudiciales, especialmente en las zonas de habitación y artesanales (zonas mixtas) así como en las zonas agrícolas.
- d. El grado de sensibilidad IV en las zonas donde se admiten empresas extremadamente perjudiciales, especialmente en las zonas industriales [13].

Tabla n° 9: Valores límites a la exposición del ruido en Suiza

Grado de sensibilidad	Valor de planificación		Valor límite de inmisión		Valor de alarma	
	Lr en dB(A)		Lr en dB(A)		Lr en dB(A)	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Se definen los criterios como:

- No Contaminado: Bajo el límite de inmisión.
- Latente: Entre el límite de inmisión y el de alarma.
- Saturado: Sobre el límite de alarma.

3.1.3 Norma USA Código Federal Parte 772 (23 CFR 772)

La FHWA (Federal Highway Administration) ha establecido en Estados Unidos normas sobre el ruido para los diferentes tipos de actividades de uso de terrenos adyacentes a las carreteras.

Estas normas requieren que para aquellos proyectos de carreteras que posean ayuda federal, los estados deben realizar análisis de ruido para identificar el potencial impacto acústico en la carretera. Si se identifican los impactos, las medidas de reducción de ruido deben ser consideradas y aplicadas, si es que son razonables y factibles. Entre los distintos tipos de medidas de reducción, la construcción de barreras acústicas es la más comúnmente utilizada.

El propósito de la norma Código Federal Parte 772 (23 CFR 772): “*Procedures for Abatement of Highway Traffic Noise and Construction Noise*” es facilitar procedimientos para los estudios de ruido y medidas de reducción para ayudar a proteger la salud y el bienestar público.

Por otra parte suministra criterios de reducción del ruido y establece requisitos de información que debe darse a los funcionarios locales para su uso en la planificación y diseño de carreteras aprobadas [14].

Se considera la existencia de impacto acústico si los niveles proyectados se aproximan o exceden de los niveles límites requeridos.

Tabla n° 10: Valores Límites a la Exposición del Ruido utilizados por la FHWA

Categoría de la actividad	Leq(h) dBA	L10(h) dBA	Descripción de la actividad
A	57 (exterior)	60 (exterior)	Lugares en los cuales el impacto de ruido es significativo para definir la preservación del entorno
B	67 (exterior)	70 (exterior)	Áreas de recreación, picnis, parques, hoteles, zonas residenciales, escuelas, bibliotecas, hospitales.
C	72 (exterior)	75 (exterior)	Zonas en desarrollo, fundos, actividades no incluidas en las categorías A y B.
D	-	-	Zonas no desarrolladas
E	52 (interior)	55 (interior)	Zonas residenciales, hoteles, salas de reunión pública, escuelas, iglesias, bibliotecas, hospitales, auditorios.

3.1.4 Norma Ottawa, Canadá

La norma de Ottawa, Canadá, llamada “Control Ambiental de las Directrices de Ruido”, es bastante amplia y completa, cubriendo una mayor cantidad de ámbitos que las normas mencionadas anteriormente. Constituida por:

- 1- Directrices de Control de Ruido Ambiental para Planeamiento de nuevo uso Territorial.
- 2- Directrices para el Control de Ruido Ambiental para Proyectos de Obras de Capital.
- 3- Control de Ruido Ambiental Directrices para la mejora de locales a lo largo de la ciudad de Corredores de Transporte de superficie.
- 4- Estándar de barreras acústicas
- 5- Las medidas prescritas para tratar el ruido de aeronaves

En el primer tema mencionado que se enfoca esta norma, se describe la planificación de uso de suelos de las nuevas aplicaciones de ruido en las proximidades de potenciales fuentes de ruido.

Los usos de suelo sensibles al ruido son los siguientes: residencial, institucional y actividades al aire libre. Éstos incluyen a campamentos, hospitales, lugares de culto, escuelas, guarderías infantiles, centros de atención a largo plazo, bibliotecas, auditorios, centros comunitarios, oficinas, salas de conferencias, salas de lectura, hoteles, moteles y en algunas partes de las tiendas al por menor. Hoteles y moteles son un tipo especial de uso de suelo sensible al ruido, ya que se benefician enormemente de un cómodo acceso al aeropuerto y los usuarios tienden a tener estancias cortas.

A continuación se presenta una tabla resumen de los criterios de nivel de ruido para nuevos proyectos sensibles al ruido.

Tabla n° 11: Valores límites a la exposición del ruido para nuevos proyectos utilizados por Ottawa.

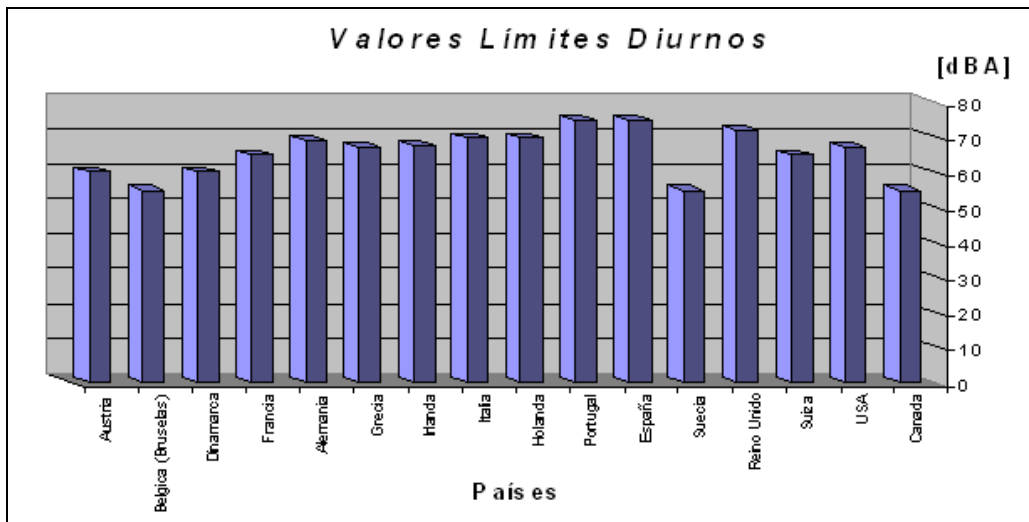
Receptor categoría		Período de tiempo	Tipo de fuente
			Carretera, autobuses y tráfico del metro ligero
			Criterio promedio sobre el período de tiempo
			Leq
Al aire libre	Clase 1	7:00-23:00	55
		23:00-7:00	-
	Clase 2	7:00-19:00	55 (16 h)
		19:00-23:00	
		23:00-7:00	-
	Clase 3	7:00-19:00	55 (16 h)
		19:00-23:00	
		23:00-7:00	-

A continuación se presentan las clases mencionadas en la tabla n° 11:

- Clase 1 se refiere a las principales zonas urbanas en la ciudad de Ottawa.
- Clase 2 se refiere a las zonas suburbanas o remotas en Ottawa con un medio ambiente acústico combinado de clase 1 y 2.
- Clase 3 se refiere a las zonas rurales de la ciudad de Ottawa con tráfico escaso o nulo donde los sonidos naturales predominan [15].

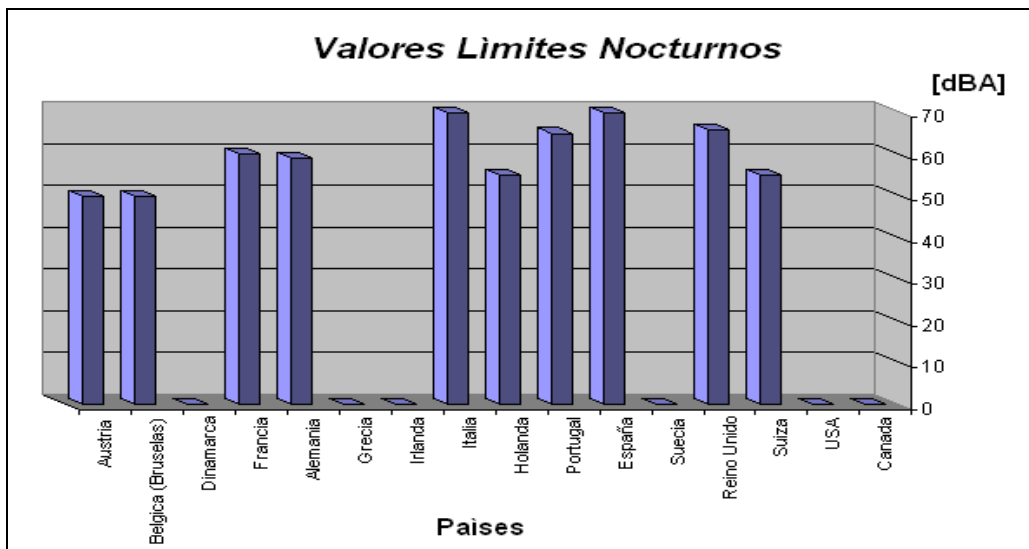
3.2 Resumen de regulaciones de normativas.

Figura n° 9: Resumen de los valores límites diarios de los países presentados.



En la Figura n° 9 se puede apreciar que Bélgica, Suecia y Canadá son los países más restrictivos en cuanto a las limitantes acústicas diurnas. Mientras que Portugal y España son los países que permiten un mayor nivel de ruido.

Figura n° 10: Resumen de los valores límites nocturnos de los países presentados.



En la Figura n° 10 se puede observar que no todos los países tienen restricciones acústicas durante la noche. Existen países como Italia que tienen los mismos valores máximos permisibles tanto para el día como para la noche, pero la mayoría tiene un criterio de limitación más exigente para los niveles nocturnos. Siendo Austria y Bélgica los países con los valores de límites más bajos e Italia y España los países con los valores de limitación mayores.

CAPÍTULO 4: CONTROL DEL RUIDO

El ruido rodado depende de una serie de factores, tales como:

- ruido de los vehículos individuales.
- velocidad.
- flujo vehicular.
- composición del tránsito.
- pendiente de la vía.
- curvatura de la vía.
- tipo de pavimento de la vía.

Se desea tener un control de estos factores para así lograr adecuar los niveles de ruido a niveles aceptables. Este control se puede abordar en tres distintos focos: la fuente, el receptor y/o el medio de propagación.

En el presente capítulo se exponen estrategias de mitigación de control del ruido en autopistas, éstas se segregan en 3 grupos: estrategias del tipo normativas, las cuales se apoyan en el marco regulatorio establecido por el gobierno; estrategias de planificación y diseño de proyectos viales, las cuales se basan en la disminución de ruido asociada a políticas propias de cada proyecto establecida en sus bases y estudios de prefactibilidad y perfil; política de compensaciones a los receptores directos de las externalidades producto de los ruidos.

4.1 Estrategias de mitigación

4.1.1 Normativa y regulaciones

El ruido propio del vehículo está caracterizado por el ruido del motor y del tubo de escape. Éste depende fundamentalmente de las revoluciones por minuto del vehículo, que a su vez depende de la carga de éste. Las legislaciones de muchos países contemplan límites de emisión según la categoría y porte del vehículo que se verifican mediante mediciones con metodología normalizada.

El Ministerio del Medio Ambiente ha dirigido esfuerzos en la construcción de normas en Chile para vehículos livianos, medianos y motocicletas que permitan disminuir este factor.

Otro factor influyente directamente en el ruido que puede ser regularizado es el flujo del tránsito. Los flujos no saturados pueden llegar a ser los más ruidosos, ya que los vehículos circulan a una mayor velocidad, siendo el ruido del roce entre neumático y calzada y las turbulencias

aerodinámicas los que predominan en esta situación. No así cuando se alcanza la saturación, donde las dificultades de maniobrabilidad hacen que disminuya la velocidad media, provocando una disminución en el nivel de ruido. Influye considerablemente en este análisis el tipo de vehículo, ya sea liviano, mediano o pesado².

Una primera aproximación de regulación en esta línea sería aumentar la tarifa de peajes (o impuestos) en algunos sectores de los vehículos particulares y/o de los vehículos pesados, dependiendo si están provocando un impacto, ya que los vehículos destinados al transporte de personas son menos ruidosos que los automóviles particulares, con la misma cantidad de pasajeros. También habría un efecto de disminución en el uso de vehículos particulares.

Se considera también el tipo de vehículo para la mitigación por restricciones de horario. Por lo general estas restricciones de horario son durante la noche, para disminuir los límites de nivel de ruido en las viviendas aledañas a la vía en cuestión. Evitando perturbar el descanso y horas de sueño de los moradores. Este tipo de mitigación es aplicada para camiones de gran carga, ya que es el tipo de vehículo más ruidoso en autopistas.

Todas las estrategias mencionadas anteriormente tienen un control por sobre la fuente, sin embargo, también se puede tener un control sobre el receptor. Como se estudió en el capítulo anterior la normativa suiza implementa medidas de aislamiento acústica en las edificaciones y la directiva de la Unión Europea toma medidas sobre el ordenamiento territorial, ambas medidas disminuyen el impacto acústico enfocándose en el área del receptor.

4.1.2 Planificación y diseño

La estrategia de mitigación en el diseño del proyecto, es una de las menos invasivas para el usuario y para el receptor, ya que no se requiere de medidas adicionales que limiten el espacio de alguno de estos actores.

Dentro de las estrategias que se pueden utilizar en el diseño del proyecto vial se destacan: utilizar un tipo de pavimento que disminuya las emisiones acústicas del tráfico rodado, como evitar el uso de adoquines y utilizar asfalto sonorreductor y evitar en el diseño las pendientes en la vía de circulación, ya que tiene una gran influencia en el ruido resultante, en especial para los vehículos

² Se definen vehículo liviano a un vehículo de dos ejes y cuatro ruedas (auto), uno mediano de dos ejes y más de cuatro ruedas (bus) y uno pesado uno de más de dos ejes (camión).

pesados. Para lograr subir una pendiente, el vehículo debe bajar la velocidad y aumentar la fuerza del motor, lo que provoca un aumento en el ruido emitido por el tubo de escape.

Otro factor que se debe considerar en el diseño es la curvatura del proyecto vial, de preferencia se debe disminuir la cantidad de curvas en el proyecto, como se explicó anteriormente, en una curva se debe disminuir la velocidad dándole más fuerza al motor, provocando que el tubo de escape sea más ruidoso. A este efecto se le suma el de la fuerza centrífuga, ya que para que el automóvil pueda tomar la curva, los neumáticos tienen un mayor roce con la calzada, liberando el aire que se encuentra entre la cubierta y el pavimento, produciendo un mayor efecto acústico.

En la planificación se debe determinar el nivel de sensibilidad del medio natural y social de la localización donde se tiene previsto desarrollar el proyecto. Evitando el riesgo en la comunidad por medio de precauciones durante los periodos de construcción y apertura, ya que durante la construcción los camiones y trabajadores son fuentes fijas emisoras de ruido, que deben tomar precauciones para no afectar a las viviendas cercanas. También se debe estudiar el impacto acústico que se tendrá una vez puesta en marcha la obra, tal vez considerando barreras acústicas en el diseño para disminuir los niveles sonoros proyectados mediante modelamientos de emisión.

4.1.3 Incentivos

La importancia de los incentivos en situaciones que la sociedad se ve afectada por causa de sus propias acciones, es que promueven a un cambio en estas acciones y disminución en la molestia resultante.

Cuando el bienestar social es menor al óptimo se puede hacer entrega de un subsidio para ayudar a la comunidad. Caso que ocurre con el ruido producido por vehículos viejos y mal tratados, por lo que el gobierno puede dar un subsidio para la compra de vehículos nuevos o menos ruidosos a todas aquellas personas con autos por sobre los 15 años desde su fabricación.

También se puede beneficiar a los concesionarios de autopistas por derechos adquiridos para emitir determinados niveles de ruido, asignando directamente los permisos transables a la empresa ejecutora del proyecto, en donde el total de los derechos determina la cantidad máxima de emisiones permitidas dentro de la autopista, la cual debe ser formulada bajo una lógica que impida las acumulaciones en sectores críticos.

4.2 Técnicas de control de ruido

4.2.1 Barreras acústicas

El Reino Unido fue el primer país en instalar barreras acústicas para el tráfico en 1960, incluso siendo EE.UU. el país que inició la investigación a finales de los años 50's.

En los sectores áridos de Europa y Asia, especialmente Japón y China, donde las restricciones de espacio son graves y la norma permite viviendas a gran altura, las bermas de tierra son en general poco prácticas y las paredes acústicas convencionales a menudo son ineficaces, las barreras se construyen con una curvatura parcial por sobre la carretera para obtener una mayor eficiencia [7].

Características de las barreras acústicas

El valor máximo de atenuación que se puede alcanzar teóricamente es de 20 dB(A) para las pantallas delgadas y 23 dB(A) para los muros de contención. Siempre y cuando la barrera esté diseñada e instalada con las siguientes consideraciones:

- La densidad del material superficial debe ser de 10 kg/m².
- Hay que evitar las filtraciones.

La importancia de las fugas se incrementa dramáticamente cuando una gran cantidad de atenuación de ruido es necesaria. Hay que asegurar un sello de aire adecuado en las uniones de las pantallas.[2]

Algunas técnicas que se usan frecuentemente para aumentar los beneficios de las barreras acústicas son las siguientes:

- Las barreras con forma de cuña con ángulo interior mayor a 90° y forma curva son menos efectivas.
- La inclinación de la parte superior de la barrera hacia la fuente puede proporcionar beneficios adicionales.
- Aumentar el número de bordes de difracción también puede mejorar considerablemente la atenuación. Esto puede aumentar la carga de viento sobre la barrera, pero menos que si se hace la barrera más alta para lograr el mismo beneficio acústico.

Tipos de material

Dependiendo del tipo de material del cual esté construida la barrera acústica, se clasificará como una barrera de reflexión o de absorción.

A continuación se presentan los tipos de materiales recomendados:

- Acero (pintado, galvanizado, acero inoxidable).

- Aluminio
- Poli carbonato u hojas de acrílico.
- Hormigón, ladrillo, hormigón armado con fibra de vidrio (GRC)
- Paneles acústicos que se manden a hacer.
- Berma de tierra ajardinada.

El ruido difractado depende de la localización, forma y dimensiones de la barrera.

Todos los materiales son reflexivos a excepción del GRC adsorbente, paneles acústicos y bermas de tierra.

