



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**PROGRAMA: MAGISTER EN URBANISMO**

**DEPARTAMENTO DE URBANISMO**

**DIFUSIÓN ACÚSTICA EN ESPACIOS URBANOS CONSOLIDADOS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN URBANISMO**

**AUTOR: MARIO ALBERTO HUAQUÍN MORA**

**PROFESORA GUÍA: DRA. LUZ ALICIA CÁRDENAS JIRÓN, ARQUITECTO**

**SANTIAGO - CHILE**

**ENERO - 2017**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	5
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	4
<b>2. HIPÓTESIS</b> .....	10
<b>3. OBJETIVO GENERAL</b> .....	11
3.1. Objetivos Específicos .....	11
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	12
<b>5. MARCO TEÓRICO</b> .....	14
5.1. Desarrollo Teórico Conceptual .....	14
5.1.1. Acústica Teórica .....	15
5.1.1.1. Factores urbanos en relación a la posición del receptor .....	15
5.1.1.2. Factores en relación al tipo de vía de transmisión y/o trayectoria del sonido.....	17
5.1.1.3. Contribución de n fuentes secundarias (reflexiones) al nivel de presión sonora, en la posición del receptor.....	21
5.1.1.4. Efectos de la forma del obstáculo sobre el nivel de ruido.....	25
5.1.1.5. Vías de circulación rápida .....	29
5.1.1.6. Difusión acústica en un espacio urbano .....	32
5.1.1.7. Criterios acústicos que definen importancia de los factores urbanos .....	37
5.2.1. Factores Urbanos .....	44
5.2.2. Política Nacional de Desarrollo Urbano, PNDU.....	48
5.2.3. Ordenamiento Territorial.....	53
5.2.5. La influencia del espacio construido sobre el campo sonoro .....	58
5.2.6. La influencia de la imagen urbana sobre el campo sonoro .....	59
5.2.7. Modelos de cálculo y predicción de niveles de ruido, producidos por el tráfico vehicular urbano. ....	60
5.2.8. Estudios de planificación urbana orientados al uso adecuado del suelo como una forma de descontaminar o reducir niveles de ruido: .....	63

5.2.9. Influencia de factores económicos en la correcta distribución del suelo:	65
5.2.10. Técnicas de control de ruido tradicionales y otros estudios:	66
<b>6. CASOS ESTUDIOS</b>	<b>68</b>
6.1 Caso estudio 1, AÑO 1996	69
6.1.1. Procedimiento para la realización de mediciones	69
6.1.2. Descriptores de ruido:	70
6.1.3. Descripción de la fuente de ruido	70
6.1.4. Descripción del lugar de medición	71
6.1.5. Equipamiento empleado.	72
La figura 26, muestra el diagrama en bloque del equipamiento utilizado en las mediciones.	72
6.1.6. Resultados de las mediciones:	74
6.1.7. Análisis de tiempo de reverberación.	74
6.2. Caso estudio 2, AÑO 2016	76
6.2.1. Equipamiento empleado.	76
La figura 29, muestra el diagrama en bloque del equipamiento empleado en las mediciones.	76
6.2.2. Resultados de Mediciones de nivel tablas y gráficos:	81
6.2.3. Tiempo de reverberación, calle Teatinos 635.	82
6.2.4 Comparación energética y T60	83
6.3. Acústica virtual.	83
<b>7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>88</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>90</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>92</b>

A mis padres; a mis hijos Dania Vaitoiri y José Ignacio,  
por las “reflexiones” que me dieron.

## RESUMEN

El ruido (como agente contaminante del espacio público generado por el tráfico vehicular, por la actividad diurna y nocturna, por el crecimiento de la ciudad y del espacio construido, por la densidad de población) aumenta su intensidad sonora en calles y avenidas por la presencia de edificios en ambos lados, dependiendo de su forma, emplazamiento, materialidad, altura o distancia entre fachadas. Al reflejarse el sonido en suelo, fachadas o mobiliario urbano, este regresa como una reflexión sonora llamada también “fuente secundaria”. Estas infinitas reflexiones y la difusión acústica, que se suman al sonido directo, producen “ruido residual”.

Si a este fenómeno le incorporamos el tiempo, cuando el paso de vehículos es continuo, se le denomina “fuente lineal” y está en constante generación. En estado estacionario persiste de 2 a 3 segundos (o más), reflejándose sucesivamente en los diferentes objetos y fachadas. Su descomposición en tres aspectos, es decir, fuente original, ruido residual (suma de las reflexiones sucesivas) y la persistencia del sonido en el tiempo, es el “ruido ambiental” asociado al diseño de una ciudad.

Se plantea que las calles encajonadas generan más ruido que las que no tienen esta condición. El objetivo de este trabajo es estudiar la difusión acústica en espacios urbanos consolidados y los factores que vinculan al urbanismo con el fenómeno sonoro a través de la forma urbana, configuraciones de volúmenes, emplazamiento de edificaciones, distanciamiento de veredas, calles, avenidas, materialidad de suelo, fachadas, parámetros que forman parte de los IPT, planificación del sitio, uso de suelo y líneas de edificación, llevados al diseño y propuestas de planificación urbana.

La renovación urbana es ideal para avanzar en ello. La obsolescencia natural de la ciudad permite regular, desde una política pública asociada al urbanismo, un complemento en diseño urbano considerando los factores ambientales en su implementación, tales como los acústicos relevantes. Disminuir la molestia solamente en 2 o 3 decibeles es muy significativo en la percepción de los usuarios de estos espacios.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde que los carros romanos comenzaron a desplazarse por el empedrado de la *Via Appia*, el ruido urbano ha formado parte de un entorno acústico que no ha pasado inadvertido a través de la historia. El espacio público y privado construido, ha dependido en gran medida de la geografía de la ciudad y de la morfología urbana. El desarrollo, la industrialización y la urbanización han alterado la atmósfera como componente natural del entorno urbano, incidiendo en el deterioro y en la contaminación del medio ambiente (Matas, 1979).

En la actualidad, el ruido en los núcleos urbanos juega un rol determinante en la calidad de vida de sus habitantes. La urbanización genera una mayor concentración de actividades y un aumento en la densidad de la población, además de procesos productivos en diferentes puntos de la ciudad. Esto trae como consecuencia un aumento del número de viajes por habitante y, por consiguiente, de las fuentes emisoras, transformando ciertas áreas en focos de contaminación que extienden su influencia a las zonas aledañas, calles y avenidas, repercutiendo en la salud de sus habitantes.

En los países industrializados y del Tercer Mundo, las personas viven y trabajan en ambientes que contienen agentes físicos indeseables y potencialmente nocivos: uno de ellos es el ruido. La principal causa de la contaminación acústica es la actividad humana asociada al transporte, a la construcción de edificios y obras públicas y a la industria, entre otras. Los efectos producidos por el ruido pueden ser tanto fisiológicos (pérdida de audición) como psicológicos (irritabilidad exagerada). Un informe de la Organización Mundial de la Salud, apunta a la contaminación acústica como la segunda mayor amenaza ambiental después de la polución. El 70% del ruido ambiental de una ciudad es generado por el tránsito vehicular. Dicho informe señala que este tipo de contaminación sería la causa de 50.000 infartos cada

año en Europa (Zsuzsanna Jakab, 2011). Este se atribuye a niveles de ruido superiores a los 55 decibeles.

A medida que las ciudades se expanden, se produce un aumento de los viajes o recorridos de un punto a otro dentro del casco urbano. Particularmente en metrópolis a gran escala como Santiago de Chile, en que sus 7,3 millones de habitantes son el 40,1% de la población del país, con un aumento explosivo del parque automotriz asociado a un modelo socioeconómico altamente segregado por la localización de las fuentes laborales y las viviendas. (INE, 2015). Generando viajes desde y hacia la periferia en forma altamente polarizada (hacia el oriente un sector acomodado y hacia el poniente un sector medio-bajo), trayendo como consecuencia, aumento del ruido urbano.

Desde 2001 a 2015, en Santiago el número de vehículos motorizados aumentó en un 120%, y esta cantidad de automóviles crece en una proporción que va entre el 5% al 8% anual (Secretaría de Planificación de Transporte, SECTRA, 2015). El aumento del poder adquisitivo y la oferta de automóviles de bajo costo han permitido que empleados, pequeños empresarios, obreros y emprendedores utilicen en mayor cantidad autos, furgones, camiones y motocicletas, sumado a esto el transporte público de superficie. Se estima que: *al año 2020 tendremos siete millones de vehículos en el país, con un crecimiento del 64% respecto a 2013. Según el Informe Anual de Medio Ambiente, éste asciende a los 4.168.980 vehículos (INE, 2013).*

La ciudad, de acuerdo con sus dimensiones, características físicas y el espacio construido en ella, es un elemento modulador del espacio sonoro. La forma y arquitectura de un espacio se traduce en la arquitectura de los sonidos de ese lugar (Trieb, 1972). En este sentido, la planificación y el diseño urbano son parte de la planificación ambiental urbana. Esta íntima relación demuestra la

influencia que ejercen la forma, las dimensiones del espacio urbano construido y sus componentes frente al ruido.

La ciudad se caracteriza porque las múltiples funciones que la vitalizan son bulliciosas. Esta gran actividad es uno de los elementos que la hacen atractiva; pero cuando ese murmullo que invade todos los sectores de nuestra vida cotidiana se transforma en "ruido urbano", éste puede llegar a ser insoportable, a atentar contra el derecho fundamental del individuo al reposo y al derecho de vivir en un ambiente libre de contaminación (Constitución Política de Chile, 1980).

La ciudad está compuesta por una morfología natural, ocupada y transformada por aquella hecha por el hombre en una interrelación compleja. Las características de propagación del ruido también son complejas. Varían de un lugar a otro, dependiendo principalmente de la localización de las fuentes de ruido y de la configuración de los volúmenes de los espacios públicos (edificios, veredas, calles, áreas verdes y espacios abiertos en general). En las áreas urbanas consolidadas existen superficies de contacto a los frentes de ondas de ruido<sup>1</sup>, la mayoría de las cuales son reflectantes. En este caso, los receptores (carpetas de rodado, fachadas de edificios, automóviles y mobiliario urbano) son obstáculos para los rayos sonoros, transformándose a su vez en fuentes secundarias generadoras de ruido (Can, 2015).

El ruido ambiental refleja una relación del hombre con el medio ambiente acústico, a través del espacio complejo, diferenciado y urbano. La planificación y el diseño urbano deben materializar las exigencias biológicas, culturales y espirituales de la sociedad y de cada individuo, procurando valorar dichas exigencias junto con aquellas más propias de factores económicos, legales, sociales y políticos (Stryjenski, 1983).

---

<sup>1</sup> Frente de onda: Para una onda progresiva en el espacio, es un área de radiación sonora equipotencial.

La planificación urbana y la acústica deben interactuar, procurando lograr, a través de diversas técnicas de control del ruido, armonizar el diseño urbano y la arquitectura empleada en ello, participando en la imagen de la ciudad a través de sonidos mimetizados en el espacio (Stryjenski, 1967).

El distanciamiento entre fachadas (incluyendo veredas y calles) actúa aumentando o disminuyendo la relación entre fuente-receptor, generando mayor o menor ruido residual. Así, también, influye en el tiempo que permanece presente el ruido en el espacio urbano. El estudio de la difusión acústica, el efecto de dispersión sonora, la divergencia geométrica que producen fachadas, calles y objetos, puede ayudar a reducir efectivamente el ruido ambiental (incluyendo en esto una adecuada forestación y su comprobado efecto de absorción sonora). Lo que se busca es dimensionar con certeza el grado de atenuación de ruido y los efectos favorables de un mejor confort acústico en el espacio público construido.

## **2. HIPÓTESIS**

Se postula que un incremento en el nivel de presión es generado por una fuente sonora al encontrarse esta en un espacio urbano construido con edificaciones en altura, encajonadas y en forma de “U”, con respecto a la misma fuente situada en campo libre.

La propagación espacial y temporal del ruido generado por el tráfico vehicular, la difusión acústica y ruido residual, deterioran la calidad de vida de las personas en las veredas de calles y barrios. El control de las reflexiones nos plantea la posibilidad de atenuar una parte de ellas y, con esto, de la contaminación acústica, y así generar una sensación de atenuación del ruido, además de mejorar el confort acústico urbano.

La influencia de la forma urbana en el incremento del ruido en las calles tipo cañón (producto del espacio construido y la arquitectura empleada en ello) genera un impacto acústico<sup>2</sup> adicional en peatones y usuarios, por las reflexiones sonoras que se producen en suelo, fachadas y superficies de contacto. Las reflexiones se suman al sonido directo generado por el tráfico vehicular, deteriorando así los distintos espacios urbanos públicos. Experimentos de laboratorio han determinado que la percepción humana es multisensorial, y que entre más urbanizado sea el ambiente, es menos placentero (Ramírez, 2011). Por lo tanto, es posible generar espacios con menor impacto y mejor confort acústico a lo largo de veredas calles y avenidas.

### **3. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar y definir los factores urbanos y acústicos que intervienen en el aumento o atenuación del ruido del tráfico vehicular en calles y veredas de la ciudad.

#### **3.1. Objetivos Específicos**

Estudiar la morfología y organización de los espacios públicos, del volumen espacial utilizado por edificaciones en altura, veredas, calles y avenidas, en relación con la difusión acústica del sonido, su propagación e impacto.

Incorporar criterios acústicos al proceso de urbanización, a través del estudio de los factores urbanos asociados a la absorción y difusión acústica del ruido en objetos, fachadas, calles y avenidas.

Fundamentar la necesidad de considerar al ruido en su real dimensión en las políticas globales de descontaminación del medio ambiente.

---

<sup>2</sup> Impacto acústico: Repercusión positiva o negativa que genera un sonido en una persona o sistema en general. Existen mecanismos que permiten evaluar la magnitud del mismo.

#### 4. METODOLOGÍA

En las áreas urbanas construidas, las fuentes de ruido se encuentran en un campo acústico<sup>3</sup> tal, que la onda sonora que se propaga incide en múltiples obstáculos y el ruido que finalmente perciben los receptores aumenta, por la energía reflejada en los obstáculos. Es aquí donde se produce una íntima relación entre factores urbanos y parámetros acústicos, donde el medio de propagación forma parte de todo lo que compone una ciudad (específicamente en un área consolidada, donde hay fuentes de ruido, calles, edificaciones, mobiliario urbano, automóviles como objetos y los receptores). La forma urbana es un factor relevante en términos de la proporción espacio libre-ocupado, de manera tal que existe un campo sonoro de mayor o menor intensidad y/o duración. Según K. Lynch, "planificar el sitio es el arte de ordenar edificios y otras estructuras sobre el terreno, armonizando unas con otras" (Lynch, 1980). Esto se traduciría también en la armonía de los sonidos de esos espacios.

El incremento del nivel de ruido producto de las reflexiones en las edificaciones en altura, y los efectos de difusión acústica<sup>4</sup>, han sido estudiados por medio de descriptores de ruido y por métodos de predicción desarrollados como herramientas entre una cantidad de estrategias posibles de desarrollo programado, identificando los puntos críticos de recepción y el nivel de ruido e impacto acústico que generan (Onaga, 2006). Se desarrolla un procedimiento de carácter experimental, basado en la toma de muestras de niveles de presión sonora<sup>5</sup>, y mediciones de reverberación, (generado por una fuente impulso), en varios entornos urbanos, con distintos tipos de calles (U y L), fachadas lisas y con textura.

---

<sup>3</sup> Campo acústico: Distribución de la presión sonora en el espacio, cercano o lejano y en el tiempo.

<sup>4</sup> Difusión acústica: Fenómeno que ocurre en el espacio, en que la intensidad sonora es igualmente probable en cualquier dirección de la onda sonora.

<sup>5</sup> Nivel de presión sonora (Lp): Expresión logarítmica de la presión sonora, referida a un valor de presión de referencia:  $NPS = 20 \log_{10} (P/P_{ref})$ , donde P es el valor eficaz de la presión sonora y  $P_{ref} = 20 \mu Pa$ . Se expresa en decibeles (dB). Para medidas en el aire.