Por lo general los materiales necesitan de un tratamiento extra para evitar molestias al conductor, corta vida útil y mejorar su estética. Los materiales metálicos y transparentes pueden producir “resplandor” al tener ángulos de incidencia, perjudicando en la visibilidad del conductor en la vía, en el caso del policarbonato se debe elegir un tratamiento superficial adecuado para evitar la erosión, ataque ultra violeta y pérdida de la transparencia. Y en los materiales no transparentes como el acero, el aluminio y el hormigón se puede requerir mayores esfuerzos en el tratamiento de superficies para suavizar el impacto visual.[2]

4.2.2 Pavimentos

El ruido rodado depende de la velocidad del vehículo y del tipo de pavimento, éste se origina en la compresión y liberación del aire atrapado entre la cubierta y el pavimento, es mayor para pavimentos lisos que para pavimentos porosos.

Para aminorar esta influencia del pavimento sobre las emisiones acústicas, se han desarrollado estudios y ensayos de carpetas sonorreductoras, pavimentos porosos que logran obtener una doble atenuación del ruido, ya que reduce el aire aprisionado y su porosidad actúa absorbiendo parte del ruido. Este tipo de carpeta se ha utilizado en algunos sectores de importantes autopistas en nuestro país para estudiar su eficiencia y durabilidad, y así poder hacer un mayor uso de este tipo de control de ruido en proyectos futuros.

4.2.3 Soterramientos

Construir un recorrido de forma subterránea en un proyecto vial es una solución que requiere de un mayor costo monetario. Puede transformarse en la mejor opción cuando se necesita una mitigación cercana al 100% del ruido rodado.

Los mayores impactos que provoca esta solución se verifican en las salidas y entradas a estos túneles subterráneos, ya que induce a un aumento del flujo vehicular en el sector y el ruido dentro de los túneles se refleja, provocando un gran estruendo en las salidas y entradas. Aún así son bastante populares debido a las altas velocidades permitidas en este tipo de autopistas, disminuyendo el tiempo de viaje de los usuarios.

4.2.4 Aislamiento acústico en receptores

El aislamiento acústico en los receptores es el segundo paso para seguir disminuyendo el impacto acústico del ruido de tráfico rodado, se le da prioridad al control sobre la fuente y si esto no es suficiente, se considera el control sobre los receptores.

Este tipo de medida es bastante popular en países como Suiza que implementa la medida de mitigación acústica en edificaciones, la cual es excelente aminorando los niveles sonoros dentro del hogar, pero con esta solución aún se tiene el impacto acústico en las calles. Es por este motivo que debe ser un complemento del control sobre la fuente.

Por otra parte se tiene la ordenación del territorio, restricciones en el plan regulador que no permitan la construcción de grandes proyectos viales en áreas residenciales, y de ser estrictamente necesario, cubrir con un eficiente sistema de barreras acústicas para proteger a los moradores de futuras emisiones.

4.3 Análisis de casos: barreras acústicas

4.3.1 Análisis de casos en el extranjero

Hong Kong

Uno de los países más interesantes para analizar barreras acústicas es China, debido al espacio limitado con el que cuentan para construir estructuras y su numerosa población tiene una arquitectura moderna y extravagante.

El arquitecto italiano Francesco Lipari ha diseñado unas barreras acústicas en Hong Kong (2009) para participar en la “Competencia Internacional Abierta de Ideas para la Barrera Acústica” recibiendo una mención honorífica.

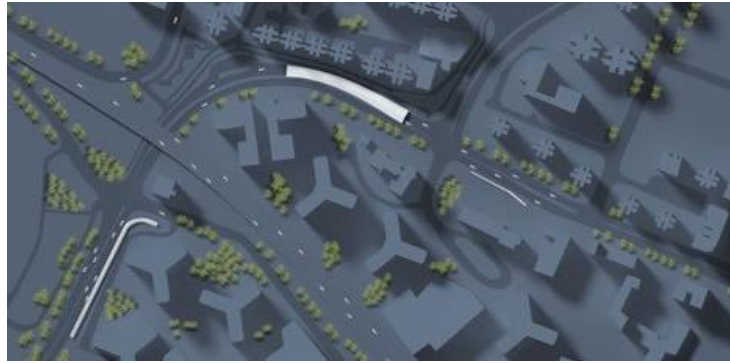


Figura nº 11: Plano de diseño de tres barreras acústicas.



Figura nº 12: Plano de diseño de barrera vertical de 140 m de largo con un diámetro variable de 20 a 23 m.

El proyecto de barrera contra el ruido se compone de 4 piezas individuales, dispersas ubicadas en la ciudad de Hong Kong por las calles de Tai Po Tai Wo Road y la carretera Gascoigne: una barrera en voladizo de 170 metros de longitud y 6 metros de altura, una barrera vertical de 140 metros de largo con un diámetro variable de 20 a 23 metros, una barrera vertical de 70 metros de longitud y 4,5 metros de altura y una barrera contra el ruido semi-integral-en voladizo de 500 metros de longitud y 6 metros de altura. El marco de la estructura de la barrera se ha construido a partir de galvanizado en caliente de tubos de 50 mm para la estructura principal y tubos de 30 mm para la estructura secundaria. Toda la estructura está cubierta con paneles de policarbonato transparente con una amplia diferencia de las aberturas, cada uno con dimensiones de 3 m x 0,65 m.

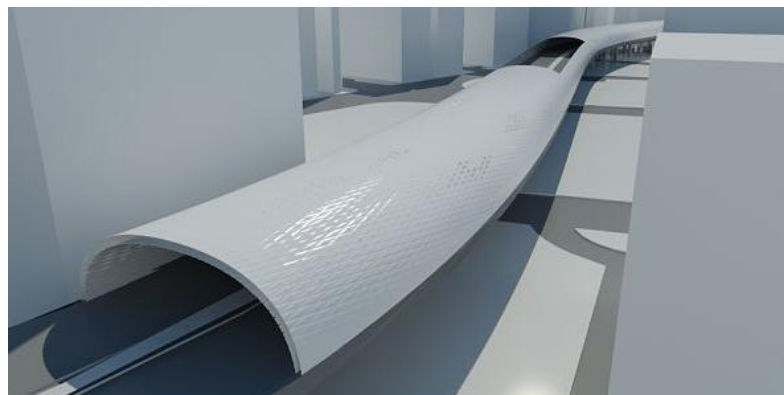


Figura nº 13: Barrera vertical de 140 m de largo con un diámetro variable de 20 a 23 m.



Figura n° 14: Detalle de túnel.

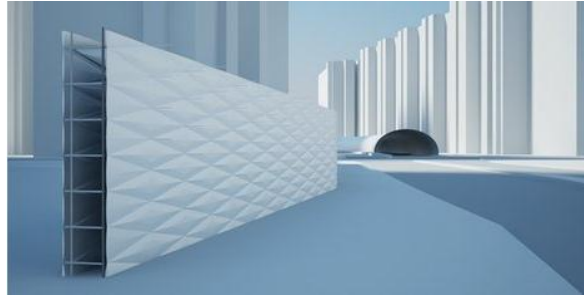


Figura n° 15: Barrera vertical 70 m de longitud y 4,5 m de altura.



Figura n° 16: Barrera voladizo de 170 m de longitud y 6 m de altura.

Estas barreras también integran un sistema innovador verde. El diseño contiene unas características tal, que permite el crecimiento natural de la vegetación, para permitir una mejor absorción de la contaminación transformándola en aire puro. Después del atardecer, la luz artificial ilumina estas instalaciones desde el interior, convirtiendo las formas en un sistema de iluminación de esculturas.

El punto focal de todo el sistema es la hoja denominada RICCIO ©, un innovador sistema tecnológico que transforma el movimiento del aire en energía y luego, gracias a un generador, en electricidad.

Debido al cierre de tránsito de vehículos por la barrera acústica se produce una onda de presión con una energía cinética y potencial. Esta energía se transfiere a la hoja ortogonal al frente de onda. Luego, la hoja estimulada por la onda, empezará a mecerse en analogía con un oscilador armónico amortiguado. La electricidad producida se almacena por los condensadores. Las barreras se utilizan para gestionar el ruido y la electricidad para proporcionar energía limpia para los distritos [16].

España

- Modulos Acu-7

Otros tipos de barreras acústicas, tal vez un poco más convencionales son las que ofrecen en España.



Figura nº 17: Barrera Acústica fabricada de aglomerado de tapiz de vehículo.

Estos módulos son placas acústicas de 2 x 1 m, 70 mm de espesor y 572 kg/m³. Están fabricados a partir de aglomerado de un triturado de tapiz de vehículos con un 4% de resina de poliuretano.

Su acabado estándar es liso por ambas caras; también existe la opción de darle un acabado ondulado en la superficie expuesta al ruido para mejorar sus propiedades absorbentes y darle una estética diferente [17].

- Barreras de madera verde

Este tipo de barreras está formada por una pared doble de troncos (con diámetro de 10 cm) superpuestos y debidamente "tensados" con una capa interior de tierra de 20 cm de espesor. El peso específico de la madera utilizada (pino) es de 800 kg/m³ aproximadamente.

En la parte externa se excavan directamente en la madera, alojamientos para las esencias vegetales. Aumentando la absorción del sonido y mejorando la estética de la barrera.



Figura nº 18: Barrera acústica de madera verde.

La barrera está formada por "módulos" que tienen una altura de 1,50 m superpuestos hasta alcanzar la altura deseada y el espesor total de la barrera es de 50 cm, aproximadamente.

Debido a la composición y naturaleza de los materiales con los que se fabrica, la barrera de madera verde presenta elevadas características de durabilidad en el tiempo, también en lo que respecta a las prestaciones acústicas, mecánicas y estáticas.

Gracias a la presencia de vegetación, esta barrera puede integrarse perfectamente en el medio ambiente y en el paisaje, y desempeñar, al mismo tiempo, una función de mejora de la calidad del aire mediante el proceso químico de la fotosíntesis [18].

Alemania - Gaviones Rothfuss



Figura nº 19: Gaviones Rothfuss Alemania



Figura nº 20: Gaviones Rothfuss como barreras acústicas

Los gaviones son cestas de alambre que se llenan sobre todo con piedra. Están disponibles en varias versiones para los distintos propósitos.

Para utilizarlos como barreras acústicas se les pone un relleno especial arenoso cubierto por la grava que compone los gaviones para tener una reducción de ruido significativa. Está la posibilidad de embellecerlos con decoración de jardín.

No requieren de un mantenimiento frecuente, ya que soportan la prueba de agua con sal por más de 3000 horas [19].

4.3.2 Análisis de casos en Santiago de Chile

Pedro de Valdivia

Con el nuevo proyecto del Túnel San Cristóbal, que conecta la comuna de Providencia, Los Conquistadores con La Pirámide, Huechuraba, las viviendas alrededor de las calle Los Conquistadores se vieron afectadas ante el impacto acústico que provocó la construcción de éste proyecto y luego del uso de ésta nueva vía. Es por esto que durante la construcción se crearon unas barreras acústicas de 5 m de altura en las zonas cercanas a viviendas y de 3 m en las otras zonas.

Una vez finalizado el proyecto se realizó la construcción de barreras acústicas definitivas, constituidas en hormigón y madera dándole una cierta armonía con el entorno.[20]



Figura n° 21: Barreras acústicas en Túnel San Cristobal, Pedro de Valdivia Norte

Américo Vespucio Sur

La Autopista Vespucio Sur, cuyo trazado une en 24 kilómetros las comunas del sur oriente de Santiago, ha instalado cerca de 2.000 metros lineales de barreras acústicas, considerando tipologías mixtas de materiales, combinando en forma arquitectónica elementos opaco absorbente de aluminio con estructuras en metacrilato transparente. Todo el proyecto se desarrolla para proteger una zona afectada por contaminación acústica de 6.000 m².

Sus características generales son las siguientes:

- Las barreras de 4 metros de altura consideran un 67% absorbente y un 33% reflectante, a través de la utilización de paneles de aluminio y polimetilmetacrilato respectivamente, logrando con ello la atenuación de ruido requerida y un manejo del concepto estético en su diseño.
- Las pantallas acústicas de 2.5 metros, consideran un 60% absorbente y un 40% reflectante, siguiendo el mismo concepto antes descrito para las barreras de 4 metros [21].



Figura n° 22: Barreras acústicas en Autopista Américo Vespucio Sur, sector Av. Grecia

Américo Vespucio Norte

La Autopista Vespucio Norte Express, tiene una instalación de más de 5.000 metros lineales de barreras acústicas. En el caso de esta autopista que recorre el anillo de circunvalación norte de la ciudad, que une las comunas de Recoleta en el barrio norte y Pudahuel en el sector poniente de Santiago, se han utilizado por la morfología de su trazado, estructuras diferentes en cuanto ha sido necesario combinar elementos de seguridad vial con elementos de protección acústica. Con esta finalidad se han instalado barreras transparentes sobre estructuras de hormigón y barreras mixtas reflectantes - absorbentes en material transparente y opaco. Con estas barreras acústicas se logra proteger más de 15.000 m² de superficie [21].



Figura n° 23: Barreras acústicas en Autopista Américo Vespucio Norte Express

CAPITULO 5: MODELAMIENTO DE EMISIONES ACUSTICAS

5.1 Distintos flujos

La fuente de ruido en carreteras está dada por los vehículos que circulan por ella.

La emisión de un vehículo se divide en dos tipos de focos:

1. Ruido debido al sistema motor del vehículo, donde encontramos las siguientes fuentes: el ventilador, el motor y la caja de cambios.
2. Ruido debido al movimiento del vehículo, donde tenemos: el ruido del neumático con la calzada y el ruido aerodinámico.

El ruido aerodinámico es totalmente despreciable a las velocidades límites en la carretera, por lo tanto el ruido debido al movimiento se debe a la interacción neumático/calzada.

Esta fuente es la predominante en la circulación por carretera, ya que el ruido debido al sistema motor es relativamente constante e independiente de la velocidad, el ruido neumático/calzada aumenta entre 8 y 12 dBA cada vez que se dobla la velocidad. Esto hace que a velocidades en torno a los 50-60 km/h la principal fuente de ruido sea la de rodadura, que pasa a ser la causante del ruido total del vehículo para velocidades superiores a 70-80 km/h.

La cantidad de decibeles recibidos por el receptor depende directamente de los siguientes factores:

- número de vehículos pasando
- velocidad
- pendiente de la carretera
- tipo de firme
- distancia a la fuente [17].

5.2 Ruido del tráfico rodado

5.2.1 Nivel de presión sonora a distancia definida

A medida que nos alejamos de una carretera, la disminución del nivel de presión sonora se puede estimar calculando el L_{eq} a distintas distancias desde la fuente.

A continuación se presentan las fórmulas que se utilizan para el cálculo de L_{eq} para los distintos tipos de fuente debido a la atenuación por divergencia geométrica.

Fuente puntual.

Se considera el ruido irradiado por una fuente puntual que se mueve. El nivel sonoro máximo se determina de la siguiente manera:

$$L_A = L_{A\text{ref}} - 20 * \log_{10} (r / r_{\text{ref}}) \quad [\text{dB}]$$

Dónde:

L_A = nivel sonoro que varía con el tiempo.

$L_{A\text{ref}}$ = nivel sonoro con ponderación A medido a una distancia r_{ref} .

r = distancia desde el receptor a la fuente.

El nivel sonoro máximo al paso de la fuente desciende 6 dB al duplicarse la distancia r .

Esta ecuación es válida siempre y cuando r y r_{ref} sean perpendiculares a la vía.

Otro nivel sonoro que se puede obtener por una fuente puntual que se desplaza es el nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} , que desciende 3 dB al duplicarse la distancia:

$$L_{\text{eq}} = L_{\text{eqref}} - 10 * \log_{10} (r / r_{\text{ref}}) \quad \text{dB}$$

Fuente lineal de longitud infinita.

Se considera una fuente lineal como muchas fuentes puntuales tienen la misma potencia sonora y mismo espaciamiento entre ellas, un espaciamiento “ b ”. Se mueven a una velocidad constante en una vía recta y la línea es de longitud infinita. A una distancia perpendicular “ r ”, más pequeña que b/π , el nivel sonoro asciende y desciende con cada fuente que pasa. Al duplicar la distancia r el nivel sonoro máximo decrece 6 dB, para una fuente única; el nivel sonoro mínimo, que se produce cuando el observador está a medio camino entre las fuentes, es independiente de r . Lejos de la fuente, el nivel sonoro es constante en el tiempo; disminuye 3 dB por cada duplicación de la distancia. Sin embargo, el nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} se reduce a una constante de 3 dB por cada duplicación de la distancia, a cualquier distancia de una fuente lineal infinita, no necesariamente debe estar lejos, como indica la ecuación para el caso de una fuente puntual.

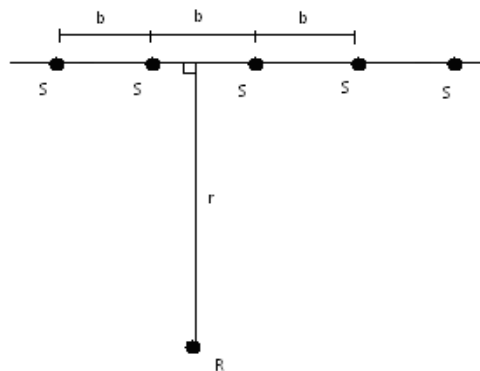


Figura n° 24: Fuente lineal de longitud infinita. Donde S son las fuentes y R el receptor

Fuente lineal de longitud finita.

En este caso existe una nueva zona de divergencia para el caso en que la fuente esté a distancias mayores que l/π del receptor, siendo l la longitud de la fuente lineal finita. Si toda la línea de la fuente está muy alejada del observador actuará como una fuente puntual.

El nivel sonoro con ponderación A, L_A , a una distancia mayor de l/π , decrece en 6 dB por cada duplicación de la distancia, como muestra la línea H de la Figura n° 25.

El nivel sonoro continuo equivalente L_{eq} de la línea finita en esta región depende de si ésta se mueve o es estacionaria. Si la línea se mueve y pasa delante del observador, L_{eq} decrece en 3 dB por cada duplicación de la distancia en las tres regiones, como muestra la línea T en la Figura n° 25. Si la línea es estacionaria respecto al observador, entonces L_{eq} varía 3 dB por cada duplicación de la distancia para r inferior a l/π , como muestra la línea T y a 6 dB por cada duplicación de la distancia para r mayor a l/π , siguiendo la línea H de la Figura n° 25.