Para estimar el ruido generado por una fuente sonora, y el impacto acústico percibido por las personas, siempre se busca considerar tres elementos que participan en la configuración de los campos sonoros: 1.- “La fuente sonora”, como principal elemento generador de ruido; 2.- “Las vías de transmisión” que contribuyen a propagar la energía sonora, pudiendo atenuarla en gran medida, como también aportar significativamente a su prolongación a través de la intensidad original, las múltiples reflexiones y el fenómeno de la reverberación<sup>6</sup> y, 3.- “Los receptores”, quienes son los únicos capaces de distinguirla y que, finalmente, perciben sus efectos nocivos. De ahí la importancia de establecer relaciones de medida a nivel de receptor y considerar no solo el nivel producido por la fuente sonora, sino también la contribución fundamental de las vías de transmisión y los fenómenos implícitos que conllevan.

La primera parte del trabajo se aboca a individualizar el concepto de difusión acústica dentro del ámbito urbano. Se desarrolla, un modelo matemático que consiste en describir el fenómeno del ruido en una calle tipo “U”, en términos de la divergencia geométrica que ofrece a un frente de onda sonoro (Malchaire, 1974). Se ejecuta también una etapa descriptiva, (casos estudios), que incorpora un conjunto de mediciones realizadas en 1996 y 2016, que permiten corroborar la magnitud de los fenómenos sonoros asociados con las reflexiones en el área urbana definida. Se replican los datos geométricos y energéticos, y se realiza una modelación virtual para relacionar los resultados y establecer la importancia de su contribución a los niveles de ruido que generan las superficies de contacto más o menos cercanas en los usuarios del espacio construido, en veredas y calles.

---

<sup>6</sup> Reverberación: Es la persistencia del sonido en un espacio después de que la fuente original ha cesado.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Desarrollo Teórico Conceptual

No existe un único modelo matemático que describa niveles de presión sonora resultantes, por depender estos de un sinnúmero de factores, algunos de los cuales no pueden predecirse ya que no solo dependen de parámetros físicos, sino también de decisiones adoptadas en una situación determinada. Por ejemplo: un receptor puede estar ubicado cerca de una fuente sonora, pero puede decidir alejarse de ella, con la consiguiente reducción de la influencia de la fuente sobre él.

El primer paso es establecer relaciones matemáticas que incorporen como variables a los factores urbanos más relevantes, permitiendo deducir el rol que juegan estos sobre los parámetros acústicos. Desde este punto de vista, aquellos parámetros que puedan fluctuar (tales como presión atmosférica, temperatura ambiente o velocidad del viento) en esta investigación son considerados “despreciables”.

Para aquellos análisis de contribución de nivel producido por reflexiones, se supondrá reflexión regular, asumiendo que la irregularidad del obstáculo es de menor extensión que la longitud de onda<sup>7</sup> considerada. Esto no ocurre, en general, cuando el tamaño de la irregularidad es significativo, o si la forma del obstáculo es tal que produce reflexiones de tipo difuso en ciertas frecuencias.

---

<sup>7</sup> Longitud de Onda ( $\lambda$ ): Distancia en la dirección de propagación de una onda sinusoidal entre dos puntos sucesivos, en donde en un instante dado su fase difiere en  $2\pi$ . Es igual a la relación de fase de la velocidad del sonido en el medio a la frecuencia fundamental. (Crocker, 2007).

## 5.1.1. Acústica Teórica

### 5.1.1.1. Factores urbanos en relación a la posición del receptor

Si representamos (mediante una figura de planta y otra en corte) la posición de la fuente sonora (S), el receptor (R) y la fachada de un edificio como el obstáculo (O) o barrera (21), y se refleja el sonido directo incidente que proviene desde el centro de la calle, podremos observar lo siguiente:

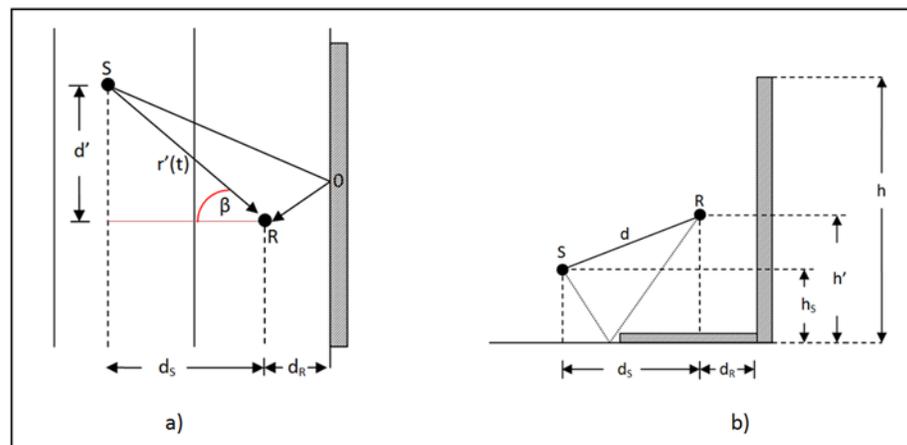


Figura 1. a) Planta calle-edificio; b) Corte calle-edificio. (Elaboración propia)

Se puede demostrar que la “distancia recorrida” por una señal en movimiento a velocidad constante  $v$  es:

$$d' = vt \quad (1)$$

y

$$d^2 = (h' - h_s)^2 + (d_s - d_R)^2 \quad (2)$$

Si combinamos ambas figuras se obtiene:

$$r'(t) = \sqrt{(vt)^2 + d^2} \quad (3)$$

Donde:  $r'(t)$  es la función distancia fuente-receptor.

Esta expresión nos permite determinar la influencia que ejerce la ubicación de la fuente en relación al receptor, respecto del nivel de presión sonora incidente ( $L_p$ ), sobre este último. Considerando el descriptor  $L_{eq}(A)$ , se puede llegar a determinar que, sin considerar reflexiones (Kuttruff, 1991):

$$Leq_{RS} = L_p(\text{generado por fuente}) + \text{Atenuación por distancia dB(A)}$$

$$Leq_{RS} = 10 \log \left[ \frac{P_{RS}^2}{P_0^2} \right] + \left( -20 \log \frac{r'(t)}{d_0} \right) \text{ dB(A)} \quad (4)$$

Donde:  $P_{RS}$ : Valor eficaz de la presión media

$P_0$ : Valor eficaz de la presión sonora de referencia, en  $2 \times 10^{-5}$  [N/m<sup>2</sup>]

De acuerdo con esto, la distancia fuente-receptor es un factor relevante sobre el nivel de presión sonora resultante que este percibe. Al alejarse la fuente sonora minimiza su influencia, pero esta es dependiente de la velocidad de flujo, en el sentido de que al aumentar la velocidad, se incrementa el nivel generado por la fuente y las fluctuaciones de nivel de presión sonora ocurren más rápidamente. Cabe hacer notar que un cambio brusco de nivel (en un intervalo de tiempo breve) produce más daño que un ruido permanente de poca fluctuación. Es decir:

$$\tan \beta = \frac{vt}{(d_s - d_R)} \quad (5)$$

Por lo que, a medida que la velocidad de flujo del vehículo aumenta, la posición que ocupa la fuente se acerca más rápidamente a la posición frontal al receptor (condición similar a que la fuente se encuentre en reposo frente al

receptor), produciendo un incremento más rápido del nivel de presión en la posición del receptor.

### 5.1.1.2. Factores en relación al tipo de vía de transmisión y/o trayectoria del sonido

La problemática de la propagación sonora en una calle tipo U, involucra distintos elementos que pueden clasificarse en: a.- fuentes de ruido (tales como vehículos y fuentes elevadas, sistemas de climatización, helicópteros, aviones) y b.- los obstáculos, que representan las fuentes secundarias (así como carpeta de rodado, veredas, soleras, edificios, mobiliario urbano y los mismos usuarios).

En relación con la calle, puede considerarse que hay una trayectoria directa desde la fuente sonora al receptor, pero además si existen veredas, calles, hileras de edificios en altura a ambos lados de la calle, habrá múltiples trayectorias que involucren reflexiones desde el suelo (mobiliario, fachadas, vehículos, etcétera (Figura 2).



Figura 2. Ruido ambiental = **Sonido directo** + **Reflexiones**. (Huaquín, 2016)

Las reflexiones contribuyen en gran medida al aumento de nivel de presión sonora resultante sobre el receptor, a diferencia de un área abierta sin edificaciones (con mucho menos reflexiones). Si la calle es amplia, el incremento será mínimo (como también lo será si el espaciamiento entre edificios es grande). Además, si las fachadas de los edificios no son perfectamente lisas, es decir, fachada con texturas, retranqueos, también habrá dispersión, resultando en atenuación de las ondas reflejadas regularmente y difusión del campo sonoro (Lyon, 1974). Se entiende por difusión a la “distribución y/o dispersión de la energía sonora”, es decir, no existe una dirección privilegiada de radiación sonora cuando un sonido se encuentra en un espacio construido.

Este efecto lo producen los obstáculos y límites de recintos o espacios que modifican las características propias del sonido radiado por una fuente sonora, imponiéndole múltiples vías de propagación, minimizando los efectos de interferencia, estableciendo un campo sonoro donde a veces no es posible identificar la ubicación de la fuente o la procedencia del rayo sonoro. Desde este punto de vista, si existe difusión en un espacio urbano, la densidad de energía será prácticamente constante, conforme aumenta la distancia a la superficie donde se refleja la onda sonora. Por lo tanto, se reduciría la contribución de nivel por concepto de reflexiones regulares, pero se formaría un campo sonoro cuya atenuación sería levemente menor, acrecentando el campo reverberante.

Los factores de interés en la propagación sonora son: la geometría de los obstáculos, las reflexiones, dispersión, absorción superficial y el tiempo (Lyon, 1974). Es decir, el nivel de presión sonora equivalente  $Leq_{RSO}$ , en la posición del receptor, (debido tanto a la energía proveniente de la fuente, así como la energía que viene del obstáculo), difiere en nivel debido a la fuente en  $\Delta$ , que representa el incremento de nivel producido por reflexiones que llegan a ese punto.

Expresado en niveles:  $Leq_{RSO} = Leq_{RS} + \Delta$  dB(A) (6)

Si se asume que las fachadas de los edificios poseen un coeficiente de absorción  $\alpha$  dado por:  $\alpha = 1 - \gamma$ , donde  $\gamma =$  coeficiente de reflexión.

De acuerdo con la Figura 3, se tendría que si  $\alpha = 0$ , o tiende a cero, las superficies son completamente reflectantes, -por ejemplo hormigón, cristal, acero (aproximadamente  $\alpha = 0,01 - 0,02$ ), lo que contribuye al nivel de presión con un decaimiento menor en función de la distancia (3 dB por cada vez que se duplica la distancia a la fuente), porque las fuentes sonoras imágenes y/o fuentes secundarias forman una fuente línea que tiene su tasa de divergencia geométrica más baja. Es decir, las reflexiones son regulares, lo que significa que estas fuentes imagen contribuyen enormemente al incremento de nivel de presión sonora total  $L_p$  sobre el receptor, duplicando la energía si se compara con la situación de campo libre, que decae 6 dB por cada duplicación de distancia a la fuente (Kuttruff, 1991).

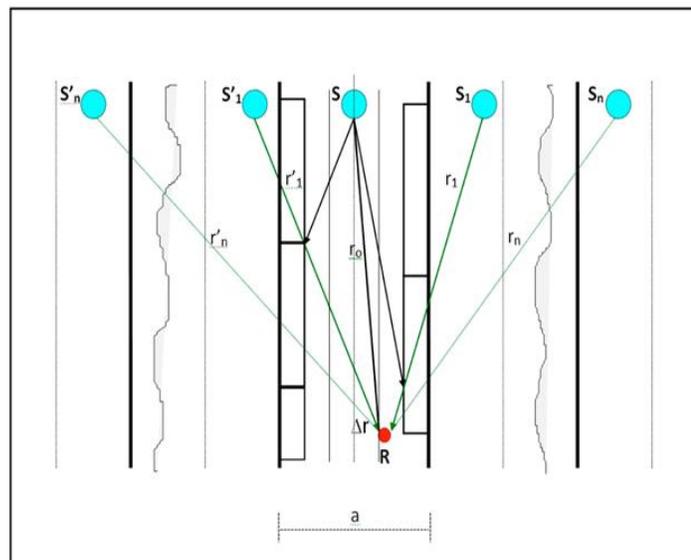


Figura 3. Fuentes imágenes y trayectorias de contribución sonora. (Lyon, 1974).

S Fuente Sonora;  $S_1$  y  $S'_1$  fuentes imágenes que producen primeras reflexiones;  $S_n$  y  $S'_n$  fuentes imágenes que producen enésimas reflexiones.

Si analizamos la energía sonora producida por una fuente secundaria o virtual (reflexión sonora), se puede obtener que:

$$I_t = I_0 + I_r \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (7)$$

Donde:  $I_t$  es la intensidad sonora total,  $I_0$  es la intensidad sonora producida por sonido directo e  $I_r$  la intensidad sonora producida por la reflexión.

Luego,

$$I_t = \frac{W Q \left[ \frac{1}{r_0^2} + \frac{(1-\alpha)}{r'_s{}^2} \right]}{4\pi} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (8)$$

Donde:  $W$  = Potencia acústica desarrollada por la fuente.

$Q$  = Factor de directividad de la fuente.

Finalmente:

$$L_{pr} = 10 \log \left( \frac{W Q \rho_0 c}{4\pi \rho_0^2} \right) \left[ \frac{1}{r_0^2} + \frac{(1-\gamma)}{r'_s{}^2} \right] (dB) \quad (9)$$

Tenemos entonces el nivel de presión sonora total de una fuente en el receptor.

**5.1.1.3. Contribución de  $n$  fuentes secundarias (reflexiones) al nivel de presión sonora, en la posición del receptor.**

Se puede asumir la existencia de  $n$  fuentes virtuales que representarán fuentes generadoras de ondas sonoras reflejadas sobre los planos paralelos (obstáculos, Figura 3). Si  $a$  es la separación entre planos (entre fachadas), la distancia al receptor  $r$  desde la  $n$ -ésima fuente imagen será:

$$r_n = \sqrt{(vt)^2 + (na)^2} \text{ (m)} \quad (10)$$

Donde:  $vt$  = la distancia desde la fuente al receptor en el tiempo  $t$ .

Si ambos planos poseen igual coeficiente de absorción (o reflexión), independiente del ángulo de incidencia de la onda sonora, la intensidad sonora total reflejada en la posición del receptor será:

$$I_r = I_0 + \sum_{i=1}^{n=i} I_{ri} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (11)$$

Donde:

$$I_0 = \frac{WQ}{4\pi r_0^2} \quad (12)$$

Considerando que  $r_0$  es la distancia recorrida por el sonido directo y  $r_i$  la distancia que recorre  $i$ -ésima reflexión para el caso en que  $i = 1$ , se obtiene la primera reflexión.

$$I_{ri} = \frac{WQ(1 - \alpha)}{4\pi r_i^2} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (13)$$

Si  $d_s \ll a$

$$r_s = r_i \sqrt{(vt)^2 + a^2} \quad (14)$$

Esto implica que:

$$I_t = I_0 + \sum_{i=1}^{n=i} \frac{WQ(1-\alpha)}{4\pi(r_i)^2} \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (15)$$

y

$$I_t = \frac{WQ}{4\pi} \left[ \frac{1}{r_0^2} + \sum_{i=1}^{n=i} \frac{(1-\alpha)}{\sqrt{(vt)^2 + (ia)^2}} \right] \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (16)$$

Por lo tanto, el incremento de nivel de presión sonora causado por la contribución de  $n$  fuentes sonoras en la posición del receptor, donde  $L_{pt}$  es el nivel de presión sonora total causado por sonido directo y reflexiones superpuestas y  $L_{pdir}$  representa el nivel de presión causado por sonido directo en la posición del receptor. Por lo tanto:

$$\Delta L_p = L_{pt} - L_{pdir} \quad (dB) \quad (17)$$

Donde:

$$\Delta L_p = 10 \log \left[ 1 + r_0^2 \sum_{i=1}^{n=i} \frac{(1-\alpha)}{(vt)^2 + (ia)^2} \right] \quad (dB) \quad (18)$$

Por lo que el incremento de nivel de presión sonora  $\Delta L_p$  debido a  $n$  fuentes, depende esencialmente de las características de absorción/reflexión del obstáculo y de la distancia de la fuente al receptor.