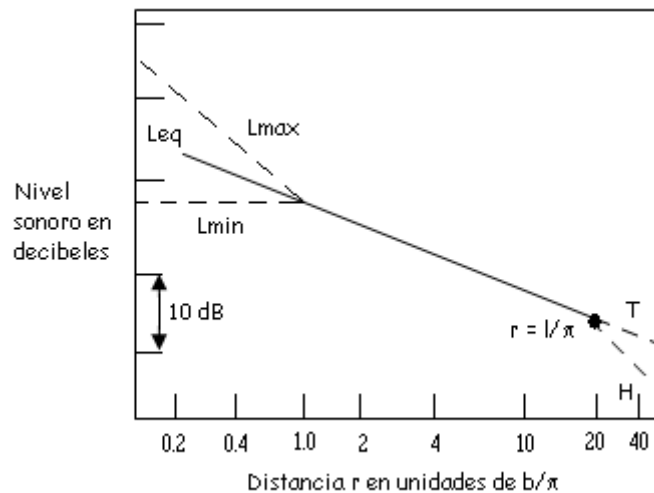


Figura n° 25: Efecto de la divergencia sobre el nivel de ruido de una línea de tráfico

5.2.2 Factores influyentes en los niveles de ruido

El principal factor para determinar el nivel sonoro del ruido del tráfico en un punto distante suele ser la divergencia.

Para el ruido de los vehículos a motor, se calcula primero la atenuación debido a la divergencia, A_{div} usando los métodos descritos anteriormente. Para el ruido de ruedas, se calcula la atenuación debida a la divergencia de la misma manera.

La atenuación del ruido del tráfico, irradiado por una línea de vehículos a motor sobre una autopista y que se propaga directamente en áreas no pavimentadas relativamente abiertas, incluye un término adicional A_{suelo} para la atenuación en áreas abiertas, dado aproximadamente por:

$$A_{\text{suelo}} = 5 * \log_{10} (r/ r_{\text{ref}}) \quad \text{dB}$$

El cual disminuye 1,5 dB por cada duplicación de la distancia si la altura media de la vía de propagación es inferior a 3 m por encima del suelo. Si la altura media es superior a 3 m, la atenuación de A_{suelo} es igual a cero. Esta ecuación no considera el efecto de apantallamiento directo de los obstáculos, como filas de casas o barreras. Para distancias mayores a 300 m hay que incluir la atenuación por absorción del aire, A_{aire} [8].

5.3 Distintos tipos de modelamiento

A continuación se presentan diversos tipos de modelamientos aplicados en diversos países para poder predecir el impacto acústico de proyectos que están en ejecución o en vías de diseño.

En este informe estos modelamientos se utilizarán para compararlos con los datos obtenidos in situ de los cuatro casos estudiados en Chile y concluir cuál de ellos se asemeja más a las condiciones de nuestro país.

5.3.1 **Modelamiento suizo (STL-86)**

$$L_{\text{eq}}(A) = L_{\text{ref}} + \Delta_K + \Delta_L + \Delta_S + \Delta_A$$

Dónde:

Δ_K : corrección por pendiente

Δ_L : corrección por distancia y ángulo de visual

Δ_S : corrección por suelo y altura media de propagación

Δ_A : corrección por absorción aérea

$$L_{\text{ref}} = 43 + 10 \times \log[(1 + (v/50)^3) \times (1 + 20 \times P \times (1 - v/150))] + 10 \times \log(I)$$

En que:

I : flujo de tránsito en veh/h

P : porcentaje de vehículos pesados

V : velocidad media de los vehículos en km/h

Corrección por pendiente (Δ_K)

Si $G \leq 3\%$ $\Delta_K = 0$

Si $G > 3\%$ $\Delta_K = (G - 3) \times 0,5$

Donde G es la pendiente (%)

Corrección por distancia y ángulo visual (Δ_L)

$\Delta_L = -10 \times \log((d \times 180)/\Phi)$

Dónde:

d = distancia la borde del camino en metros

Φ = ángulo visual en grados [°]

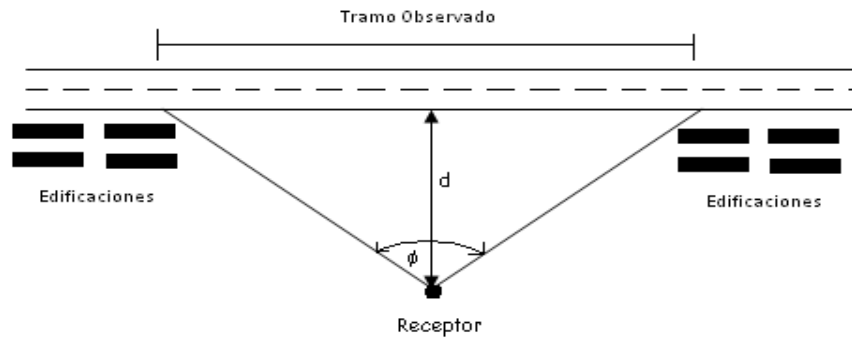


Figura n° 26: Corrección por distancia y ángulo visual.

Corrección por suelo (Δ_S)

$\Delta_S = - (20/(h+1)) \times (1 - e^{(-d/300)})$

Dónde:

h = altura media de propagación

d = distancia al borde del camino en metros.

Corrección por absorción aérea (Δ_A)

$\Delta_A = -0,005 \times d$

Dónde:

d = distancia al borde del camino en metros.

5.3.2 Modelamiento EEUU, Federal Highway Administration

$L_{eq}(A) = 10 \times \log(10^{(0,1 \times L_{eq}(d)_{auto})} + 10^{(0,1 \times L_{eq}(d)_{mediano})} + 10^{(0,1 \times L_{eq}(d)_{pesado})})$

Dónde:

$L_{eq}(d)_i = (L_o)_{Ei} + (\Delta_{tráfico})_i + (\Delta_{distancia})_i + (\Delta_{pendiente})_i + (\Delta_{segmento})_i$

En que:

$(L_o)_{Ei}$ = nivel equivalente de referencia para el tipo I de vehículo

$(\Delta)_i$ = correcciones de tráfico, distancia, pendiente y segmento para el tipo i de vehículo.

Los niveles equivalentes de referencia se calculan a partir de las siguientes expresiones:

Vehículos livianos: $(L_o)_E = 38,1 \times \log(v) - 2,4$ dBA

Camiones medianos: $(L_o)_E = 33,9 \times \log(v) + 16,4$ dBA

Camiones pesados: $(L_o)_E = 24,6 \times \log(v) + 38,5$ dBA

Dónde:

v = velocidad media en km/h.

Corrección por flujo de tráfico

$(\Delta_{\text{tráfico}})_i = 10 \times \log((N_i \times d_o)/v_i) - 25,4$ dBA

Dónde:

d_o = distancia de referencia (15,2 m)

N_i = vehículos por hora tipo i

v_i = velocidad medida en km/h.

Corrección por distancia

$(\Delta_{\text{distancia}})_i = 10 \times (1 + \beta) \times \log(d_o/d)$

Dónde:

β = factor de suelo (0,5 para suelo blando y 0 para suelo duro)

d = distancia desde el centro de la vía

Corrección por ángulo visual

$(\Delta_{\text{segmento}})_{\text{duro}} = 10 \times \log(\phi/180)$

$(\Delta_{\text{segmento}})_{\text{blando}} = 1,2$

Dónde:

ϕ = ángulo visual

Corrección por pendiente

Tabla n° 12: Corrección por pendiente

Porcentaje de pendiente	$(\Delta_{\text{pendiente}})_i$
0 a 2%	0 dBA
3 - 4%	2 dBA
5 - 6%	3 dBA
Sobre 7%	5 dBA

5.3.3 Modelamiento Inglaterra, Calculation of Road Traffic Noise (CRTN)

$$Leq_{10} = 42,2 + 10 \times \log(I) + C_v + C_G + C_{I,d} + C_d + C_s + C_\alpha + C_c$$

Dónde:

I = flujo de tránsito en veh/h

Leq₁₀ = nivel equivalente de ruido superado durante el 10% del tiempo en dBA.

Corrección por velocidad (C_v)

$$C_v = 33 \times \log(v + 40 + 500/v) + 10 \times \log(1 + (5 \times P)/v) - 68,8$$

Dónde:

P = porcentaje de vehículos pesados (%)

V = velocidad medida en km/h.

Corrección por gradiente (C_G)

$$C_G = 0,3 \times G$$

Dónde:

G = pendiente del camino (%)

Corrección para flujo bajo (C_{I,d})

Esta corrección es aplicable sólo para flujos menores a 200 veh/h y cortas distancias a la fuente (inferior a 30 m).

$$C_{I,d} = -16,6 \times \log(D) \times (\log(C))^2$$

Dónde:

$$D = 30/d'$$

$$C = I/200$$

En que:

I = flujo de tránsito en veh/h

d' = distancia de la fuente al receptor en metros, determinado a través de la siguiente expresión:

$$d' = \sqrt{(h^2 + (d + 3,5)^2)}$$

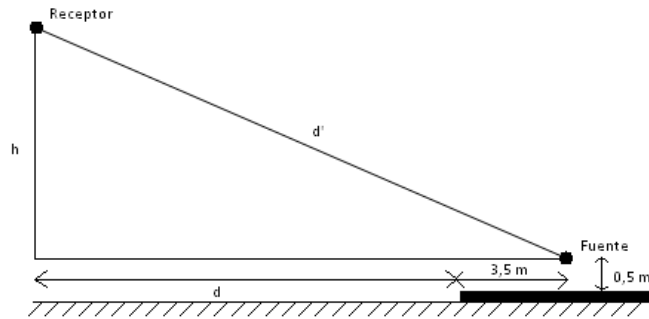


Figura nº 27: Variables de corrección para flujos bajos.

Corrección por distancia (C_d)

$$C_d = -10 \times \log(d'/13,5)$$

Corrección por suelo (C_s)

Para: $0,75 < h < (d+5)/6$: $C_s = 5,2 \times \log((6 \times h - 1,5)/(d + 3,5))$

$h < 0,75$: $C_s = 5,2 \times S \times \log(3/(d + 3,5))$

$h \geq (d+5)/6$: $C_s = 0$

Donde:

h = altura media de propagación, o sea, altura promedio entre la fuente y el receptor.

El valor de S se obtiene de la siguiente tabla:

Tabla nº 13: Valores de S para porcentajes de absorción de suelo.

% de absorción por suelo	Valor de S
< 10	0,00
10 - 39	0,25
40 - 59	0,50
60- 89	0,75
> 90	1,00

Corrección visual (C_a)

$$C_a = 10 \times \log(\theta/180^\circ)$$

Dónde:

θ = ángulo visual a la carretera desde el lugar del receptor.

Corrección por tipo de carpeta (C_c)

Tabla nº 14: Corrección del nivel de ruido respecto al tipo de superficie y velocidad.

Tipo de sup. de rodadura	Veloc.	C_c
Sin sup. Extra	Todas	$10 \times \log(90 \times TD + 30) - 20$
Hormigón impermeable	≥ 75 km/h	$10 \times \log(20 \times TD + 60) - 20$
Hormigón y asfalto imper.	≥ 75 km/h	-1
Superficie permeable	Todas	-3.5

Dónde:

TD = texture depth measured by the sand-patch test.

5.3.4 Modelamiento Alemania (RLS 90/DIN18005)

$$Leq(A) = 10 \times \log(\sum 10^{L_{mi}/10})$$

Nivel de emisión (L_{ME})

$$L_{ME} = L_{25} + C_{velocidad} + C_{carpeta} + C_{gradiente}$$

$$L_{25} = 37,3 + 10 \times \log(I \times (1 + 0,082 \times P))$$

Dónde:

I = flujo de tránsito en veh/h

P = porcentaje de vehículos pesados (%)

Corrección por velocidad ($C_{velocidad}$)

$$C_{velocidad} = L_i - 37,3 + 10 \times \log((100 + (10^{0,1 \times C}) \times P) / (100 + 8,23 \times P))$$

$$L_i = 27,8 + 10 \times \log(1 + (0,02 \times v_i)^3)$$

$$L_p = 23,1 + 12,5 \times \log(v_p)$$

$$C = L_p - L_i$$

Dónde:

$$30 \leq v_i \leq 130 \text{ km/h}$$

$$30 \leq v_p \leq 80 \text{ km/h}$$

Corrección por velocidad ($C_{velocidad}$)

Tabla n° 15: Corrección por tipo de carpeta.

Tipo de carpeta	Velocidad máxima en km/hr			
	30	40	> 50	> 60
Asfalto hormigón (no ranurado)	0	0	0	0
Asfalto hormigón (ranurado)	1	1.5	2	2
Adoquines con textura suave	2	2.5	3	3
Adoquines con textura rígida	3	4.5	6	6
Hormigón con tratamiento escoba metal	1	1	1	1
Hormigón con envoltura de tela (suave)	0	0	-2	-2
Asfalto hormigón sin grietas	0	0	-2	-2
Asfalto poroso con más de 15% poros tipos 0/11	0	0	-4	-4
Asfalto poroso con más de 15% poros tipos 0/8	0	0	-5	-5

Corrección por gradiente de camino ($C_{\text{gradiente}}$)

$$C_{\text{gradiente}} = \begin{cases} 0,6 \times G - 3 & \Leftrightarrow G > 5\% \\ 0 & \Leftrightarrow G \leq 5\% \end{cases}$$

Dónde:

G = pendiente del camino en %.

Propagación

La contribución por cada una de las fuentes puntuales es la siguiente:

$$L_M = L_{ME} + C_{\text{long_sección}} + C_{\text{extensión}} + C_{\text{abs_terreno}}$$

$$C_{\text{long_sección}} = 10 \times \log(l_s)$$

Dónde:

l_s = longitud de la sección contenida en el triángulo y determinado por el ángulo de barrido.

α = ángulo de barrido, preferentemente inferior a 10, de tal modo que las fuentes puntuales representen una fuente lineal. Este ángulo no corresponde al ángulo horizontal que contiene el segmento de camino observado desde la posición del receptor, sino una porción de este segmento que representa una porción de ruido evaluada.

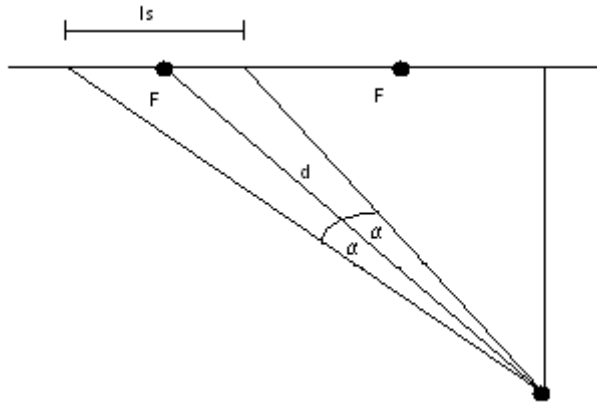


Figura nº 28: Esquema de representación para F, R y l_s .

Dónde:

l_s = ángulo de barrido

F = fuente puntual

R = receptor

$$C_{\text{extensión}} = 11,2 - 20 \times \log(d) - d/500$$

Dónde:

d = distancia desde la mitad de la sección al receptor.

$$C_{\text{abs_terreno}} = h/d \times (34 + 600/d) - 4,8 < 0$$

En que:

h = altura media de propagación

5.3.5 Modelamiento países nórdicos, Statens Planverk 48

$$L_{eq} = L_{Aeq}(10m) + \Delta L_V + \Delta L_N + \Delta L_{TF} + \Delta L_{AV} + \Delta L_\alpha$$

Dónde:

ΔL_V = corrección por velocidad

ΔL_N = corrección por intensidad de tráfico

ΔL_{TF} = corrección por porcentaje de vehículos pesados

ΔL_{AV} = corrección por distancia y altura media de propagación

ΔL_α = corrección por ángulo de visual

Situación base: $L_{Aeq}(10m) = 68$ dB, medido a 10 m de la vía y a 1,5 m de altura.

Flujo vehicular de 24 horas = 24.000 veh.

Velocidad = 50 km/h.

Corrección por velocidad (ΔL_V)

Si $v \geq 50$ km/hr $\Delta L_V = 30 \times \log(v/50)$

Si $v < 50$ km/h $\Delta L_V = 0$ dB

Dónde:

v = velocidad promedio en km/h.

Corrección por intensidad de tráfico (ΔL_N)

$$\Delta L_N = 10 \times \log(N/24.000)$$

Dónde:

N = flujo de vehículos en 24 horas.

Corrección por vehículos pesados (ΔL_{TF})

Para $50 \leq v < 90$ km/h

$$\Delta L_{TF} = 10 \times \log((100 - P + (500 \times P)/v)/100)$$

Para $v \geq 90$ km/h

$$\Delta L_{TF} = 10 \times \log((100 - P + 500/9 \times (90/v)^3 \times P)/100)$$

Dónde:

P = porcentaje de vehículos pesados.

Distancia (ΔL_{AV})

$$\Delta L_{AV} = -10 \times \log(\sqrt{d^2 + (hm + hb - 0,5)^2}/10)$$

Dónde:

d = distancia al eje central de la vía
 hm = altura del receptor
 hb = altura de la superficie del camino

Corrección por ángulo visual (ΔL_α)

$$\Delta L_\alpha = 10 \times \log(\Phi / 180^\circ)$$

Dónde:

Φ = ángulo horizontal que contiene el segmento de camino observado desde la posición del receptor, tal como se muestra en la Figura n° 26.

5.3.6 Modelamiento Chile, Ciudad de Valdivia

$$Leq = \alpha + 10 \times \log(N_L + \beta \times N_W) + 10 \times \log(d_0/d) + \Delta L_V + \Delta L_F + \Delta L_B + \Delta L_S + \Delta L_G + \Delta L_{VB}$$

Dónde:

N_L = flujo de vehículos livianos [veh/h]

N_W = flujo de vehículos pesados [veh/h]

d = distancia desde el eje de la calzada al receptor [m].

d_0 = distancia de referencia (25 m).

α = representa el ruido de un vehículo liviano [dB]

β = representa a cuántos vehículos livianos equivale uno pesado.

ΔL_V = corrección por velocidad media [dB]

ΔL_F = corrección por reflexiones en las fachadas adyacentes al camino [dB]

ΔL_B = corrección por reflexiones en las fachadas opuestas [dB]

ΔL_S = corrección por tipo de carpeta [dB]

ΔL_G = corrección por pendiente [dB]

ΔL_{VB} = corrección por velocidad muy baja o cercana a la detención [dB]

En la ciudad de Valdivia $\alpha = 33,6$ y $\beta = 9,2$.

Corrección por velocidad (ΔL_V)

Tabla n° 16: Corrección por velocidad.

Velocidad [km/h]	ΔL_V [dB]
30 - 50	0
60	1
70	2
80	3
90	4

Corrección por reflexión (ΔL_F y ΔL_B)

Reflexiones sobre las propias fachadas $\Delta L_F = 2,5$ dB

Reflexiones en lado opuesto $\Delta L_B = 1,5$ dB

Corrección por tipo de carpeta (ΔL_S)

Tabla n° 17: Corrección por tipo de carpeta.