Para el caso en que  $i = 1$  y reemplazando el coeficiente de reflexión  $(1 - \alpha) = \gamma$ :

$$\Delta L_p = 10 \log \left[ \frac{1 + \gamma(r_0)^2}{((vt)^2 + a^2)} \right] \quad (dB) \quad (19)$$

Si se reemplaza además  $r'_s = r_0 + \Delta r$  se obtiene:

$$\Delta L_p = 10 \log \left[ 1 + \frac{\gamma}{\frac{(r_0 + \Delta r)^2}{r_0^2}} \right] (dB) \quad (20)$$

$$\Delta L_p = 10 \log \left[ 1 + \frac{\gamma}{\left(1 + \frac{\Delta r}{r_0}\right)^2} \right] (dB) \quad (21)$$

Esto nos indica que la contribución más notable al incremento de nivel la producen las primeras reflexiones, que además son las encargadas de identificar la procedencia del frente de onda, y permiten definir la característica del campo sonoro desarrollado. Por otra parte, las reflexiones tardías pueden tornarse molestas si se prolongan considerablemente en el tiempo (gran reverberación), produciendo energía considerada nociva desde el punto de vista de la calidad de un ambiente acústico determinado.

Luego, si el coeficiente de reflexión es próximo a 1, o pared prácticamente 100% reflectante, se comprueba el incremento de nivel 3 dB (Möser, 2004). Este es el caso del sector céntrico de Santiago, muchas de cuyas veredas promedian los 2,0 – 5,0 metros de ancho (Figura 4).



**Figura 4. a) Calle Compañía (sector de tipo cañón), año 1996; b) Calle Merced, entre José Miguel de la Barra y Lastárria (1996); c) Calle Merced (2016). (Huaquín, 2016).**

Pero si  $\gamma$  (el coeficiente de reflexión) es próximo a 1, y suponiendo que exista una diferencia de recorrido  $\Delta r$  entre sonido directo y reflejado de 5 metros, equivalente al ancho de una acera normal, y la distancia recorrida por sonido directo  $r_o$  es, por ejemplo, 10 metros, el incremento de nivel sería menor de 3 dB (aproximadamente 2,5 dB).

Por lo que si la vereda es más angosta, el incremento de nivel de presión sonora  $L_p$  es mayor que en el caso de vereda ancha, ya que la fuente se encuentra más cerca del receptor, aumentando la energía incidente sobre el

obstáculo. La influencia del coeficiente de reflexión en el incremento de nivel es mayor cuando la vereda es más angosta. Esto indica que una vereda angosta favorece la existencia de un campo reverberante y de mayor potencia.

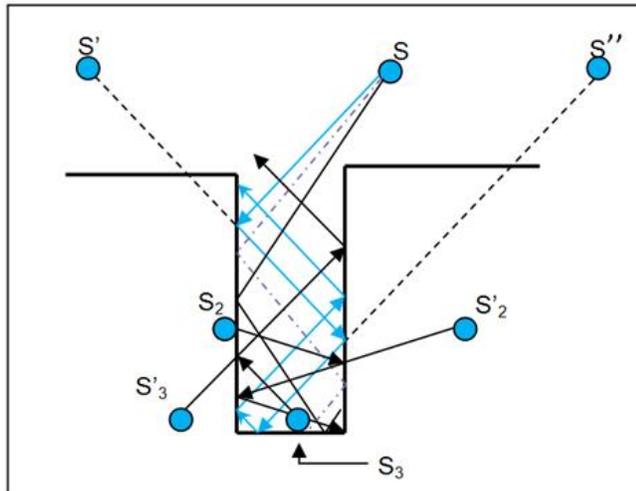
Para muros con coeficiente de absorción elevado o próximo a 1, tales como fachadas con doble piel, perforadas (ejemplo: Edificio GAM) o fachadas verdes, el campo sonoro reverberante será menor, o prácticamente nulo (considerando la frecuencia para la cual ocurre esta condición). Es decir, no se forma una fuente secundaria en relación con esa pared.

#### **5.1.1.4. Efectos de la forma del obstáculo sobre el nivel de ruido**

Cuando la reflexión es difusa, su intensidad es menor, o el aporte energético es menos significativo que cuando es regular. Sin embargo, aumenta el campo reverberante, dado que el decaimiento “espacial” del nivel de campo sonoro es menor, lo que se traduce en homogeneidad de la densidad de energía sonora y, por lo tanto, en un decaimiento temporal más lento.

En relación con la forma del obstáculo (fachadas de edificios), esta debería producir mayor dispersión, es decir, tornar las reflexiones difusas, de manera que se evite la concentración de energía en un punto o zona preferente. En un espacio semicerrado, la falta de difusión produce zonas donde el nivel es mayor o menor que el nivel promedio esperado. Esto se produce por:

- a) Espacios donde el volumen determinado por un Largo ( $L$ ), Ancho ( $W$ ) y altura ( $H$ ) tienen un ancho de calzada menor que la altura de los edificios y el largo de la calle. Por ejemplo una calle tipo cañón, encajonada (hileras de edificios de más de 20-25 metros de altura a ambos lados de una calzada angosta), lo que provoca una gran reverberación a causa de la abundante producción de reflexiones hacia el “interior” del espacio, (Figura 5).



**Figura 5. Fuentes nivel calle, en altura y sus reflexiones. (Fuente: Elaboración propia)**

Donde: S fuente en altura (avión),

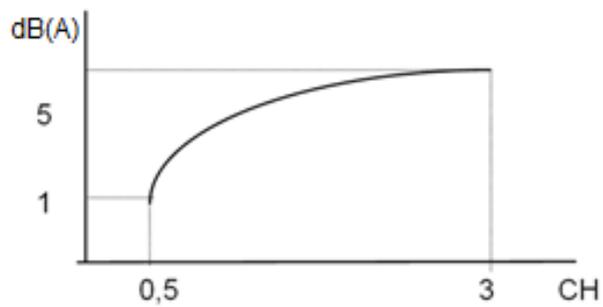
S<sub>2</sub> fuente en altura (equipo de aire acondicionado).

S<sub>3</sub> fuente nivel calle (vehículos), S', S'', S'<sub>2</sub>, S'<sub>3</sub> respectivas fuentes imágenes.

En términos de la relación altura edificio-ancho calzada, existe el denominado “Coeficiente de altura” (*CH*), dado por:

$$CH = \text{altura edificios}/\text{ancho calzada} \quad (22)$$

De acuerdo con el gráfico de la Figura 6, se puede apreciar que, a medida que aumenta la altura en relación al ancho, se produce un incremento del nivel equivalente *Leq*, que va desde 1 dB(A) a 5 dB(A). En términos prácticos, esto indica que para edificios de 10 a 12 pisos, su influencia debería considerarse para calzadas cuyo ancho sea mayor a 30 o 40 metros. Considerando la situación actual de algunas calles de Santiago Centro, y otras comunas, se sobrepasa absolutamente esta condición, dado que el ancho total de calzadas en general es del orden de 14 a 20 metros.



**Figura 6. Relación de niveles respecto al ancho y altura de los edificios.**

**b)** En una calle muy larga y ancha, aún con edificios en altura, existirá principalmente sonido directo, la relación H/W, tiende a cero. (Figura 7).



**Figura 7. Amplia vereda y calle, en Avda. Presidente Riasco. y calle Ismael Valdés Vegara. (Huaquín, 2016).**

Calles con vereda generosa, ofrecen mayor distancia entre fuente y obstáculo, proporcionando espacio para atenuación por distancia  $\Rightarrow$  confort acústico.



**Figura 8. Calle Teatinos 635, edificio con marquesina (1996).**

c) Fachadas o superficies tipo cóncavo (concentración de sonido en un punto o zona) se pueden formar por balcones o marquesinas que tienden a encajonar más aún el sonido en los espacios más cercanos al peatón. (Figura 8).

Otro fenómeno frecuente es la difracción (cambio en la dirección de propagación de las ondas sonoras a causa de la presencia de un obstáculo). La ocurrencia del fenómeno depende de la longitud de la onda que se propaga y de las dimensiones del obstáculo. Por ejemplo: ondas sonoras procedentes de una fuente y que correspondan a un sonido de baja frecuencia, se encuentran en su trayectoria con un obstáculo de dimensión más pequeña (que la longitud de onda de la frecuencia considerada) y lo rodean, transformando el borde del obstáculo en una segunda fuente sonora.

Esto implica que la propagación sonora en línea recta solo ocurre para sonidos de frecuencia alta. En cambio, los de baja frecuencia (que coinciden con el espectro sonoro del ruido urbano producido por flujo vehicular) se propagan reflejándose, difractándose, generando zonas de sombra<sup>8</sup> que la

---

<sup>8</sup> Zona de Sombra: Es generada por la difracción del sonido que bordea un obstáculo, dependiente de la longitud de onda del sonido incidente.

mayoría de las veces producen un incremento de nivel en una zona determinada.

Lograr una distribución sonora que reduzca el nivel de presión sonora total dependerá, de la forma, proporciones y distribución de los obstáculos en el espacio en que se establece el campo sonoro producido por la fuente, tanto como de las cualidades de absorción y distribución de los materiales empleados en su construcción.

Por otra parte, la reverberación causa fenómenos tales como reducción de la inteligibilidad y aumento del nivel de presión total, como consecuencia de la superposición en forma continua de la energía sonora reverberada con respecto a la energía sonora directa. También es un efecto que debería controlarse, ya que la prolongación innecesaria de ruidos perjudica la comunicación.

Los efectos nocivos que el incremento de campo reverberante produce en los seres humanos no son conocidos con total certeza. Pero una persona que ha vivido expuesta por un tiempo prolongado, (más de 10 años) en el centro de la ciudad de Santiago, adolecerá de una reducción del rango de audición (Costabal, 1984), provocándose una desviación del umbral permanente. Puede ocurrir si ha estado expuesto a ruidos excesivos de forma regular durante periodos prolongados, o también si se ha estado expuesto a niveles de sonido muy elevados durante períodos breves.

#### **5.1.1.5. Vías de circulación rápida**

Generalmente, el ruido que predomina cerca de una vereda es producto de una cantidad de vehículos que se distribuyen en una calle, (con distintas posiciones, velocidades y aceleraciones), y se debe a la superposición de los ruidos generados por estos. Si se observa desde una gran altura

comparada con su ancho, la vía se ve como una fuente línea uniforme, de potencia acústica por unidad de longitud.

$$W_a = W * n \text{ (Watts)} \quad (23)$$

Donde:  $W_a$  = Potencia acústica por unidad de longitud de la fuente línea.

$W$  = Potencia acústica media de un vehículo.

$n$  = Número de vehículos por unidad de longitud de la vía (vehículos/km).

Bajo estas condiciones, un elemento de la vía de longitud  $dx$ , producirá en un punto A cualquiera, ubicado a la distancia  $r$ , una presión acústica efectiva (atravesando solo una hemiesfera a causa del suelo) (figura 9).

$$p_{ef}^2 = \frac{W \rho_o c dx}{2\pi r^2} \text{ (Pa)} \quad (24)$$

Donde:  $\rho_o c$  = Impedancia característica del aire.

$dx$  = Elemento de la fuente línea considerado.

$r$  = Distancia del elemento  $dx$  al punto A de medición.

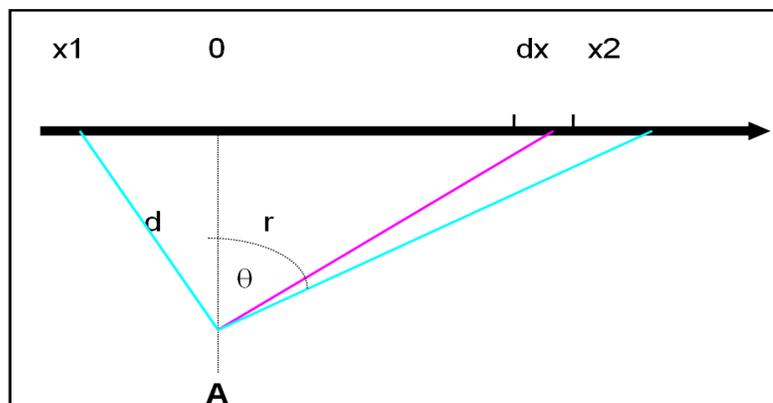


Figura 9. Vía de circulación como fuente línea, en planta. (Fuente: elaboración propia).

Si la vía se extiende desde  $x_1$  a  $x_2$  (largo de la calle), se obtiene:

$$p_{ef}^2 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{W\rho_0c}{2\pi(x^2 + d^2)} dx \quad (25)$$

Si se establece la sustitución

$$\text{sen } \theta = \frac{x}{r} \text{ y } \cos \theta = \frac{d}{r} \quad (26)$$

$$p_{ef}^2 = \frac{W\rho_0c}{2d} \text{ (Pa)} \quad (27)$$

Donde  $d \ll L$  (cerca de la calzada)

Implica que, cubriendo una calle larga, se obtiene una presión cuadrática inversamente proporcional a la distancia. Si se compara con una fuente puntual:

$$L_p = 10 \log \left[ \frac{W\rho_0c}{4rp_0^2} \right] = 10 \log \left[ \frac{4rp^2}{p_0^2} \right] \text{ (dB)} \quad (28)$$

$$L_p = 10 \log[4r] + 10 \log \left[ \frac{p_{ef}^2}{p_0^2} \right] \text{ (dB)} \quad (29)$$

$L_p$  Debido a fuente línea para calle larga, entonces:

$$L_p = L_p(\text{fuente puntual}) + 10 \log 2L \text{ (L largo calle) (dB)}.$$

En este caso, una fuente línea que representa a una calle larga aporta un nivel significativamente mayor que la fuente puntual. Para un cierto flujo vehicular  $Q$  (vehículos/hora) que circulan a una velocidad promedio  $v$ , siendo  $n$  el número de vehículos por kilómetro lineal:

$$Q = nv \quad (30)$$

Luego,

$$L_p = 52 + 10 \log \left[ \frac{nv}{d} \right] \quad dB(A)(*) \quad (31)$$

Donde:  $d$  = distancia al borde de la calzada en m.

Las variaciones de nivel de presión no solo son el resultado del cambio de flujo vehicular o de la densidad de vehículos sobre la vía, sino que también dependen de las variaciones de la velocidad media, que determinan a su vez una variación de la potencia acústica radiada.

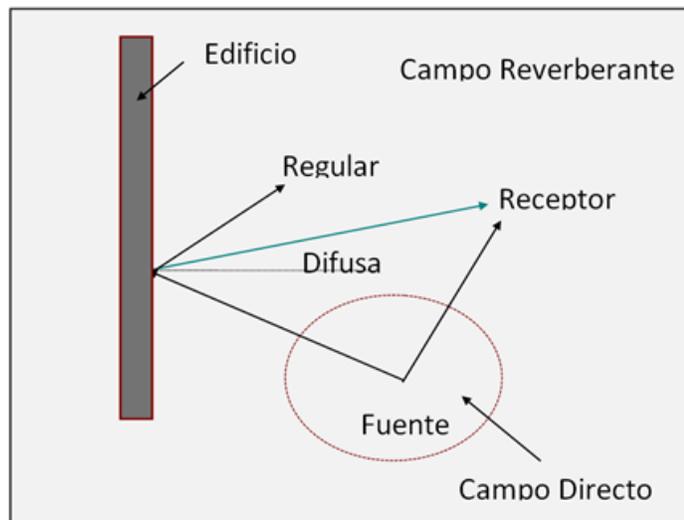
La expresión (\*) entrega 3 dB de atenuación por cada duplicación de distancia  $d$ , pero en realidad la baja absorción del suelo, aire y difusión sonora hacen que sea mayor que 3 dB. (Kuttruff, 1982).

#### **5.1.1.6. Difusión acústica en un espacio urbano**

El análisis de este fenómeno se debe efectuar por medio de determinar la presión sonora en un punto del espacio urbano, que es siempre la resultante de la interacción de dos campos sonoros: directo y reverberante.

De estas dos clases de energía que constituyen el total acústicamente energético, el campo sonoro reverberante tiene relación con el medio: en este caso con el espacio urbano. En cambio, el campo sonoro directo tiene relación solo con la fuente sonora.