Tipo de carpeta	ΔL_S [dB]
Asfalto liso	1,5
Asfalto rugoso	0
Hormigón	1,5
Adoquines	4

Corrección por pendiente (ΔL_G)

Tabla n° 18: Corrección por pendiente.

Pendiente %	ΔL_G [dB]
5	0
6	0,6
Por cada unidad	0,6

Por cada unidad, se refiere a sumar 0,6 a cada unidad adicional respecto del valor de pendiente 6, es decir para una pendiente de 7%, $\Delta L_G = 1,2$ dB.

Corrección por velocidad baja (ΔL_{VB})

Para velocidades bajas o próximo a un semáforo.

Si $v \leq 30$ km/hr $\Delta L_{VB} = -1,5$ dB

Si se está próximo a un semáforo $\Delta L_{VB} = 1,0$ dB

5.3.7 Modelamiento Chile, Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales

Modelo desarrollado en una tesis de dicha universidad, es una adaptación del modelo alemán mencionado anteriormente a la realidad chilena.

$$Leq(A) = 10 \times \log(\sum 10^{L_{mi}/10})$$

Con :

$$L_{Mi} = 9,39 + 8,23 \times \log(I) + C_{velocidad} + C_{carpeta} + C_{gradiente} + C_{long_sección} + C_{extensión} + C_{abs_terreno}$$

Siendo los parámetros los mismos descritos para el modelo alemán.[25]

CAPITULO 6: MEDICIONES EN TERRENO

El objetivo de la medición en terreno para este trabajo, es probar en la práctica la factibilidad de aplicar los modelamientos propuestos, a su vez realizar un análisis de los espectros de ruido en bandas de octava, comparando lo esperado teóricamente con las mediciones obtenidas de la pérdida por inserción de las barreras acústicas.

El procedimiento estándar utilizado para extraer una muestra de datos en terreno, implica como prerequisite que se verifiquen las siguientes condiciones y limitaciones en el momento de la medición:

- Descripción a utilizar: L_{Amin} → Nivel de presión sonora mínimo
 $L_{A,max}$ → Nivel de presión sonora máximo
 $L_{A,eq}$ → Nivel de presión sonora equivalente
- Instrumentos: Analizador o sonómetros tipo 2 o superiores.
- Las mediciones se deben realizar en una carretera recta, sin pendientes u otra característica que pudiese afectar los resultados. La longitud mínima para registrar es de 100 m.
- El micrófono debe estar posicionado en un plano vertical. En el caso de existir sistema de barreras acústicas se debe monitorear el sector antes de la presencia de barreras y con la presencia de barreras. La altura del micrófono debe ser por lo menos 1,5 m por sobre la barrera para obtener las mediciones antes de la presencia de barreras. De existir un sector con las mismas condiciones del sector con barreras, ya sea flujo vehicular, pendiente, velocidad, curvatura etc. Se pueden monitorear este sector como “previo a las barreras”.
- En caso de mediciones en campo libre la altura del micrófono debe ser de 1,2 m del suelo aproximadamente y debe estar ubicado en lugares sensibles donde se ubica el receptor a distancias de 7,5 m, 15 m o 30 m del eje de la pista de circulación, dependiendo de la lejanía de los puntos críticos.
- Condiciones de campo libre, asegurando un perímetro mínimo de 30 m de diámetro alrededor del micrófono en que no existan edificios ni otros que pudiesen alterar las mediciones.
- Registrar paso individual de los vehículos, pista recta de un largo considerable y distanciamiento suficiente del paso de los vehículos para evitar el enmascaramiento entre ellos.
- Tráfico moderado, para permitir la observación de vehículos individuales. Idealmente éste último debe ser constante y a velocidad crucero.
- Definir categorías de vehículos: peso, número de ruedas y/o número de ejes del vehículo.

- Condiciones meteorológicas, se debe registrar: temperatura, humedad y velocidad del viento.
- Las variables a considerar son el tipo de carpeta y la velocidad de circulación.

6.1 Procedimiento de medición

Las categorías utilizadas para clasificar los vehículos son las siguientes:

- Categoría A: Vehículos de dos ejes y cuatro ruedas
- Categoría B: Vehículos de dos ejes y más de cuatro ruedas
- Categoría C: Vehículos de más de dos ejes
- Categoría D: Vehículos de dos ejes y menos de cuatro ruedas (moto)

Registro de los niveles de ruido y velocidad durante el paso de un vehículo por una pista de 100 m de largo.

Medir por lo menos: - $L_{A,eq}$

- $L_{A,max}$

- Velocidad de paso de vehículos

- La posición del micrófono debe estar a un costado de la carretera a 15 m o 7,5 m del centro de la pista de circulación más cercana y a una altura de 1,2 m del suelo.
- Para evitar enmascaramiento, el valor anterior y posterior al paso del vehículo debe ser como mínimo 6 dBA por debajo de los niveles registrados.
- El procedimiento se debe realizar en cinco lugares de medición, por cada categoría (con sistema de barreras acústicas y sin sistema de barreras).
- Antes y después de las mediciones se debe calibrar el instrumento y la diferencia debe ser menor a 0,5 dBA para que éstos sean válidos.
- Velocidad del viento no debe exceder los 5 m/s durante la medición. La temperatura debe estar entre los 30° y 5° C.
- Ruido de fondo por lo menos 10 dBA inferior a los niveles registrados en el sector del impacto acústico.
- El micrófono no debe tener superficies reflectantes como mínimo a 3,5 m detrás de éste y además no debe existir ningún elemento reflectante u obstaculizador entre la carretera y el micrófono.
- La medición no debe ser más de 30 min. [25] [26]

6.2 Realización de toma de datos

Los lugares en los cuales se tomaron los datos fueron seleccionados bajo el criterio de:

- tramo recto mayor de 100 m
- menor pendiente posible de la carretera
- velocidad constante (sin presencia de semáforos)
- caletera contigua para poder tomar datos
- buena visual para contar vehículos

Se desea hacer mediciones en dos autopistas rurales y dos urbanas. Una de las autopistas rurales tiene sistema de barreras acústicas aplicado y la otra no, mismo criterio para las autopistas urbanas.

6.2.1 Ruta 68 – Autopista rural sin sistema de barreras

Se seleccionó el Km. 65 de la Ruta 68, para determinar la presencia de un impacto acústico debido a la presencia de un área poblada que se encuentra junto a la carretera. Se trata de un colegio llamado “Caernarfon College”, colegio británico. Inicialmente este sector se encontraba protegido por un sistema de barreras acústicas, pero éstas fueron removidas a fines del 2010 debido a la construcción de una pasarela.



Figura n° 29: Toma de datos en Ruta 68, Km 65.

La toma de datos se realiza en el sector sur de la carretera, es decir, por donde los vehículos circulan en dirección este, frente al colegio ya que es un punto crítico.

Características del día en el cual se tomaron los datos y el lugar:

- Día: Jueves 24 de Marzo
- Hora: 12:00.
- Temperatura: 23° C
- Humedad: 38%

- Viento: 7 km/h
- Velocidad promedio: 100 km/h

A continuación se presentan los datos obtenidos a una distancia de 8 m desde el centro de la pista de circulación más cercana y a una altura del sonómetro de 1,4 m.

Tabla n° 19: Resumen de toma de datos en Ruta 68.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	R. Ambiente
Duración	0:05:11	0:05:00	0:05:00	0:05:03	0:05:03	0:10:02
LeqA	75,3	76,1	72,5	75,7	77,7	42,9
Lmax	86,0	86,1	80,4	86,4	88,4	49,0
Lmin	53,2	54,3	55,0	54,5	61,1	37,8

Se toma datos en cinco distintas posiciones a la misma distancia de la carretera y se toma medición del ruido ambiente para lograr hacer una comparación y lograr evaluar el impacto acústico.

Tabla n° 20: Promedio del impacto acústico en Ruta 68.

Promedio	[dBA]
LeqA	75
Lmax	85
Lmin	56

Como se puede observar el ruido ambiente es aproximadamente de 43 dBA y el nivel acústico frente al colegio es de 75 dBA, por lo que existe una diferencia mayor a 10 dBA, pudiendo notar el gran impacto que tiene la Ruta 68 en este sector.

Tabla n° 21: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Ruta 68.

Tipo de vehículo	Cantidad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
A	78	60	75	75	73
B	8	13	10	13	20
C	10	10	10	13	23
D	0	0	0	0	0

Se puede apreciar en la tabla anterior que en la Ruta 68, los días de semana en la mañana no circula un gran flujo de vehículos, en comparación con los fines de semana. Se puede concluir que durante el fin de semana el impacto acústico es mucho más crítico.

6.2.2 Autopista Central – Autopista urbana con sistema de barreras

Se realizaron las mediciones en el sector con sistema de barreras acústicas que se encuentra en la parte posterior a la Universidad Bernardo O'Higgins. Se seleccionaron cinco puntos de medición en el sector sin barrera y cinco más en el sector con barreras acústicas.

Características del día en el cual se tomaron los datos y el lugar:

- Día: Martes 19 de Abril
- Hora: 12:30.
- Temperatura: 20° C
- Humedad: 45%
- Viento: 2 km/h
- Velocidad promedio: 70 km/h

Las mediciones se realizaron en el sector poniente de la autopista, es decir, en la pista más cercana los vehículos se dirigían hacia el sur.

A continuación se presentan los datos obtenidos a una distancia de 10 m desde el centro de la pista de circulación más cercana y a una altura del sonómetro de 1,2 m.

Tabla n° 22: Resumen de toma de datos en Autopista Central sin barreras.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Duración	0:05:00	0:05:00	0:05:00	0:05:00	0:05:00
LeqA	79,1	79,8	78,6	79,9	80,1
Lmax	86,1	86,5	85,7	85,5	85,1
Lmin	73,1	72,6	72	73,3	73,5

Tabla n° 23: Promedio del Impacto Acústico en Autopista Central Sin Barrera.

Promedio	[dBA]
LeqA	79,50
Lmax	85,78
Lmin	72,90

Se observa en la Tabla n° 22 un impacto acústico bastante parejo en los cinco puntos de medición, esto se debe al gran y continuo flujo vehicular que posee esta autopista, como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla n° 24: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Autopista Central sin barrera.

Tipo de vehículo	Cantidad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
A	238	275	288	300	275
B	15	20	23	23	20
C	10	10	3	8	28
D	13	5	3	10	3

Luego se tomaron los datos en el sector con el sistema de barreras acústicas, con una diferencia de tiempo de 10 min por el cambio de sector.

Las mediciones se hicieron en el sector opuesto de la autopista, sector oriente, aproximadamente en la mitad del sistema de barreras para evitar el error producido en los extremos del sistema. A una distancia de 13 m desde el centro de la pista de circulación más cercana y a una altura del sonómetro de 1,2 m.

Se debe considerar la existencia de una caletera de tres pistas paralela a la autopista ubicada entre el sonómetro y el sistema de barreras, con un alto tráfico de vehículos del 20% del flujo total aproximadamente.



Figura n° 30: Toma de datos en Autopista Central con sistema de barreras.

A continuación se resumen los datos obtenidos de las mediciones en el sector con barreras acústicas:

Tabla n° 25: Resumen de toma de datos en Autopista Central con barreras.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Duración	0:05:00	0:05:00	0:05:00	0:05:00	0:05:00
LeqA	77,4	77,9	76,1	74,8	76,2
Lmax	84,1	87,7	82,8	83,1	81,6
Lmin	66,2	67,2	65,7	66,2	66,3

Tabla n° 26: Promedio del impacto acústico en Autopista Central con barrera.

Promedio	[dBA]
LeqA	76,48
Lmax	83,86
Lmin	66,32

Se puede considerar el L_{min} como el momento en el cual no había flujo vehicular por la caletera, habiendo una diferencia de 10 dBA entre el $LeqA$ y el L_{min} . Se puede inferir de los datos presentados que la caletera tiene un fuerte impacto en este sector y es posible que las barreras provoquen un apantallamiento, es decir, que el ruido producido por la caletera se refleje en las barreras produciendo un mayor impacto acústico en las viviendas junto a la autopista. Otro factor que puede influir en la baja eficiencia del sistema de barreras es el montaje de éstas, ya que existe

una zona en la cual un poste presente provocó que las barreras fuesen construidas con un traslape con respecto de la calzada dejando un orificio que anula el efecto de filtro del ruido de la barrera, como se muestra en la Figura n° 31.



Figura n° 31: Orificio en sistema de barreras acústicas en Autopista Central.

A continuación se presenta el flujo vehicular de la Autopista Central durante la toma de datos en el sector con sistema de barreras acústicas.

Tabla n° 27: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Autopista Central con Barrera.

Tipo de vehículo	Cantidad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
A	313	320	325	300	275
B	15	18	10	10	13
C	8	10	18	8	10
D	13	3	3	10	3

6.2.3 Santa María de Manquehue (Costanera) – Autopista urbana sin sistema de barreras

Esta toma de datos se realiza en la intersección de las calles Vía Aurora y Santa María. Es un sector residencial donde las casas que se encuentran en la calle Santa María reciben todo el impacto acústico de la Costanera.

Se elige esta esquina debido a peticiones anteriores de mediciones de impacto acústico en este sector, después de la construcción de la Costanera, por un residente de Vía Aurora.



Figura n° 32: Toma de datos en Santa María, Costanera.

Características del día en el cual se tomaron los datos y el lugar:

- Día: Martes 3 de Mayo
- Hora: 10:15.
- Temperatura: 11° C
- Humedad: 54%
- Viento: 2 km/h
- Velocidad promedio: 90 km/h

A continuación se presentan los datos obtenidos a una distancia de 12 m desde el centro de la pista de circulación más cercana y a una altura del sonómetro de 1,2 m.

Tabla n° 28: Resumen de toma de datos en Santa María.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	R. Ambiente
Duración	0:05:02	0:05:05	0:05:02	0:05:00	0:05:01	0:09:42
LeqA	75,0	74,9	73,7	72,7	72,3	55,6
Lmax	84,5	84,6	84,8	80,1	79,8	72,6
Lmin	65,3	65,1	66,5	63,2	62,6	46,4

Tabla n° 29: Promedio del impacto acústico en Santa María.

Promedio	[dBA]
LeqA	73,72
Lmax	82,76
Lmin	64,54

Como se puede observar en las tablas presentadas, el ruido ambiente es menor a 10 dBA en comparación con el ruido producido por la Costanera y en ocasiones los valores alcanzan hasta los 85 dBA, siendo un valor riesgoso si se está expuesto a muchas horas continuas.

A continuación se presenta una imagen del sector en el cual se tomó los datos del ruido ambiente. Éste sector se encuentra en la parte posterior de las casas que están frente a la Costanera.



Figura n° 33: Toma de datos del ruido ambiente en Santa María, Costanera.

Tabla n° 30: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Santa María.

Tipo de vehículo	Cantidad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
A	300	265	230	225	228
B	18	15	13	13	10
C	13	18	25	23	13
D	3	3	0	3	0

Con la tabla de datos en banda de octava es posible distinguir cuales son las frecuencias que se encuentran presentes en esta vía y son más influyentes. Se puede apreciar que son frecuencias bajas las que logran los mayores decibeles, del orden de los 63 – 125 Hz, lo cual concuerda con la teoría de que el ruido rodado es un ruido de frecuencias bajas.

Tabla n° 31: Registro de bandas de octava de toma de datos en Santa María.

Frecuencia [Hz]	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	R. Ambiente
16	60,8	62,3	59,0	60,9	59,6	52,7
31,5	64,6	66,0	62,2	65,3	65,9	52,5
63	75,0	69,3	73,1	70,3	69,0	53,4
125	73,1	70,9	71,4	68,7	66,8	55,7
250	67,7	65,9	69,3	65,3	66,0	49,7
500	66,2	65,2	62,7	63,2	62,4	45,8
1000	66,1	66,3	64,9	63,6	63,8	47,3
2000	63,9	64,3	62,1	61,9	60,9	43,0
4000	54,9	54,7	53,2	52,3	50,8	34,1
8000	46,1	45,1	45,5	41,8	41,7	31,5

6.2.4 Nogales (Ruta 5 Norte) – Autopista rural con sistema de barreras

En la Ruta 5 Norte, en la comuna de Nogales, V Región, se instaló un sistema de barreras acústicas de hormigón reforzadas en el interior con lana de vidrio, la cual permite una absorción del sonido.

Las barreras miden 3 m de altura y cubren un amplio tramo protegiendo a la comuna de Nogales del impacto acústico de la Ruta 5.

Características del día en el cual se tomaron los datos y el lugar:

- Día: Martes 7 de Junio
- Hora: 11:15.
- Temperatura: 9° C
- Humedad: 81%
- Viento: 4 km/h
- Velocidad promedio: 100 km/h

La primera toma de datos se realizó en una plaza junto a las barreras acústicas en el sector poniente de la autopista.



Figura n° 34: Toma de datos con sistema de barreras en Nogales, Ruta 5 Norte.

A continuación se presentan los datos obtenidos a una distancia de 20 m desde el centro de la pista de circulación más cercana y a una altura del sonómetro de 1,2 m.

Tabla n° 32: Resumen de toma de datos en Autopista Central con barreras.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Duración	00:05:01	00:05:01	00:05:01	00:05:01	00:05:01
LEQ	63,0	59,3	58,3	64,2	58,6
Lmax	69,4	63,9	63,8	72,5	63,6
Lmin	56,4	52,8	51,4	51,7	52,6

Tabla n° 33: Promedio del impacto acústico en Ruta 5 Norte con barreras.

Promedio	[dBA]
LeqA	60,68
Lmax	66,64
Lmin	52,98

Se observan valores bastante razonables con la presencia de barreras acústicas. Tal vez se deba al menor flujo vehicular que presenta esta ruta, como se muestra a continuación:

Tabla n° 34: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Ruta 5 Norte con barrera.

Tipo de vehículo	Cantidad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
A	80	63	68	45	48
B	15	5	5	5	10
C	20	10	8	20	8
D	0	0	0	0	0

Sin embargo hay que considerar que esta ruta tiene un mayor porcentaje de vehículos pesados que los otros casos estudiados, lo cual es un factor importante en el impacto acústico.

Tabla n° 35: Registro de bandas de octava de toma de datos en Ruta 5 con barrera.

Frecuencia [Hz]	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
16	57,8	61,7	54,2	57,7	60,3
31,5	63,5	60,1	58,7	60,8	59,9
63	68,5	62,3	61,1	63,4	63,4
125	57,7	57,1	58,9	61,5	58,3
250	57,8	52,8	50,7	60,5	51,8
500	55,5	50,1	49,0	56,8	49,3
1000	54,0	50,5	49,5	55,1	50,1
2000	49,2	47,3	46,8	49,7	46,2
4000	40,4	39,5	37,8	41,9	38,0
8000	30,0	31,5	27,4	33,3	29,1

Luego se dispuso a tomar los datos del sector sin el sistema de barreras, unos 300 m hacia el sur de la Ruta 5 Norte, a 25 m de distancia desde el centro de la pista más cercana de circulación y a una altura del sonómetro de 1,2 m.