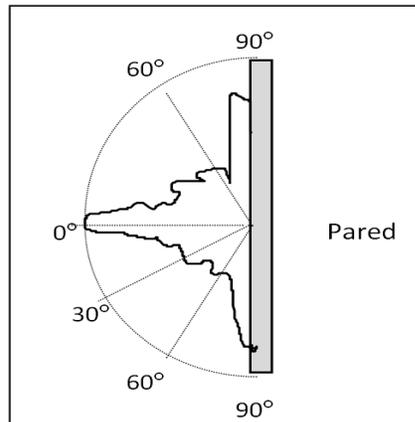
A cierta distancia de la fuente sonora, en cualquier espacio (excepto en el aire libre), existe siempre una línea divisoria que los separa y, por ende, los delimita, donde se iguala su magnitud. Sobrepasada esta línea, estamos en la presencia predominante de uno de los dos campos. Esta separación puede determinarse matemáticamente, igualando las expresiones de intensidad directa y reflejada. De este modo, logramos en primera instancia determinar el alcance físico de cada campo (Figura 10).



**Figura 10. Representación de campos sonoros. (Fuente: elaboración propia)**

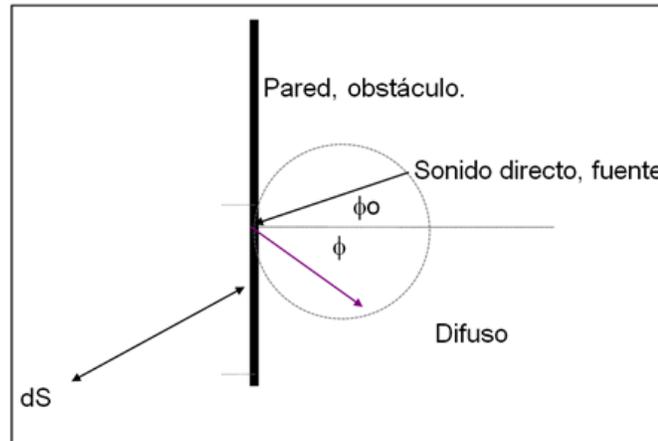
Cuando hay un obstáculo que se interpone en la trayectoria de propagación de una onda sonora, (por ejemplo una línea de edificios), la energía procedente de la fuente sonora recorrerá el espacio, siendo atenuada por las características de absorción del aire y por la distancia que recorre. Pero si suponemos que la fuente sonora radia omnidireccionalmente su energía, entonces los innumerables rayos sonoros lograrán llegar al obstáculo. Es aquí donde comienza el fenómeno de lo que sucederá con la energía sonora que incide sobre ese obstáculo (Figura 10). Esta tiene varias opciones: puede disiparse parcialmente en forma de calor en el material con el que incide (absorción), puede reflejarse regular y parcialmente, difractarse rodeando el

obstáculo (cambio en su dirección de propagación, solo en baja frecuencia en el ámbito urbano) o bien, difundirse en todas direcciones, repartiéndose esta energía de igual manera entre cada rayo, o privilegiando una u otra dirección (es decir, se forma un patrón de radiación particular) (Figura 11).



**Figura 11. Diagrama polar de radiación difusa, hemisférica, particular.**  
(Fuente: elaboración propia).

De lograrse esto último, se esperaría que el campo sonoro que se forma aporte energía distribuida espacialmente. Supongamos que existe difusión sonora, pensando que la fuente radia energía omnidireccionalmente, entonces un rayo sonoro cualquiera que incide en una pared de un edificio se difracta o dispersa en un extenso ángulo sólido (por ejemplo, si existiera textura en la pared, tal que las dimensiones de las irregularidades fueran comparables a la longitud de la onda ( $\lambda$ ), incidente sobre ella). En este caso, se formaría una radiación desde la pared con forma de esfera (Figura 12), suponiendo que la pared posee un coeficiente de reflexión 1 y que existe reflexión total.



**Figura 12. Reflexión difusa, en un elemento de área  $ds$ . (Onaga, 2005)**

Generalmente se produce difusión parcial, dado que la difusión total exige que la distribución direccional de la energía reflejada o dispersa sea independiente de la dirección bajo la cual incida el sonido (ángulo de incidencia del sonido). Sin embargo, asumir que ha ocurrido difusión total suele ser más representativo de un caso real de reflexiones, ya que no ocurre una única reflexión sobre una pared, sino que una sucesión de reflexiones procedentes de muchas paredes o segmentos de paredes.

Es posible aproximar una característica direccional de una pared radiando difusamente, dado que matemáticamente puede expresar el ángulo de radiación y la presión resultante en cada punto frente a ella. De acuerdo con la Figura 12, un elemento de área  $d_s$  de la pared es alcanzado por un conjunto de rayos paralelos o prácticamente paralelos que forman un ángulo  $\phi_0$  con la normal a la pared y cuya intensidad es  $I_0$ . Por lo tanto, la intensidad del sonido que se dispersa en una dirección, dada por el ángulo  $\phi$  y medida a la distancia  $r$  desde la superficie, será (por ley de cosenos):

$$I(r, \phi) = I_0 ds \cos \phi \frac{\cos \phi_0}{\pi r^2} \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (32)$$

Donde:

$$I_0 \cos \varphi_0 = B_0 \quad (33)$$

Donde: Se define como la energía incidente por unidad de área por segundo.

En la expresión (33), no se considera absorción de la pared, es decir, toda la energía incidente es radiada. Si existe absorción en la pared, se debe considerar el factor  $[1 - \alpha(\varphi)]$  multiplicando a la expresión para  $I(r, \varphi)$ .

De acuerdo con lo anterior, cada elemento de superficie se transforma en una fuente sonora secundaria, que se expresa por el hecho de que la distancia  $r$  se mide desde el elemento de superficie  $d_s$  hasta el punto de interés. Para el caso de reflexión regular, las distancias se miden (sin importar donde se curve el rayo sonoro) desde la fuente sonora real hasta el punto de interés. Esto podría inducirnos a pensar que su nivel sería menor, lo que no es efectivo dado que el porcentaje de energía reflejada se orienta en una sola dirección. Para el caso de difusión, sin embargo, la energía difundida pasa a formar parte de un campo reverberante sin beneficio alguno.

Por otra parte, cabe hacer notar que en campos sonoros difusos, prácticamente no existe interferencia acústica, ya que las fases de las ondas que lo conforman se distribuyen de manera aleatoria.

Un estudio particular del doctor Heinrich Kuttruff acerca de la difusión producida por una pared altamente reflectante muestra que existirá un incremento de nivel del orden de 3 dB cerca de la pared (Kuttruff, 1982), que al alejarse de ella (causado por la abundante concentración de rayos sonoros en las proximidades), y en cambio, habrá reducción de la densidad de energía. Por esta misma razón, si una superficie altamente absorbente se ubica adyacente y/o perpendicular a una muy reflectante y rígida, su absorción será mayor cerca del borde límite de ambas que a cierta distancia. Se observa en los espacios

urbanos estrechos y rodeados por edificios de gran altura, con fachadas de formas geométricas diversas y materiales prácticamente 100% reflectantes, debe controlarse, pues es de gran influencia en la profusión de ruidos.

#### 5.1.1.7. Criterios acústicos que definen importancia de los factores urbanos

El campo reverberante comienza a hacerse notar a partir del radio de reverberación urbano<sup>9</sup>, esto es, a partir de un círculo que lo separa del campo directo de la fuente. Este concepto nos permite categorizar acústicamente una región delimitada del espacio urbano, por ejemplo la formada por una calle y sus edificios aledaños, cuya extensión no sobrepase una distancia equivalente a la proyección de las reflexiones cuyo ángulo sea crítico<sup>10</sup>.

El radio de reverberación se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$R = \sqrt{\frac{QS\alpha_M}{4\pi(1 - \alpha_M)}} (m) \quad (34)$$

Donde:  $Q$  = Factor de directividad de la fuente<sup>11</sup>.

$S$  = Superficie total considerada en metros.

$\alpha_M$  = Coeficiente de absorción medio<sup>12</sup>.