Figura n° 35: Toma de datos sin sistema de barreras en Nogales, Ruta 5 Norte.

A continuación se presentan los datos obtenidos:

Tabla n° 36: Resumen de toma de datos en Ruta 5 Norte sin barreras.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Duración	00:05:05	00:05:28	00:05:17	00:05:00	00:05:02
LEQ	68,5	67,4	67,5	67,4	67,2
Lmax	81,4	77,9	76,2	75,1	75,4
Lmin	54,5	57,6	56,2	54,3	54,7

Tabla n° 37: Promedio del impacto acústico en Ruta 5 Norte sin barrera.

Promedio	[dBA]
LeqA	67,60
Lmax	77,20
Lmin	55,46

Si se compara los Lmax del sector sin sistema de barreras y con el sistema de barreras, que puede ser el caso en el cual pasaban vehículos pesados, hay una diferencia de 10 dBA, es decir, el sistema de barreras estaría atenuando en 10 dBA el impacto de la ruta. Éste es un valor relativamente bueno, que puede deberse a la porosidad del hormigón que recubre las barreras y/o a la lana de vidrio que se encuentra en el interior de la barreras y está expuesta debido al diseño de éstas, el cual consta de unos rectángulo carentes de hormigón, dejando ver la lana de vidrio y dejándola actuar como absorbente acústico.



Figura n° 36: Sistema de barreras en Nogales, Ruta 5 Norte.

Tabla n° 38: Registro de paso de vehículos durante toma de datos en Ruta 5 Norte sin barrera.

Tipo de vehículo	Cantidad				
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
A	55	60	85	60	73
B	3	10	18	8	13
C	13	15	13	13	15
D	0	0	0	0	0

Tabla n° 39: Registro de bandas de octava de toma de datos en Ruta 5 sin barrera.

Frecuencia [Hz]	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
16	56,1	57,9	61,2	58,4	60,5
31,5	62,2	60,7	60,7	60,4	61,4
63	67,6	70,2	65,8	68,2	69,1
125	55,6	62,9	63,7	62,1	64,3
250	60,3	60,9	58,6	58,5	60,1
500	60,3	56,4	55,9	56,3	55,9
1000	59,4	57,9	58,6	59,0	58,1
2000	57,2	56,8	57,3	56,8	56,7
4000	49,2	49,0	49,2	48,6	49,2
8000	45,5	43,8	47,0	40,7	41,2

Al comparar la Tabla n° 39 con la Tabla n° 35 se puede observar que el sistema de barreras tiene un mayor impacto para frecuencias altas. Se logra ver una diferencia desde los 125 Hz que va aumentando a medida que aumenta la frecuencia, por lo que se puede deducir que lo que está logrando un mejor rendimiento en el sistema de barreras en la lana de vidrio, absorbiendo las frecuencias altas y disminuyendo el impacto global.

CAPITULO 7: RESULTADOS

7.1 Resultado de los modelamientos

Utilizando los modelamientos descritos en el Capítulo 5, se calculan las emisiones que tendría cada uno de los casos que se estudiaron de nuestro país, logrando hacer una comparación con los datos obtenidos en terreno.

Cada uno de los modelamientos depende de distintas variables, algunas de ellas se dejaron fijas para los cuatro casi estudiados.

Dentro de las variables fijas se encuentran:

- Φ (ángulo visual) = 120°
- G (Pendiente) = 3%
- β (factor de suelo) = 0
- TD = 0,2 m
- Tipo de Carpeta: Hormigón con tratamiento escoba metal.
- h: altura del sonómetro (altura media de propagación) = 1,2 m

7.1.1 Ruta 68

Variables a considerar de éste caso:

- N_L (Flujo de vehículos livianos) = 900 veh/h
- N_M (Flujo de vehículos medianos) = 180 veh/h
- N_P (Flujo de vehículos pesados) = 150 veh/h
- I (flujo total) = 1500 veh/h
- v_L (velocidad media de vehículos livianos) = 120 km/h
- v_M (velocidad media de vehículos medianos) = 90 km/h
- v_P (velocidad media de vehículos pesados) = 70 km/h
- v (velocidad media) = 100 km/h
- d (distancia desde el receptor hasta el centro de la vía) = 8 m
- P (% vehículos pesados) = 0,12
- l_s = longitud de la sección determinada por el ángulo de barrido = 6 m

A continuación se presentan los valores entregados por los modelamientos considerando las variables presentadas anteriormente:

Tabla n° 40: Resumen de modelamientos de la Ruta 68.

	Ruta 68, Leq [dBA]
In situ	75
USA	80,43
Inglaterra	73,03
Alemania	96,51
Países Nórdicos	70,03
Suiza	78,07
Chile, Valdivia	73,65
Chile, Universidad	62,93

Como se puede observar en la Tabla n° 40, los modelamientos de Inglaterra, Suiza y Chile (Valdivia) son los que más se asemejan al caso de la Ruta 68.

Se debe considerar que es una ruta de alta velocidad y que los datos fueron tomados a una distancia relativamente cercana de la fuente emisora.

7.1.2 Autopista Central

Variables a considerar de éste caso:

- N_L (Flujo de vehículos livianos) = 3000 veh/h
- N_M (Flujo de vehículos medianos) = 270 veh/h
- N_P (Flujo de vehículos pesados) = 180 veh/h
- I (flujo total) = 3500 veh/h
- v_L (velocidad media de vehículos livianos) = 90 km/h
- v_M (velocidad media de vehículos medianos) = 70 km/h
- v_P (velocidad media de vehículos pesados) = 50 km/h
- v (velocidad media) = 70 km/h
- d (distancia desde el receptor hasta el centro de la vía) = 8 m
- P (% vehículos pesados) = 0,05
- l_s = longitud de la sección determinada por el ángulo de barrido = 6 m

Tabla n° 41: Resumen de modelamientos de la Autopista Central.

	Autopista Central, Leq [dBA]
In situ	80
USA	79,24
Inglaterra	73,64
Alemania	86,02
Países Nórdicos	66,08
Suiza	75,91
Chile, Valdivia	73,78
Chile, Universidad	51,81

En esta autopista es notorio el aumento de flujo vehicular. Pero a su vez tiene un bajo porcentaje de vehículos pesados y menor velocidad del flujo en general.

La tabla anterior presenta el modelamiento de USA como el más cercano a los datos tomados en terreno. Esto se puede deber al bajo porcentaje de vehículos pesado que contiene esta autopista, siendo USA uno de los modelamientos que separa en tres categorías el cálculo del nivel sonoro equivalente, para agruparlos luego en un resultado final. También es importante mencionar que este caso es el de velocidades más variadas, por lo que es importante considerar a cada tipo de vehículo por separado.

7.1.3 Costanera, Santa María

VARIABLES A CONSIDERAR DE ÉSTE CASO:

- N_L (Flujo de vehículos livianos) = 3000 veh/h
- N_M (Flujo de vehículos medianos) = 180 veh/h
- N_P (Flujo de vehículos pesados) = 240 veh/h
- I (flujo total) = 3500 veh/h
- v_L (velocidad media de vehículos livianos) = 100 km/h
- v_M (velocidad media de vehículos medianos) = 80 km/h
- v_P (velocidad media de vehículos pesados) = 60 km/h
- v (velocidad media) = 90 km/h
- d (distancia desde el receptor hasta el centro de la vía) = 10,5 m
- P (% vehículos pesados) = 0,1
- l_s = longitud de la sección determinada por el ángulo de barrido = 6 m

Tabla n° 42: Resumen de modelamientos de la Costanera, Santa María.

	Santa María, Leq [dBA]
In situ	74
USA	80,37
Inglaterra	74,29
Alemania	85,42
Países Nórdicos	69,16
Suiza	78,88
Chile, Valdivia	76,05
Chile, Universidad	50,61

El modelamiento con resultados más cercanos a 74 dBA es el de Inglaterra. Se puede deber a la corrección por velocidad de vehículos pesados que tiene este modelo, ya que esta autopista tiene un 10% de vehículos pesados. En este modelamiento también es relevante la distancia a la cual se encuentra la fuente, siendo 10,5 m una distancia bastante cercana, por lo que algunos otros modelos tienen correcciones insignificantes ante tan corta distancia.

7.1.4 Ruta 5 Norte, Nogales

VARIABLES A CONSIDERAR DE ESTE CASO:

- N_L (Flujo de vehículos livianos) = 900 veh/h
- N_M (Flujo de vehículos medianos) = 120 veh/h
- N_P (Flujo de vehículos pesados) = 180 veh/h
- I (flujo total) = 1200 veh/h
- v_L (velocidad media de vehículos livianos) = 120 km/h
- v_M (velocidad media de vehículos medianos) = 90 km/h
- v_P (velocidad media de vehículos pesados) = 80 km/h
- v (velocidad media) = 100 km/h
- d (distancia desde el receptor hasta el centro de la vía) = 25 m
- P (% vehículos pesados) = 0,15
- l_s = longitud de la sección determinada por el ángulo de barrido = 10 m

Tabla n° 43: Resumen de modelamientos de la Ruta 5 Norte.

	Ruta 5 Norte, Leq [dBA]
In situ	70
USA	76,19
Inglaterra	64,59
Alemania	66,59
Países Nórdicos	64,12
Suiza	70,13
Chile, Valdivia	69,20
Chile, Universidad	33,18

Claramente los modelamientos de Suiza y de Chile (Valdivia) son los que más se asemejan a la situación de la Ruta 5 Norte. Este es el caso con mayor porcentaje de vehículos pesados, a mayor distancia fuente-receptor y con el menor flujo vehicular.

Debido al aumento de distancia entre la fuente y el receptor, el modelamiento de Suiza es el más certero ya que tiene tres correcciones en él que dependen de esta distancia, las cuales son: corrección por distancia, corrección por suelo y corrección por absorción aérea. Correcciones que los otros modelamientos no consideran y a esta distancia pueden llegar a ser imprescindibles.

7.1.5 Barreras acústicas de Nogales

A continuación se presentan los valores teóricos de atenuación por pérdida de inserción de las barreras acústicas de Nogales, se hace el cálculo para las seis bandas de octava más relevantes.

Se utiliza el método de Maekewa que es ampliamente utilizado para calcular la pérdida por inserción de barreras para la industria y tráfico vehicular [27]. La ecuación se presenta a continuación:

$$IL_{\text{barra}} = 10 \cdot \log(3 + 10 \cdot N \cdot K)$$

Para esto se necesita calcular λ (longitud de onda) y así obtener N (número de Fresnel)

Para lograr calcular λ , se utiliza la fórmula:

$$\lambda \times f = v$$

Dónde:

v = velocidad del sonido en el aire (340 m/s)

f = frecuencia en Hz.

Conocido el valor de λ es posible calcular el número de Fresnel (N) utilizando la fórmula que se presenta en el ANEXO II, Barreras delgadas, donde los valores para d_1 , d_2 y d son los siguientes:

$d_1 = 13,3$ m, $d_2 = 6,8$ m, $d = 20$ m.

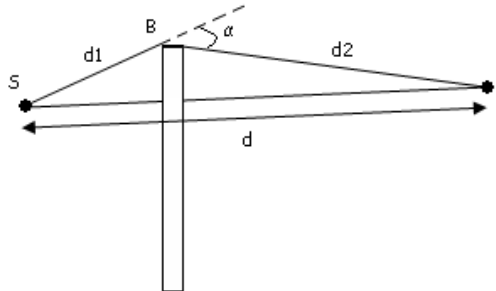


Figura n° 37: Dibujo de las distancias entre la fuente (S) y el receptor (R)

K es el factor de corrección para los efectos atmosféricos. Dado que la distancia entre receptor y fuente es menor a los 100 m, $K = 1$.

Tabla n° 44: Cálculo de pérdida por inserción de las barreras de Nogales.

$V_{\text{sonido}} [\text{m/s}] = 340$		$K = 1$	
Frecuencia	λ	N	$IL_{\text{barra}} [\text{dBA}]$
125	2,720	0,074	5,72
250	1,360	0,147	6,50
500	0,680	0,294	7,74
1000	0,340	0,588	9,49
2000	0,170	1,176	11,69
4000	0,085	2,353	14,24

Se realiza una diferencia entre los datos obtenidos con barreras acústicas y sin barreras acústicas en la comuna de Nogales, para así lograr comparar la atenuación teórica y real del sistema de barreras.

Tabla n° 45: Pérdida por inserción de las barreras de Nogales in situ.

Frecuencia [Hz]	Con Barreras [dBA]	Sin Barreras [dBA]	Δ [dBA]
125	58,7	61,7	3,0
250	54,7	59,7	5,0
500	52,1	56,9	4,8
1000	51,9	58,6	6,7
2000	47,8	57	9,2
4000	39,5	49,1	9,6

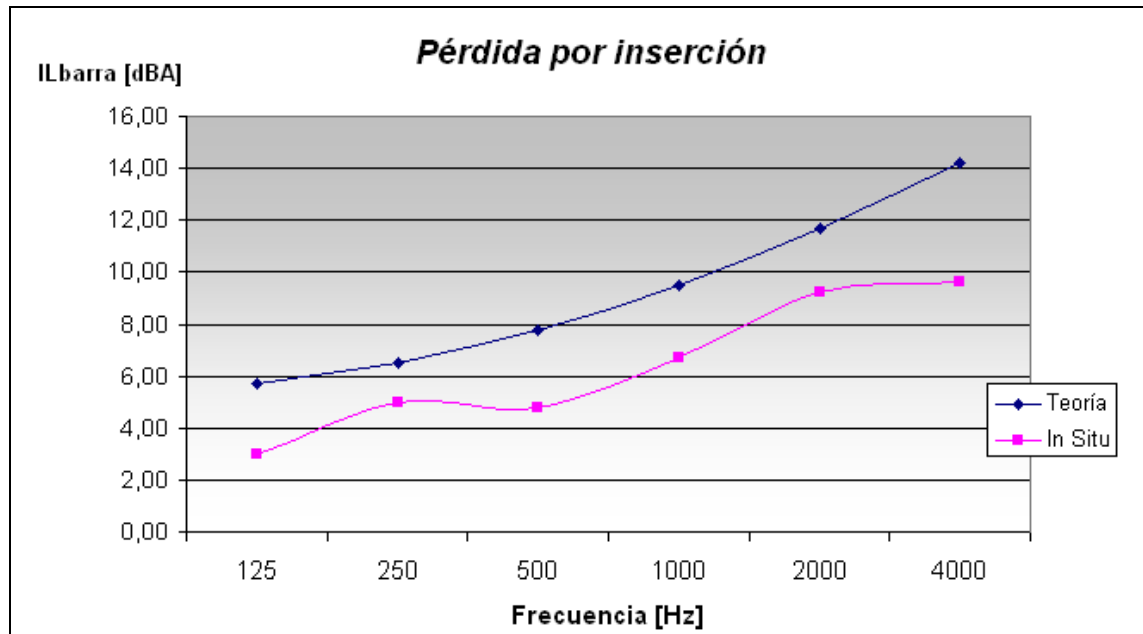


Figura n° 38: Gráfico por bandas de octava de pérdida por inserción

Se puede apreciar en la Figura n° 38 que los valores teóricos son mayores que los valores obtenidos en terreno, pero aún así la teoría entrega valores bastante cercanos a los obtenidos in situ, con una diferencia máxima de 4,6 dBA la cual ocurre a frecuencias altas (4000 Hz). Esta diferencia entre los valores obtenidos en la práctica y los valores calculados mediante fórmulas es posible que se deba a la falta de consideración que se le da al ruido del fondo en la teoría, ya que alrededor del sector donde se tomaron los datos está la existencias de calles, locales, transeúntes que producen emisiones sonoras discontinuas, pudiendo afectar en la toma de datos. Otro factor importante es el hecho que el modelo considera al sistema de barreras como una barrera infinita, lo cual en la realidad no es verdad.

También se debe considerar la diferencia de propiedades que se producen en las juntas de los paneles que constituyen el sistema de barreras acústicas, las cuales pueden disminuir la eficiencia de la mitigación acústica de éstas.

CAPITULO 8: ANÁLISIS Y PROPUESTAS

En el presente capítulo, se plantearán propuestas concretas para la generación de una metodología cuyo objetivo es normar y regular las emisiones de ruido del flujo vehicular. El estudio tiene 3 pilares que subyacen y sustentan las líneas de acción de corto, mediano y largo plazo consolidando una estrategia medioambiental enfocada en emisiones acústicas, estos son: Mediciones y observaciones en terreno; Normativas vigentes en el extranjero aplicables a las condiciones de Chile, y por último, el estudio de las organizaciones que actúan directa e indirectamente en las decisiones de inversión para proyectos de mitigación de ruido.

La estructura propuesta se basa en una estructura estratégica de corto, mediano y largo plazo que actúa en distintos ámbitos de acción.

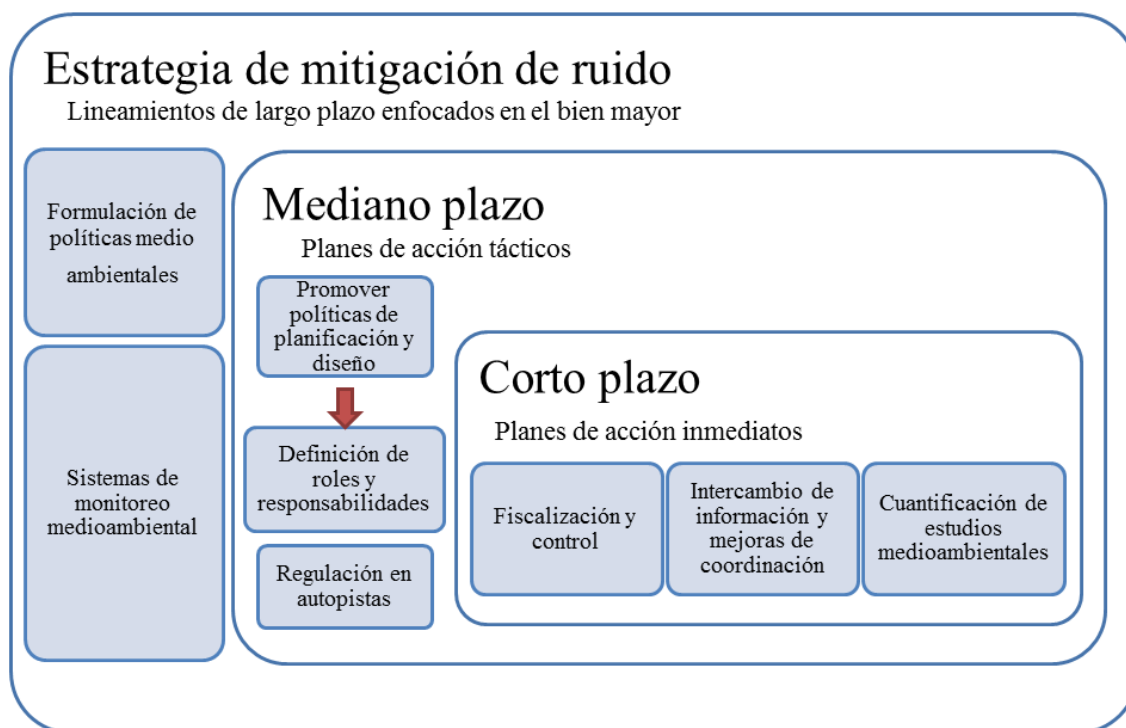


Figura n° 39: Formulación estratégica de mitigación de ruido

8.1 Planes y estrategia de mitigación de ruido

Corresponden a las líneas de acción a tomar en el largo plazo, las cuales obedecen a las necesidades detectadas en el estudio y que impactan directamente a las directrices medioambientales en el desarrollo de la construcción de autopistas en Chile dentro de las siguientes décadas.

Las propuestas se segregan en 2 grupos:

8.1.1 Formulación de políticas medioambientales y ruido

Toda línea de acción medioambiental debe tener un sólido respaldo jurídico que sustente las operaciones y asegure la solidez de las medidas tomadas en el largo plazo. Se plantean las siguientes propuestas:

- Promover la adopción de un enfoque ecosistémico, como vía para el manejo integrado de los ruidos, en específico dada la inexistencia de una norma aplicada para fuentes móviles.
- Formular y poner en práctica políticas nacionales, así como el intercambio de experiencias regionales, que promuevan el manejo de barreras acústicas y consideraciones de diseño de autopistas y edificios.
- Promover la implementación de políticas nacionales que aseguren la integración de componentes económicos, sociales y ambientales, incluyendo la evaluación de proyectos considerando las externalidades generadas sobre el medioambiente y las comunidades.
- Prevención, mitigación y control de la degradación ambiental en todas las instancias de evaluación de licitaciones y concesiones a empresas privadas.
- Promover el desarrollo y aplicación de metodologías para la valoración económica de los recursos naturales y perjuicios a la vida humana y animal, así como los múltiples servicios ambientales que estos pueden ofrecer.
- Incrementar los esfuerzos que se llevan a cabo para el desarrollo y uso de indicadores de sustentabilidad e impacto ambiental en los proyectos de autopistas.
- Mejorar el intercambio de experiencias y aplicabilidad de las normas extranjeras en cada ámbito de los impactos ambientales, determinando con certeza la aplicabilidad de cada una de éstas en diferentes criterios.

8.1.2 Sistemas de monitoreo medioambiental (SMA)

Se plantea la implementación y posterior uso de un sistema integrado de monitoreo medioambiental, el cual tendrá por objetivo verificar las condiciones y las emisiones de las obras del país de manera de asegurar la calidad de las obras y el real impacto sobre los ecosistemas presentes en los lugares de las obras.

Para ello se debe manejar una metodología de gestión integrada que reúna 3 elementos: Sistemas de calidad, medio ambiente y seguridad.

Las propuestas específicas de un SMA son:

- Identificar, manejar y reducir los efectos ambientales y los riesgos de los proyectos catalogados como tal por una autoridad con los atributos para ello, como el SEIA.
- Capacitar y asegurar la participación tanto privada como gubernamental para una mejora continua del desempeño medioambiental y de mitigación de ruidos.
- Los participantes del SMA deben tener conocimientos tanto de calidad como del medio ambiente y tomar en cuenta los efectos que se tienen sobre el ser humano.
- Se debe tener en consideración la ubicación física del proyecto a estudiar y las actividades que se realizan en el área donde se encuentra.

8.2 Planes de mediano plazo

Los planes de mediano plazo o tácticos están enfocados en mejoras aplicables dentro de los próximos años y que deben ser tomados para su ejecución de manera de asegurar las políticas de largo plazo. La propuesta se enfoca en un pilar fundamental el cual es el impulso de políticas de planificación para los actores presentes en los procesos de licitación y concesiones, y la regulación vigente en autopistas.

8.2.1 Promover políticas de planificación y diseño

Uno de los métodos de mitigación más utilizados en países desarrollados es el mejoramiento en el diseño del proyecto vial. Una forma de disminuir el nivel de emisiones es evitar pendientes pronunciadas, una carpeta más porosa, disminuir al máximo las curvaturas y en tramos residenciales disminución de velocidad de viaje. Actualmente en Chile se ha validado dentro del MOP y concesiones el uso de carpetas más silenciosas, no así en el Manual de Carreteras. Todas estas consideraciones se deben hacer dentro de lo que permita la topografía del terreno y es muy probable que al intentar disminuir estos factores al máximo habrá un aumento en el costo del proyecto, que se debe evaluar.

8.2.2 Roles y responsabilidades

Dentro de las propuestas asociadas a los roles y responsabilidades, es necesario explicar previamente el flujo básico de interacción entre los distintos organismos partícipes de los procesos de licitación y concesiones de autopistas y que pueden generar impacto acústico.

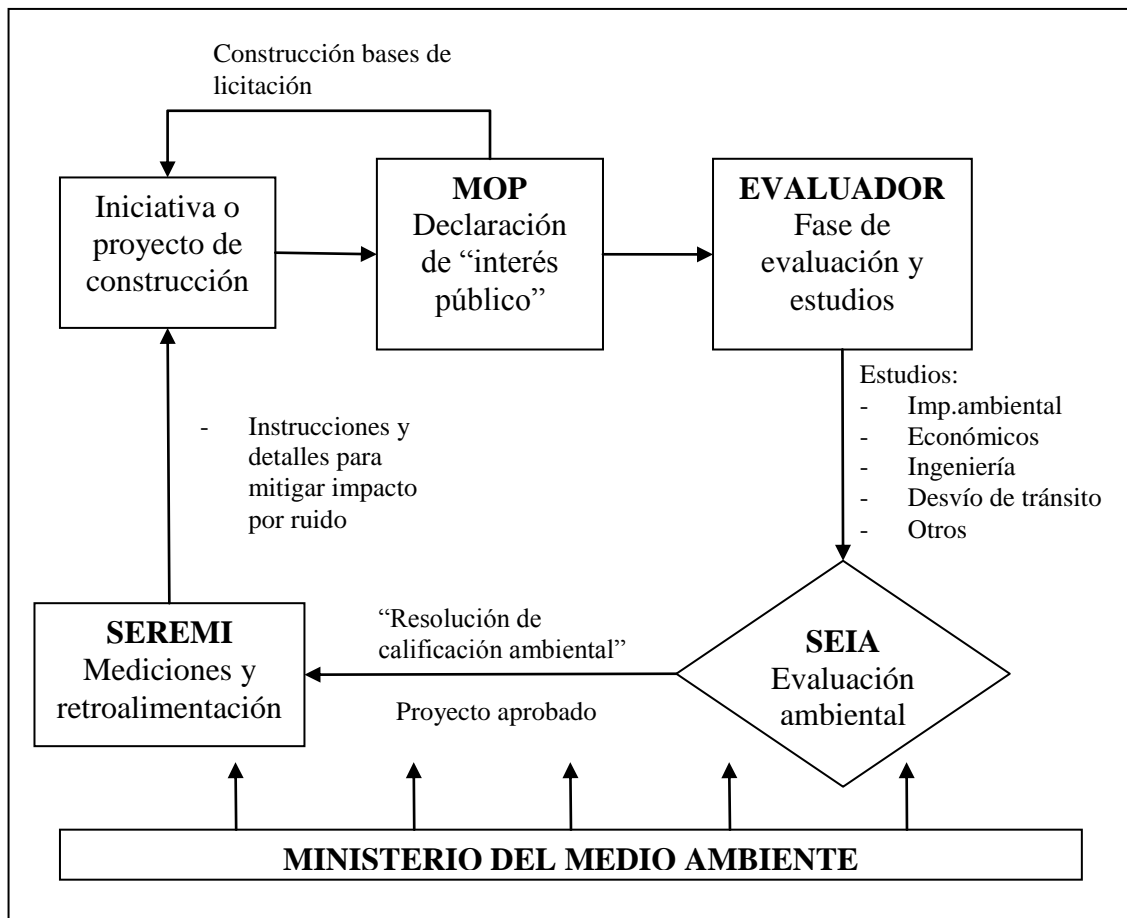


Figura n° 40: Actores del proceso de licitación y concesión

Las iniciativas o proyectos son generados principalmente por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), en donde las propuestas en una fase inicial son analizadas con estudios de perfil y factibilidad técnica a nivel básico. Una vez que son aprobados, el MOP declara de “interés público la propuesta”, lo cual gatilla que una serie de actores interactúen en la elaboración de las propuestas que generarán las bases de licitación. En primera instancia, se selecciona de entre un grupo de evaluadores, una empresa externa para que estudie diversas aristas del proyecto: Estudios de impacto ambiental, económicos, de ingeniería, de desviaciones de tránsito y otros. Cabe destacar que durante estos procesos y los próximos a mencionar el Ministerio del Medio Ambiente interviene de tal manera de generar discusión asegurando la integridad medioambiental.

El SEIA (Sistema de evaluación de impacto ambiental) es el organismo que resuelve si el proyecto es viable o no dadas las distintas variables y el potencial impacto sobre el medioambiente. En caso de ser aprobado el proyecto, se emite un informe llamado “Resolución de calificación ambiental”, documento que contiene el estudio formal en donde se definen todos

los requisitos que debe cumplir el proyecto en cuestión de manera no alterar en mayor forma los sistemas presentes en el lugar de las obras.

Es la SEREMI de salud, el organismo que toma como antecedente el documento emitido por el SEIA, de manera de evaluar y plantear sus requerimientos como retroalimentación al MOP desde el punto de vista de no afectar a las comunidades y la biodiversidad presente en los lugares de ejecución.

Según comentarios y experiencias recogidos de opiniones de expertos y miembros de estos organismos, se plantean las siguientes alternativas:

- Actualmente el SEIA (Servicio de Evaluación Ambiental) regula las carreteras en Chile, ante esto:
 - o Potenciar figuras que interactúen con el SEIA y presenten apoyo en el cumplimiento a cabalidad de la Ley 20.417.
 - o Crear un organismo o área que controle el plan regulador de cada comuna, definiendo responsabilidades en el posible cambio de éste.

8.2.3 Regulación en autopistas

- Construcción, o en su defecto, agilización en el proceso de redacción y aprobación de una norma cuyo objetivo sea precisamente establecer directrices en el diseño de las autopistas como principal medida para la mitigación de impacto acústico.

Actualmente el Ministerio del Medio Ambiente está en proceso de elaboración de una norma enfocada en regular el ruido de los tubos de escape de vehículos livianos, medianos y motos. Si bien esta norma tendrá positivas consecuencias en la aplicación urbana, desde el punto de vista de carreteras carecerá de efectividad bajo el supuesto que a pesar de tener un flujo abundante de vehículos silenciosos, sigue ocasionando un impacto acústico. Es imprescindible avanzar en ésta área.

- Existen 2 normas vigentes que regulan el ruido en Chile: el DS-146 que se basa en fuentes fijas, y el DS-129 que establece normas de emisión de ruido para buses de locomoción colectiva. Ambas no aplican al impacto acústico de autopistas, ya que la autopista no es una fuente fija, y la norma de buses es particularmente para el bus individual, no se considera el ruido del roce neumático-calzada, ni el efecto del flujo vehicular. Se requiere avanzar en la profundización de las carencias descritas para ambas normas con el objeto de mitigar de forma real los fenómenos que no están siendo cubiertos por norma o regulación alguna.

- Regulaciones a la ciudadanía: La investigación efectuada revela que diversos son los países que establecen leyes de estricto cumplimiento para el público general en relación a las emisiones de contaminación acústica. Esto es, fijar valores para distintos tipos de territorio de emisiones de ruido en bloques claramente definidos, como el día y la noche, y establecer entes controladores en el control del fiel cumplimiento de esta imposición.
- Con respecto de la exposición humana, se deberán evaluar las reacciones de las comunidades aledañas a los potenciales proyectos, desde el punto de vista del perjuicio a ocasionar y cuantificar dichos efectos en los flujos de cada proyecto, esto claramente con el objeto de generar las compensaciones necesarias en términos de estructura (construcción de barreras acústicas), consideraciones en el diseño de las autopistas, reubicación de familias, etc.
- Regulación y control de cambios de plan regulador, a no ser que las nuevas viviendas próximas a la autopista, tengan el aislante acústico adecuado, logrando en el interior de la vivienda niveles apropiados para la salud de los moradores.

8.3 Planes de acción de corto plazo

Corresponden a las acciones inmediatas requeridas de manera de asegurar las condiciones mínimas de seguridad y resguardo medioambiental. Cabe destacar que las propuestas están enfocadas en las observaciones in-situ y un análisis de factibilidad de instauración de nuevas políticas en reuniones con el MOP y el Ministerio del Medio Ambiente.

8.3.1 Fiscalización y control

- Como se pudo apreciar en la Autopista Central, el sistema de barreras acústicas no cumple con algunos estándares de calidad de normas extranjeras, esto sugiere que existan continuas fiscalizaciones que verifiquen el fiel cumplimiento de lo estipulado en la construcción de las barreras acústicas. El sólo hecho de carecer de la estructura diseñada, puede generar que el impacto en la reducción acústica sea casi nulo, lo cual se verificó en los altos niveles de polución detectados en la Autopista Central.
- En la misma línea, se debiera asignar un organismo responsable de la regulación para las barreras en relación a la concordancia con las bases técnicas del proyecto, tales como, dimensiones, mantenimiento, eficiencia, desempeño estructural, control del vandalismo. Básicamente estándares de calidad.

- Velar por el cumplimiento del límite deseable de exposición máxima de sonido para las viviendas, fijado en 55 dB, y según la directiva de la Unión Europea, el nivel de ruido inocuo en una vivienda urbana debería oscilar entre 30 y 40 dB.

8.3.2 Intercambio de información y mejoras de coordinación

Esta propuesta se sustenta bajo entrevistas e información recibida desde las distintas partes integrantes de los procesos de licitaciones y concesiones, desde el punto de vista de asegurar la integridad medioambiental y mitigación de ruidos hacia las comunidades aledañas a los proyectos:

- Convocar reuniones periódicas con los expertos y agencias regionales especializadas en materia ambiental, con el propósito de intercambiar información con miras a una mejor coordinación entre dichas agencias (MOP, Ministerio del Medio Ambiente, SEIA).
- Promover que en las políticas de planificación, estos miembros se orienten hacia la integración de la temática ambiental incluyendo temas de ruidos y la mejora de los Decretos Supremos (DS.146 y DS.129), el ordenamiento territorial, la prevención y mitigación de riesgos de salud por emisiones acústicas.

8.3.3 Cuantificación de estudios ambientales

Este punto tiene énfasis en la reestructuración de los puntos a evaluar en los estudios que realizan tanto el MOP, como el SEIA identificando o ponderando con mayor importancia los factores medioambientales.

Estudio de impacto ambiental

Como primera aproximación, se deben gestionar distintos estudios de impacto ambiental, en primer lugar, y como se verifica en muchas empresas actualmente, un estudio realizado por empresas externas especialistas. Seguido de esto, se presentan los estudios al SEIA, el cual impone las mitigaciones que se deben tener en consideración en el caso de existir un impacto ambiental. Se considera de gran importancia realizar informes por terceros que evalúen imparcialmente los potenciales efectos nocivos que tengan que incluirse en una evaluación de riesgos hacia comunidades y el medio ambiente.

Determinación costos-beneficio

Incorporar el costo de las externalidades referentes a la contaminación acústica y una política de compensaciones en cada proyecto, independiente de la cercanía a comunidades humanas, ya que la valoración del ruido varía en relación al interés que se tenga de invertir en éste.

- Hay muchas medidas para mitigar el impacto acústico, aquí en Chile, sólo se ha aplicado el sistema de barreras acústicas, solución que en países desarrollados se aplica si ninguna de las otras opciones es viable.
- Lo esencial es mejorar el diseño de las autopistas, es decir, hacer un estudio que permita evaluar el aumento de pendiente, el tipo de carpeta, la velocidad media, flujo de vehículos que se requieran para no superar niveles acústicos que afecten a las viviendas cercanas.
- Mejoramiento de aislamiento acústica de edificios sensibles: escuelas, hospitales, viviendas.
- Analizar tipos de carpetas más silenciosas, velocidades límites, distanciamientos, soterramiento (carretera subterránea), controlar vibraciones, analizar tema costo.

Para lograr un mejoramiento de estos factores, se pueden establecer indicadores de calidad, los cuales se estiman a través de estadísticas. Se estudian proyectos que sean lo menos invasivos posibles y de similares características, que sólo cambie uno de estos factores. Se hace un seguimiento de toma de datos, obteniendo el L_{eq} que está recibiendo el individuo, éste dato se compara en los diversos proyectos en el periodo del mismo año, haciendo una calibración y se puede obtener un índice relacionado a ese factor.

Análisis de externalidades

Evaluación de impuestos adicionales aplicados sobre el valor de los peajes a vehículos más pesados en cuyo caso el nivel de contaminación es mayor. Esto con el objeto de conseguir sectores autoregulados en donde el nivel de riesgo humano y medioambiental sea alto.

Supervisar que los vehículos que ingresen al país cumplan con las normas establecidas en Chile.

CAPITULO 9: CONCLUSIONES

A partir del año 1994 con la promulgación de la Ley 19.300 (actual 20417) sobre “Bases del Medio Ambiente”, se estableció que el ruido es un contaminante ambiental con efectos dañinos para las personas. Esto generó la puesta en vigencia del DS-146 “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas” del Minseggpres en el año 1997, el cual ha sido ampliamente aplicado a nivel nacional. Dado el carácter específico de las autopistas, las cuales no son objeto de aplicación de este decreto, el impacto acústico generado por éstas no está regulado por normativas chilenas. Por esta razón ha sido práctica en estos años utilizar normativa de referencia extranjera citada en la Ley 19.300. Esta última situación no es la más óptima ya que Chile debe contar con normativa propia para atender estos temas de alto interés para la población afectada.

Desde el punto de vista de las fuentes individuales que transitan las autopistas, existe una norma de emisión de ruido para buses interurbanos de locomoción colectiva urbana y rural. Esta norma (DS-129 Mintratel año 2003) está enfocada en la emisión de ruido de los vehículos para condiciones nominales de funcionamiento y no es posible a partir de estas condiciones, predecir ni regular el ruido generado por el conjunto de vehículos que circulan una determinada autopista o carretera. Existe un anteproyecto similar al de los buses el cual regulará las emisiones generadas por vehículos livianos y motocicletas, el cual disminuiría el ruido producido por el motor del vehículo, aminorando los efectos acústicos de uno de los muchos factores de la fuente que influyen en las emisiones. Sin embargo, no considera el impacto producido por el conjunto de vehículos más silenciosos o la velocidad a la que circulan, factores que controlan el impacto acústico de la autopista.

A través de estudios de normativas extranjeras, en el Capítulo 3 se pudo apreciar el distinto énfasis que le dan diferentes países al impacto acústico del ruido del tráfico rodado. Algunos son más restrictivos que otros, sin embargo todos se enfocan en disminuir este impacto utilizando similares parámetros y métodos de validación. Tomando a modo de ejemplo la directiva de la Unión Europea, ésta hace mención a medidas de mitigación como: regulaciones de tráfico, ordenación del territorio, selección de fuentes más silenciosas y otras. También se puede mencionar la normativa suiza que adicionalmente a la regulación propia de las vías de tráfico considera la implementación de medidas de aislamiento acústico en las edificaciones, por lo tanto tiene una normativa más madura, siendo un modelo recomendable para aplicar en Chile.

Por otra parte se debe mencionar la falta de coordinación entre los estamentos públicos que tienen injerencia en los proyectos relacionados con carreteras en Chile. Uno de los temas más importantes es la responsabilidad por el plan regulador, ya que muchos proyectos de autopistas son desarrollados en zonas grises y luego éstas son consideradas de uso residencial, no existiendo acciones definidas ni responsables únicos ante el impacto acústico resultante.

Para lograr mejorar las mitigaciones se debe cambiar la forma y la legislación vigente que los proyectos viales y concesiones deben seguir, los cuales según las experiencias recogidas suelen enfocarse netamente en variables como la reducción en los tiempos de viaje, o minimización de los costos operacionales. Bajo esta mirada las evaluaciones siempre tendrán un sesgo dado el limitado enfoque hacia factores sociales y medioambientales presentes en las normas y leyes actuales.

A nivel internacional se utilizan mecanismos de mitigación eficientes basados en el diseño de la autopista por sobre el uso de barreras acústicas, siendo estas últimas consideradas como recurso final debido al impacto visual que éstas producen. En Chile se ha avanzado en la dirección contraria privilegiando el uso de barreras por sobre otras técnicas de mitigación, y los proyectos se han conducido en ausencia de estudios que internalicen los efectos sobre factores no solo económicos, sino sociales y medio ambientales. Casos especiales existen en ciudades como Hong Kong, que no tienen el espacio necesario para utilizar otros tipos de mitigación que no sean las barreras acústicas desarrollando distintos estudios en base a éstas, para así lograr un mayor provecho de estos grandes muros. Como se presentó en el Capítulo 4, se puede generar energía eléctrica gracias a las oscilaciones producidas por la velocidad de los vehículos que pasan juntos al sistema de barreras, consiguiéndose un beneficio para los moradores cercanos a la instalación.

Se pudo verificar en el trabajo de terreno (Capítulo 6) la carencia de calidad en el montaje y real efectividad de las barreras acústicas de Autopista Central. En algunos sectores en los cuales se realizó la toma de datos, el sistema de barreras no estaba completamente conectado a ras de suelo, dejando agujeros que producen un efecto de difracción, siendo ineficientes en su función. También una de las falencias es el sistema estándar de barreras que se utiliza, siendo que frente a edificios de una altura considerable este tipo de barreras no logra el resultado deseado.

A través del estudio de los modelamientos de emisiones de diversos países y su comparación con casos reales en nuestro país, se concluye que Inglaterra, Suiza y Estados Unidos tienen condiciones similares a Chile, ya que se obtienen valores cercanos entre los modelamientos y la toma de datos en la mayoría de los casos analizados. Se debe tener en consideración la sensibilidad de estos modelamientos a factores como: la velocidad media, porcentaje de vehículos pesados y la distancia

a la fuente, factores que no siempre son precisos, pudiendo incidir considerablemente en los resultados finales. Durante la toma de datos en la comuna de Nogales fue posible comparar la teoría de la pérdida por inserción de las barreras acústicas con la realidad. Se obtuvieron valores bastantes cercanos siendo la teoría más restrictiva que el resultado obtenido in situ, esto se debe a que la teoría no considera factores como el ruido del entorno, ni las juntas entre los paneles de las barreras acústicas y asume un sistema de barreras infinito.

Las propuestas para establecer una estrategia y directrices generales con respecto al manejo del factor ambiental ruido a nivel nacional surgen del estudio analítico y de las experiencias obtenidas en terreno. Es así como se han estratificado en tres niveles los cuales se indican a continuación:

+ Corto plazo, en el cual se plantean 2 medidas: Aumentar las medidas de fiscalización y control de las carreteras actuales, dado que la observación en terreno evidenció una falta absoluta de cumplimiento en los estándares definidos para barreras acústicas como por ejemplo los citados en países como Canadá para cada uno de estos proyectos. Así mismo asegurar que exista un organismo responsable de aquella inspección.

Otra medida puede ser implementar auditorias ambientales permanentes sobre el real cumplimiento de los objetivos establecidos en los estudios de impacto ambiental para reducir las emisiones acústicas y el ruido sobre las comunidades.

+ Mediano plazo, promover las interrelaciones entre los organismos gestores de proyectos viales, los cuales presentan hoy una falta de coordinación evidente y se refleja efectivamente en el resultado de los proyectos. Las entrevistas a distintos agentes tanto del MOP, como del Ministerio de Medio Ambiente y SEIA reflejan problemas en las siguientes áreas: Alcance de las funciones entre uno y otro, falta de visión ampliada del problema acústico y estudios del plan regulador.

Establecer directrices de diseño de carreteras que consideren no sólo factores viales sino además aspectos acústicos relevantes como el diseño de barreras y su desempeño acústico, prestacional y estético. Ejemplo de esto son los casos como Alemania donde se aprecian sistemas de barreras construidas a base de piedras, las cuales no requieren de un mantenimiento permanente, ya que tienen un alto grado de resistencia a las agresiones del entorno y en España mediante un proceso de reciclaje, utilizan el tapiz de los vehículos para fabricar los paneles que se utilizan en los sistemas de barreras acústicas.

+ Largo plazo, promover la promulgación de un instrumento jurídico o en su defecto modificación de la actual Ley 20.417 incorporando la regulación acústica en carreteras, lo cual sería un avance primordial hacia el mejoramiento de las condiciones actuales, en donde se verifica una carencia absoluta de una regulación orientada al control de las emisiones acústicas en carreteras.

BIBLIOGRAFIA

- [1]: Poo B. Caudio; Ruedlinger S. Esteban; Ingenieros Acústicos IDIEM; Barreras acústicas en carreteras, reportaje Revista BIT; Marzo 2009; Pags.54-57.
- [2]: Government of the Hong Kong SAR; Environmental Protection Department; Highways Department; Booklet; Guidelines on Design of Noise Barriers; Second Issue, January 2003.
- [3]: Niveles de ruido en Santiago superan los límites saludables que establece la OMS; Tendencias - Cultural y Entretención; Diario La Tercera; Viernes 1 de Abril de 2011; Pag 45.
- [4]: Profesor Rodríguez J. Gabriel; Física de la Construcción; Ruido en viviendas; 2009.
- [5]: www.chile.com; Comunidad; Estrés: La patología moderna.
- [6]: D.S. N°146; Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas; Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República; 1997.
- [7]: D.S. N°129; Norma de Emisión de Ruidos para Buses de Locomoción Colectiva Urbana y Rural; Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones Subsecretaria de Transportes; 2003.
- [8]: Rougeron. C; Aislamiento acústico y térmico en la construcción; Barcelona; 1977; Págs. 8-13.
- [9]: Ley 19.330; Ley de Bases Generales del Medio Ambiente; Gobierno de Chile, CONAMA; 1994; Artículo 11, Artículo 45.
- [10]: Acondicionamiento Acústico – temas teóricos; 03 Fuentes Sonoras y Propagación del Sonido; Presentación preparada por Arq. Ricardo Estellés Díaz; 2007; Pags 1-2.
- [11]: Harris, Cyril M.; Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido; Cap. 3 Propagación del Sonido al Aire Libre; Pags 1-31.
- [12]: Road Traffic Noise, A study of Skane region, Sweden; June 2008; by Florentina Farcas; Pags. 13.

[13]: Europa: El portal de la Unión Europea. Estados miembros.

[14]: Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25-06-2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental; Diario Oficial de las Comunidades Europeas.

[15]: Zañartu Salas. Matías; Glisser Donoso. Max; Licenciados en Ciencias de la Ingeniería; Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales; Evaluación de Impacto Ambiental Acústico en Carreteras: Un Estudio para Crear una Metodología Específica.

[16]: Reglamento de la Confederación Suiza 814.41, Sobre la Protección Contra el Ruido; del 15 de Diciembre 1986 (Estado el 1ro de Enero 1996).

[17]: U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration; Highway Traffic and Construction Noise – Problem and Response; April 2006; Appendix, 23 CFR Part 772; Pages: 9-12.

[18]: Prepared by SS Wilson Associates; City of Ottawa, Environmental Noise Control Guidelines; Planning and Growth Management Department; Approved by City Council on May 10, 2006.

[19]: Store-from-the-east; Tokio-based magazine and graphic design Studio; Francesco Lipari: Hong Kong Noise Barrier; 01 June 2009.

[20]: GMC, MuroTalud; Pantallas Acústicas; Características; www.murolud.com/Pantallas/Pantallas-Acusticas.html

[21]: MetroAcustic; Barreras antirruído para carreteras, viales; España; El problema del ruido y su solución; www.metroacustic.es

[22]: Empresa Rothfuss; Alemania; Gaviones; 2009; www.rothfuss.de/index.php/gabionen.html

[23]: Tunel San Cristóbal; Sustentabilidad; Comuna de Providencia; 2008; www.tunelsancristobal.cl/publicaspx/Sustentabilidad.aspx

[24]: Revista Ecoamerica; Contra la Contaminación Acústica en las Autopistas Urbanas; Noviembre 2005; Pags. 56 y 57.

[25]: Informe Final, Elaboración de Propuesta de Normativa para la Regulación de la Contaminación Acústica generada por Carreteras y Autopistas; Comisión Nacional del Medio Ambiente; Contrato n° 21-22-004/2001; Diciembre 2001; Ambiente Consultores; Cap. Caracterización de Fuentes; Pags. 6-16.

[26]: ISO 10847:1997; Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types; Pags. 4-10.

[27]: SEIA, Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental; archivo de un proyecto; <https://www.e-seia.cl/archivos/20090422.150437.doc>

ANEXO I

Tabla n° 46: Coeficiente de atenuación del aire, dB/km, para una atmósfera normal a nivel del mar (101,3 kPa) para la propagación del sonido al aire libre.

Temperatura	Humedad Relativa		Frecuencia, Hz				
	%	125	250	500	1000	2000	4000
30°C	10	0,96	1,8	3,4	8,7	29	96
	20	0,73	1,9	3,4	6	15	47
	30	0,54	1,7	3,7	6,2	12	33
	50	0,35	1,3	3,6	7	12	25
	70	0,26	0,96	3,1	7,4	13	23
	90	0,2	0,78	2,7	7,3	14	24
20°C	10	0,78	1,6	4,3	14	45	109
	20	0,71	1,4	2,6	6,5	22	74
	30	0,62	1,4	2,5	5	14	49
	50	0,45	1,3	2,7	4,7	9,9	29
	70	0,34	1,1	2,8	5	9	23
	90	0,27	0,97	2,7	5,3	9,1	20
10°C	10	0,79	2,3	7,5	22	42	57
	20	0,58	1,2	3,3	11	36	92
	30	0,55	1,1	2,3	6,8	24	77
	50	0,49	1,1	1,9	4,3	13	47
	70	0,41	1	1,9	3,7	9,7	33
	90	0,35	1	2	3,5	8,1	26
0°C	10	1,3	4	9,3	14	17	19
	20	0,61	1,9	6,2	18	35	47
	30	0,47	1,2	3,7	13	36	69
	50	0,41	0,82	2,1	6,8	24	71
	70	0,39	0,76	1,6	4,6	16	56
	90	0,38	0,76	1,5	3,7	12	43

Tabla n° 47: Valores para la atenuación del suelo, A_{suelo} , en decibeles para propagación a corta distancia para suelo duro.

SUELO DURO (ASFALTO, HORMIGÓN)							
Altura de la fuente m	Distancia m	Frecuencia, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
0,01	10	-5,7	-5	-3,6	-1,4	1,1	4,1
	20	-5,6	-4,6	-1,8	1,9	5,1	8,5
	40	-5,5	-3,9	-1,4	6,7	10,1	13,7
	60	-5,4	-3,3	4,2	9,8	13,2	16,9
	80	-5,4	-2,7	6,8	12,2	15,5	19,3
	100	-5,3	-2,2	9,2	14	17,4	21,1
0,3	10	-5,4	-4,3	-0,9	5,9	-2,5	-1,9
	20	-5,4	-4	-0,1	6,3	-0,1	-3
	40	-5,4	-3,4	2,9	10,2	4,1	-2,9
	60	-5,3	-2,8	5,8	13,1	7,1	-0,4
	80	-5,2	-2,2	8,4	15,3	9,3	1,7
	100	-5,2	-1,7	10,8	17,1	11,1	3,4
1,2	10	-4	2	0,1	-3	-3	-3
	20	-4,8	-1,9	7,5	-2,7	-3	-3
	40	-4,9	-2,1	6,9	0,5	-3	-3
	60	-4,9	-1,6	9,1	2,9	-3	-3
	80	-4,8	-1	11,6	4,8	-2,8	-3
	100	-4,8	-0,5	13,8	6,4	-1,5	-3

Tabla n° 48: Valores para la atenuación del suelo, A_{suelo} , en decibeles para propagación a corta distancia para suelo blando.

SUELO BLANDO (CÉSPED, VEGETACIÓN)							
Altura de la fuente m	Distancia m	Frecuencia, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
0,01	10	-3,1	0,8	3,9	6	7,3	7
	20	-1,5	5,2	8,6	10,9	12,3	11,9
	40	1,4	11,1	14	16,3	17,7	17,3
	60	3,9	14,8	17,3	19,6	21	20,7
	80	6,2	17,3	19,7	22	23,4	23,1
	100	8,4	19,3	21,6	23,8	25,3	24,9
0,3	10	-2,3	2,8	5	-0,8	-3	-3
	20	-0,8	7	9,1	2,9	-2,9	-3
	40	2	12,8	14,2	7,9	1,4	-3
	60	4,6	16,5	17,5	11,2	4,5	-1,3
	80	6,9	19	18,2	13,5	6,8	0,8
	100	9,1	21	21,7	15,4	8,6	2,6
1,2	10	0,1	4,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
	20	0,9	7	-0,7	-3	-3	-3
	40	3,6	11,6	3,3	-3	-3	-3
	60	6,3	14,8	6,3	-0,6	-3	-3
	80	8,7	17,1	8,5	-1,5	-3	-3
	100	10,9	18,9	10,3	3,2	-2,6	-3

Tabla n° 49: Expresiones empleadas en el cálculo de la atenuación A_{suelo} en bandas de octava, en decibeles para distancias largas.

Frecuencia de banda de octava, Hz					
	As o Ar, dB			Am, dB	
63	-1,5			-3*e	
125	(a*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
250	(b*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
500	(c*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
1000	(d*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
2000	(1*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
4000	(1*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
8000	(1*G)-1,5			-3*e*(1-G)	
Altura de la fuente o el receptor, m					
Diatancia, m	0,5	1,5	3	6	>10
Factor a					
50	1,7	2	2,7	3,2	1,6
100	1,9	2,2	3,2	3,8	1,6
200	2,3	2,7	3,6	4,1	1,6
500	4,6	4,5	4,6	4,3	1,6
>1000	7	6,6	5,7	4,4	1,7
Factor b					
50	6,8	5,9	3,9	1,7	1,5
100	8,8	7,6	4,8	1,8	1,5
>200	9,8	8,4	5,3	1,8	1,5
Factor c					
50	9,4	4,6	1,6	1,5	1,5
100	12,3	5,8	1,7	1,5	1,5
>200	13,8	6,5	1,7	1,5	1,5
Factor d					
50	4	1,9	1,5	1,5	1,5
>100	5	2,1	1,5	1,5	1,5

ANEXO II

Atenuación por barreras contra el sonido.

Una barrera contra el sonido es cualquier obstáculo sólido relativamente opaco al sonido que bloquea al receptor la línea de visión de la fuente sonora. El uso de una barrera es sobre todo adecuado cuando no es posible, o sería demasiado caro, reducir la emisión de ruido de la fuente molesta.

Por lo general la medida de eficacia acústica es la pérdida por inserción, diferencia entre los niveles de presión sonora de la banda (medidos en un punto) antes y después de la construcción de la barrera.

$$IL_{\text{barrera}} = L_p(\text{antes}) - L_p(\text{después}) \text{ [dB]}$$

Esta medida depende de distintos parámetros, sobre todo la frecuencia del sonido, siendo las frecuencias altas las más atenuadas.

Siempre se considerarán las siguientes indicaciones para el cálculo de pérdida acústica para cualquier tipo de barrera:

- La barrera es muy larga en comparación con su altura.
- El sonido emana de una fuente puntual.

Barrera delgada

Se le llama barrera delgada a aquella que atenúa el sonido mediante una difracción única.

Cálculo del número de Fresnel:

$$N = (2/\lambda) [d1 + d2 - d]$$

Dónde:

λ = longitud de onda del sonido.

d1 = distancia entre la fuente y el borde de la barrera.

d2 = distancia entre el receptor y el borde de la barrera.

d = distancia entre la fuente y el receptor.

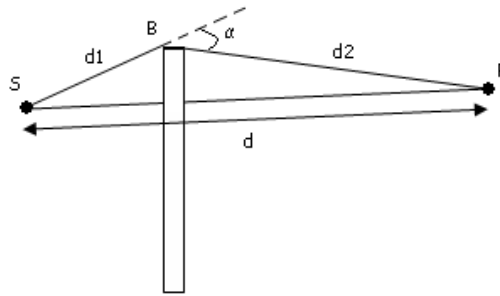


Figura n° 41: Distancias fundamentales del método para calcular la pérdida por inserción de una barrera delgada.

Cálculo de la pérdida por inserción:

$$IL_{barrera} = 10 \cdot \log[3 + 10 \cdot N \cdot K] - A_{suelo} \quad [dB]$$

El término de A_{suelo} es la atenuación aportada por el suelo antes de que se inserte la barrera, y el primer término es la atenuación que aporta la barrera más el efecto suelo y atmosférico después de la instalación, siendo K el factor de corrección para los efectos atmosféricos.

Los valores negativos de la pérdida por inserción se igualan a cero.

El valor máximo que se puede alcanzar teóricamente para una pantalla delgada es de 20 dB.

A continuación se presenta una tabla con el cálculo de la pérdida por inserción para cuatro bandas de octava en un terreno de suelo blando y a una distancia de 70 m entre la fuente y el receptor.

Tabla n° 50: Cálculo de las pérdidas por inserción para cuatro bandas de octava para barrera delgada.

Frecuencia [Hz]	N	Asuelo [dB]	Ibarrera [dB]
125	0,56	-4,8	14,1
250	1,12	-1	12,5
500	2,24	11,5	2,5
1000	4,48	4,8	12

Viento y temperatura

Cuando el gradiente de temperaturas tiende a la noche, se reduce la pérdida por inserción de la barrera, no así cuando el gradiente de temperaturas es el característico de los días soleados. Esta reducción varía con la distancia de propagación.

Si la distancia de propagación es menor a 100 m, la reducción suele ser insignificante, se calcula igualando el factor K a 1. Para distancias mayores a 300 m, la influencia de las condiciones meteorológicas se traduce en valores muy bajos de pérdida de inserción, y para distancias

intermedias, la reducción aumenta gradualmente al aumentar la distancia, el factor K en este caso se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = \exp[-0,0005 \sqrt{((d1 * d2 * d) / (N * \lambda))}]$$

La atenuación calculada para grandes distancias de propagación, sólo es aplicable a la media de las condiciones favorables de propagación. La convergencia atmosférica puede producir desviaciones de la media de hasta +/-20 dB. La convergencia que está producida por la refracción no uniforme en que un gran volumen de la atmósfera actúa como una lente acústica, puede durar más de una hora y por tanto afectar a las medidas individuales. Sin embargo, para un valor medio estas desviaciones se compensan unas con otras.

Barrera gruesa

Se define barrera gruesa a aquella que atenúa el sonido mediante difracción doble, tal como un edificio o un dique de tierra.

Si el grosor de la barrera es mayor que 3 m, se considera que la barrera es gruesa para los componentes de sonido de todas las frecuencias. Si es inferior a 3 m, la barrera se considera gruesa para aquellos componentes cuya frecuencia sea inferior a un quinto del grosor de la barrera. Si no se cumplen estas condiciones, la barrera debe considerarse delgada.

Para el caso de una barrera gruesa el número de Fresnel (N) se calcula de la siguiente manera:

$$N = (2/\lambda) * [d1 + t + d2 - d]$$

Dónde:

λ = longitud de onda del sonido.

d1 = distancia entre la fuente y el borde de la barrera.

d2 = distancia entre el receptor y el borde de la barrera.

d = distancia entre la fuente y el receptor.

t = grosor de la barrera.

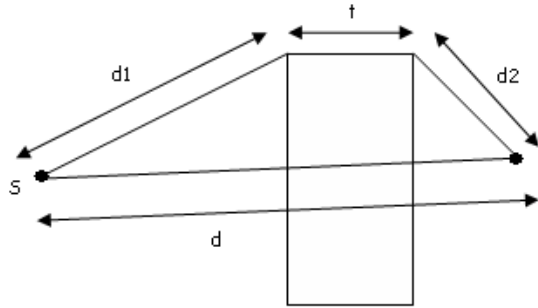


Figura n° 42: Distancias fundamentales del método para calcular la pérdida por inserción de una barrera gruesa

La pérdida por inserción de la barrera se calcula con la siguiente ecuación:

$$IL_{barrera} = 10 \cdot \log[3 + 30 \cdot N \cdot K] - A_{suelo} \quad [dB]$$

Donde K es el factor de corrección atmosférica mencionado anteriormente, pero a la menor de las distancias, d1 o d2, se le suma el grosor t.

Como se ha mencionado anteriormente, para valores negativos de la pérdida por inserción esta ecuación se iguala a cero.

En el caso especial de que la fuente y el receptor estén elevados, es decir, si la altura de la fuente por encima del suelo es mayor a d1 y la altura del receptor es superior a d2, la pérdida por inserción de la barrera puede calcularse utilizando la siguiente fórmula sencilla:

$$IL_{barrera} = 10 \cdot \log[20 \cdot N] \quad [dB]$$

Donde N se calcula de acuerdo al caso, si es barrera delgada o gruesa.

Barrera de longitud finita

Se consideran tres vías de propagación entre la fuente y el receptor:

- Sobre la parte alta de la barrera
- Alrededor del extremo derecho
- Alrededor del extremo izquierdo

El cálculo del encaminamiento sobre la barrera se lleva a cabo exactamente como si fuera una barrera infinita. Para el cálculo de los extremos, se deben calcular las distancias d1, d2, d y t, se calcula la pérdida por inserción de acuerdo al tipo de barrera que sea, delgada o gruesa, con el factor de atenuación del suelo A_{suelo} igual a cero y el factor de corrección atmosférico K establecido en 1.

La difracción lateral, suele reducir la eficacia de la barrera, alrededor de la barrera puede ignorarse si la altura efectiva de la misma en los bordes más alejados, es al menos 4 veces mayor que la del borde próximo.

Barreras con superficies absorbentes

La atenuación real de la barrera debido a la superficie absorbente aumenta a medida que lo hace el ángulo al que el sonido ha de difractarse. Los valores típicos son de 1 dB cuando el ángulo de difracción está entre 10° y 15°, y aproximadamente 3 dB cuando el ángulo es de 45°. La influencia de la superficie absorbente sobre la barrera es significativa si está cerca de la fuente de ruido.

Diques de tierra, colinas

El cálculo del número de Fresnel N es de igual forma que los procedimientos descritos anteriormente. En estos casos, la parte superior de la barrera en B se extiende por encima de la línea de visión SR en una cantidad que está indirectamente relacionada con la altura del dique o la profundidad del corte.

En algunos casos, una berma o colina cubierta de vegetación (suelo blando) aportan más atenuación a frecuencias altas que las predichas de acuerdo a la ecuación de pérdida por inserción de barreras gruesas.

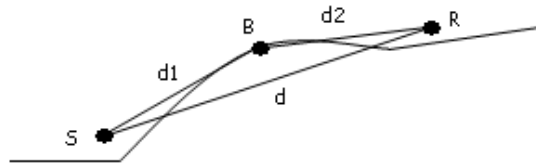


Figura n° 43: Ejemplo del uso del método de cálculo de la pérdida por inserción de barreras en el caso de un dique de tierra o colina

Cálculo de los niveles en presencia de barreras

Los niveles sonoros de una fuente puntual con un nivel de potencia sonora efectiva L_w en presencia de una barrera pueden calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$L_p \text{ (después)} = L_w - A_{\text{total}} \text{ (antes)} - IL_{\text{barrera}}$$

Donde: A_{total} (antes): Atenuación total antes de que la barrera se instale.

L_w : Nivel de potencia sonora efectiva.[8]

ANEXO III

Normativa de barreras acústicas - Ottawa, Canadá

El Apéndice C de la normativa de Ottawa, Canadá, especifica los requisitos para el diseño, materiales y construcción de barreras acústicas que complementa las directrices para el control de ruido ambiental.

Se espera el resultado de un sistema de barreras de mayor calidad, y menores costos tanto de capital como de mantenimiento.

El objetivo de este apéndice es establecer el diseño uniforme y directrices para la aprobación de la construcción e instalación de sistemas de alta calidad y durabilidad de barreras acústicas, con una esperanza de vida de al menos 20 años, que se traducirá en menores costos de capital y de mantenimiento para los residentes.[15]

Requerimientos para la altura y la ubicación de las barreras

Para la planificación de nuevos usos del suelo, la ciudad de Ottawa desalienta el uso de barreras acústicas, especialmente a lo largo de las carreteras de la ciudad por lo que sólo se utilizará como último recurso, cuando se demuestre a través de estudios que todas las otras medidas de mitigación no son factibles.

Si el uso de barreras acústicas se estima necesario, la siguiente información se debe tener en consideración:

- i. En el informe se debe incluir la ubicación de la fuente de ruido, la ubicación y la elevación del receptor, la elevación de la parte superior de la barrera acústica, las elevaciones de tierra de la berma, pistas de berma, aceras, avenidas, zanjas, caminos o elevaciones de tren y límites de tierra de la propiedad en cuestión. Las secciones transversales deben proporcionar toda la información (distancias y alturas) necesaria para calcular la reducción del nivel sonoro debido a las barreras.
- ii. La altura del receptor que debe utilizarse es 1,5 m por encima del suelo en un punto situado a 3,0 m desde la pared posterior y/o la más cercana con la identificación de condición de campo libre.
- iii. La altura mínima aceptable para barreras acústicas es 2,2 m para el caso de pendiente nula. En todos los otros casos, la barrera acústica para un nuevo proyecto no debe superar los 2,5 m de altura.

- iv. Para situaciones en las que la altura de la barrera supera a 2,2 m, la siguiente tabla proporciona directrices sobre los aumentos de ancho necesarios para dar cabida a la berma de base en relación con el aumento de altura de la barrera.

Tabla n° 51: Ancho adicionales necesarias para bermas

Sobrepasa los 2,2 m	Ancho adicional
0,5 m	3,5 m
1,0 m	6,5 m
1,5 m	9,5 m
2,0 m	12,5 m
2,5 m	15,5 m

Los detalles relativos a la berma se discuten en las cláusulas a seguir.

- v. Por el desarrollo residencial de casas, se requiere un mínimo de 6,0 m de profundidad de un patio trasero relativamente plano como medida de mitigación desde la cara posterior del edificio y que no contenga una pendiente superior al 4%.
- vi. Para carreteras se requiere una pendiente máxima de 3:1 para cualquier berma adyacente a la avenida. Pendientes superiores a 3:1 se tolerarán en el lado con mayor movimiento de tierra por el uso de muros de contención, siempre que no perturben al drenaje y al paisaje.
- vii. La propuesta de la ubicación de una barrera acústica junto a la carretera debe basarse en los siguientes principios:
- i. La barrera acústica debe ser localizada por el lado de la línea de la propiedad privada. Su ubicación debe ser por lo menos de 0,3 m desde el término de la calzada. La ubicación de la pared de barrera acústica debe tener en cuenta las necesidades de ampliación de calzada en el futuro.
 - ii. La berma de la barrera debe estar situada en el lado de la línea de la propiedad privada. El diseño de la berma podrían verse afectado por la ampliación de calzada en el futuro. El proponente y / o sus consultores deben preparar los datos necesarios relacionados con el diseño de la berma y abordar todos los asuntos de interés tales como la compactación, las elevaciones de grado, el drenaje, la seguridad, la cubierta y jardines, taludes, mantenimiento, etc.
 - iii. En todos los casos, la barrera acústica debe estar ubicado en un lugar aprobado en relación con la berma.
 - iv. En caso de que una barrera sea necesaria, los receptores deben estar ubicados dentro de su "zona de sombra" acústica.

- viii. En general, la altura máxima de barreras combinadas (es decir, berma y el muro) por sobre la carretera o el suelo orientado a campo libre debe ser 4,5 m. De lo contrario, el proponente debe investigar otras opciones de control del ruido. [15]

Diseño

Todos los componentes deberán estar diseñados para poder ser montado en terreno y ajustarse a los planos y especificaciones. Los paneles también deberán ser diseñados para facilitar su sustitución en el lugar.

La barrera acústica deberá estar diseñada para soportar todas las fuerzas posibles y las cargas encontradas durante la vida útil de ésta y deberá cumplir su función. El diseño deberá ser en un sitio específico con referencia a la presión del viento, la carga de sismo, la profundidad de la congelación y las condiciones del suelo.

La fundación de la pared de la barrera deberá ser diseñada para fundarse en suelo no perturbado, y en la profundidad de empotramiento requerido según los requisitos de diseño, pero no menos que la profundidad de la congelación de la zona.

Acústica

Para que un panel sea calificado como un material de barrera acústica, debe cumplir una o más de las siguientes condiciones:

- La densidad de la superficie del material del panel no será inferior a 20 kg / m².
- La clase de transmisión de sonido (STC) del material del panel debe ser de 20 dB o mayor.
- La clase de transmisión de sonido (STC) del material del panel ha sido históricamente demostrado que es 30 dB o mayor.

Además, se deben adoptar las medidas necesarias para prevenir los tambaleos de los paneles causados por el viento o por vibraciones de la tierra.

- Si el sistema de la barrera acústica se especifica para ser absorbente de ruido, los paneles de la barrera deben ser probados para determinar el coeficiente de reducción de ruido (NRC). Un grupo o un conjunto de paneles deben ser probados, según corresponda.

El uso de métodos alternativos para proporcionar la absorción de ruido necesaria puede incluir el uso de paneles de doble pared o el uso de diseños de paisajismo a lo largo de la barrera, creados por un arquitecto paisajista.

- La barrera acústica debe ser diseñada e instalada con el fin de acomodar el movimiento del panel durante los ciclos de clima sin poner la tensión indebida en cualquier estructura y en la instalación de ésta, ni reducir la atenuación acústica. Las juntas en las barreras acústicas son para que coincida el tamaño y la ubicación de las juntas de la estructura.

- Los elementos de la barrera acústica deben ser diseñados y orientados para reducir al mínimo la acumulación e infiltración de agua, suciedad y escombros en el interior.

Materiales

El material debe tener un mínimo previsto de vida útil de mantenimiento de 20 años.

Todos los materiales deben tener una clasificación de propagación de llama inferior o igual a 140 min y una clasificación de humo inferior o igual a 180 min.

- Los componentes metálicos y no metálicos de los sistemas de barrera contra el ruido, deben resistir la corrosión y el clima.

- Todos los componentes de acero deben estar recubiertos para ser resistentes a la corrosión. Los recubrimientos se refieren a todas las pinturas y laminados. Esto se utiliza para detener el desgaste por clima acelerado.

- Las barras de acero de refuerzo deben estar libres de óxido, escamas, u otras sustancias, que impida la vinculación.

Todas las barras de refuerzo deben ser revestidas con epóxico. El recubrimiento de hormigón sobre el acero de refuerzo debe ser superior a 50 mm.

Otros compuestos o los paneles de metal, tales como el aluminio, pueden ser utilizados como paneles de barreras acústicas, siempre que estos productos sean resistentes a la corrosión y cumplan con los criterios de desempeño acústico.

- Si el sistema de barreras acústicas se especifica como absorbente acústico, el promedio de coeficiente de reducción de ruido (NRC) no deberá ser inferior a 0,70 (70%).

- La barrera acústica de madera debe estar compuesta por tablas bien equipadas a fin de evitar deformaciones, divisiones y el aflojamiento de las partículas, nudos e imperfecciones. Todas las placas deben estar bien empalmadas y aseguradas.

Cuando hay contacto entre la madera y el suelo, la madera debe ser tratada a presión y los cortes extremos estar protegidos de la penetración de humedad.

Para pantallas acústicas de madera, se requieren los siguientes requisitos mínimos aceptables para calificar como un sistema de barrera acústico:

1. Todas las maderas serán seleccionadas por el buen aspecto y libre de defectos.
2. Todos los paneles exteriores, que están en contacto con el suelo, serán tratados a presión con un acabado de bordes protegidos contra la penetración de humedad, y serán enterrados de 100 a 150 mm por debajo del nivel del suelo terminado.
3. Todos los postes de madera (o postes de metal) deben tener una dimensión mínima de 140 x 140 mm, o más grande.
4. Doble factoría es requerida en todos los cambios de dirección superior a 20 °.
5. El uso de elementos decorativos como pilastras, curvas (ondulado) riel superior, tapas para postes, diseños de madera, etc. son preferible. En todos los casos, los elementos decorativos no debe afectar a los requisitos de altura mínima de barrera, la densidad, o cualquier otro requisito acústico/estructural.
6. Marcos de madera y/o de metal, se utilizarán para apoyar los paneles de madera en su lugar. Se diseñarán para permitir la expansión/contracción de los paneles de madera o elementos, y para hacer los ajustes en terreno necesario, cuando sea requerido.[15]

Instalación y construcción

- La base debe ser fundada en suelo inalterado, en el diseño con una longitud de empotramiento como requiere, pero como mínimo por debajo de la profundidad de congelación de la zona. La superficie de fundación será confirmada por un ingeniero geotécnico. Todas las partes blandas deben ser removidas y la parte inferior de la base protegido de la congelación. En el caso de encontrar roca sólida a una profundidad menor que la profundidad de la congelación, la fundación penetrará por lo menos 300 mm en la roca.

Todas las excavaciones en la roca se rellenan por completo con el hormigón. La excavación por encima de la roca puede ser formada por las dimensiones requeridas y el resto de la excavación rellena con material granular.

- Si se utiliza fundación de perforado, se debe realizar contra el suelo inalterado. El material de relleno se debe compactar al 98% Proctor estándar de densidad en seco del material granular.

Los cambios en la alineación se producen en los postes, con los medios adecuados, para evitar la degradación acústica.

- Cuando la instalación de una barrera acústica interfiere con el acceso a los grifos de agua existentes o propuestos, la instalación de barrera acústica debe incluir aberturas de acceso para la manguera y asociados signos de identificación. La ubicación y la demanda para estas aperturas deben establecerse en coordinación con el departamento local de bomberos.

- Si existe la posibilidad de una proximidad con las actuales líneas aéreas de alta tensión, cada panel de metal debe ser conectado a tierra.[14]

Otras consideraciones

El diseño de barreras acústicas también debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Las directrices aplicables de diseño urbano y requisitos de paisajismo.
2. Drenaje, nivelación, diseño de paisajismo y principios estéticos.
3. El diseño de la barrera debe ser complementario con las barreras cercanas existentes.

Los proyectos de barrera deben tener un paisaje suave, por lo que se incluyen árboles en éste.[14]

Resonancia (Efecto percusión)

Para evitar el exceso de resonancia en algunos materiales de la barrera, tales como paneles de metal, el sistema de barreras debe ser diseñado para reducir este fenómeno por medios aceptables, tales como el uso de refuerzos adicionales, la aplicación de compuestos insonoros, construcción sandwich, etc.[15]