El coeficiente de absorción promedio es un indicador de la relación de absorción superficial existente. Nos permite determinar la relación superficie/coeficiente de absorción, optimizando así el uso de materiales para reducir campo reverberante. Se trata, por tanto, de prolongar espacialmente el

---

<sup>9</sup> Radio de reverberación urbano: Es el lugar geométrico de los puntos donde se iguala la densidad de energía sonora del campo sonoro directo con la del campo reverberante.

<sup>10</sup> Ángulo crítico de reflexión: Es la máxima desviación respecto a la normal que puede sufrir un rayo sonoro.

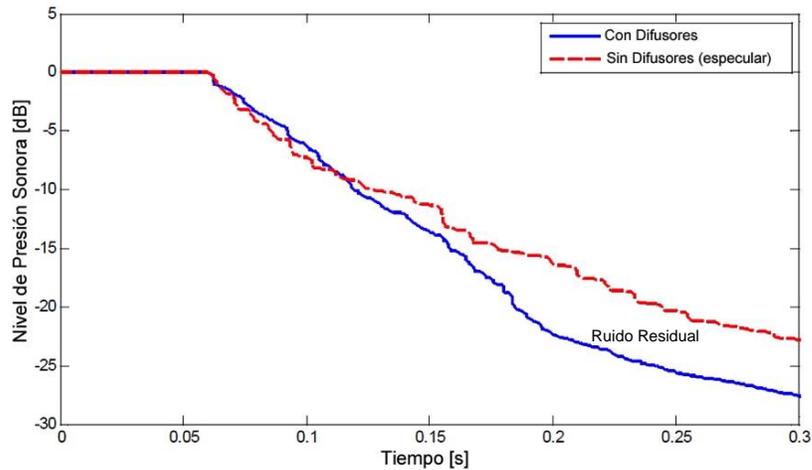
<sup>11</sup> Factor de directividad ( $Q$ ): Indica la amplitud del ángulo de radiación de una fuente sonora.  $Q = 1$  indica 360 °, es decir que la radiación es omnidireccional.

<sup>12</sup>  $\alpha_M$ , es el coeficiente de absorción promedio se calcula a partir de la expresión  $\frac{\sum S_n \alpha_n}{\sum S_n}$ , donde  $n$  representa el número de superficies consideradas. El coeficiente representa el % de absorción de energía sonora incidente por parte del material.

campo sonoro directo, aunque conservando la atenuación por distancia al receptor, posicionando adecuadamente aquellas superficies efectivas de contacto cuyo coeficiente de absorción sea elevado.

La difusión sonora es una técnica de la acústica de salas, actualmente bastante desarrollada, cuyo fin principal es proporcionar homogeneidad a un campo sonoro, de tal modo que en la posición de cualquier auditor se perciba la misma imagen sonora. Por otro lado, es la causante de los excesos de reverberación de los espacios urbanos densamente construidos, prolongando innecesariamente el ruido, pudiéndose establecer con propiedad la naturaleza dual de este fenómeno.

Sin embargo, “difusión” no significa necesariamente distribuir en forma pareja la energía, sino dispersarla en distintas direcciones, con variaciones de nivel, evitando que la reflexión sea regular y energética en una dirección. Lo que implica que se puede utilizar difusión organizando, reorientando, la energía sonora en un espacio. Técnicas de difusión basadas en redes de desfase (difusores Schroeder) producen además un efecto combinado de absorción de baja frecuencia que logra muy buenos resultados. Esto es de gran importancia para el control sonoro en salas como teatros y salas de grabación. Su aplicación al control de ruido urbano es original, y su espectro predominantemente deberá ser de media o baja frecuencia. Se ha comprobado que produce un decrecimiento del tiempo de reverberación al ser aplicado entre superficies paralelas (como en las calles) de al menos un 30% a 50%, y de reducción de 5 a 10 decibeles de los niveles, usando un modelo a escala 1:10 de calles urbanas (Figura 13). (Picaut, 2010).



**Figura 13. Curvas de reverberación con y sin difusores en fachadas al interior de una calle tipo cañón (ruido residual) (Picaut, 2010).**

## 5.2. Espacio Urbano

La cualidad más importante de las zonas urbanas consolidadas en relación con la propagación sonora, es la presencia de numerosos edificios con fachadas continuas y calles angostas. Estos grandes obstáculos modifican substancialmente las condiciones de propagación del sonido. Al incidir en ellos, el ruido se refleja y regresa, pasando a formar parte del campo sonoro reverberante que recibe el peatón, el automovilista: todos los usuarios de los espacios públicos.

La forma de la ciudad es el resultado de la interacción del empleo, la función y sitio; desde los conceptos en la mente de sus ciudadanos y del tipo de estructura que construyen, (ambos derivados de raíces pre-urbanas); y de la reacción de estos en empleo, función y sitio y la subsecuente actividad humana. Ninguno de estos factores es absolutamente fijo todos están sujetos a cambios; La ciudad es un proceso histórico; su imagen en cualquier momento dado es meramente un corte a través de un continuo. No es un trabajo de arte plástico, no es “arquitectura a gran escala”, tiene cierta similitud a un trabajo de arte

temporal, de poesía o música. Puede haber un hilo conductor recurrente. (Blumenfeld, 1979).

Las comunas de Santiago, Providencia y Las Condes (a lo largo de los ejes Alameda-Providencia-Apoquindo, sector Norte-Sur en Santiago-Centro), y otras comunas han concentrado gran parte de la construcción en altura, formando una cordillera de hormigón que se aleja de la escala humana. El manejo de las “escalas” espaciales ha sido, desde siempre, intrínseco a toda voluntad de configuración urbana y se mantiene como tal en el urbanismo. La experiencia polisensorial y procedimientos de diseño de la percepción del espacio físico real, relacionan la definición geométrica de “escala” con el fenómeno, diferente, de su percepción urbana o “espacio percibido”. (Bertrand, 1998). Un ruido de tráfico urbano de 80 decibeles, en un ambiente semianecóico se atenúa, 30 decibeles a 32 metros de distancia. En una calle tipo cañón a 32 metros de distancia se atenúa solo 15 decibeles. Esto nos lleva al problema del continuo paso de vehículos. El ruido tiene su propia escala, también es percibido en una calle con tráfico nocturno.

El ruido es un agente contaminante que forma parte de la ciudad, su impacto genera molestias, diurnas y nocturnas, limita las comunicaciones entre las personas que utilizan el espacio urbano. La ciudad es el espacio público que concentra la heterogeneidad social, requiere espacios de encuentro y de contacto tangible, veredas, plazas, avenidas, amigables con el medio ambiente, que permitan la diversidad, el encuentro. Esos lugares son justamente los espacios públicos.

La comuna de Santiago nos sirve como ejemplo para caracterizar un centro metropolitano. Constituye un lugar donde se concentran las actividades económicas dominantes tales como la producción, el consumo, el control administrativo y la gestión financiera. Tradicionalmente, ha sido (y continúa

siendo) un polo de atracción de los habitantes de la Región Metropolitana y del resto del país, monopolizando los servicios especializados, desplazando a otras zonas la función residencial y de comercio de uso diario y las actividades de esparcimiento. En Santiago Centro también se establece el intercambio de información, por lo que existen medios de comunicación y cultura, donde se desarrolla la gestión político-administrativa.

Con los últimos regímenes administrativos y la dinámica propia de los cambios políticos, económicos y sociales, se han modificado las actividades y usos del suelo (como calles Estado, Ahumada y Huérfanos, transformadas en paseos peatonales; la Estación Mapocho y su extensión en parque). Se agrupan, además, nuevas tendencias arquitectónicas y actividades humanas, (galerías comerciales, edificios de gran altura, sistemas de transporte modernos como el Metro), que no hacen otra cosa que mantener su preeminencia en la imagen mental de ciudad que poseemos, favoreciendo el confort acústico urbano.

En los últimos 40 años el crecimiento acelerado de las ciudades (provocado no solo por el aumento de la población, sino también por cambios en los hábitos de vida, aumento de la capacidad económica, desarrollo urbano, nueva política de edificaciones, crecimiento del parque automotriz), ha cambiado el significado de los espacios. La notable diferencia de distribución en el aumento de población entre 1992 y 2002. Las comunas centrales perdieron población, mientras las comunas periféricas la ganaron a tasas mayores que el promedio, como por ejemplo: Maipú, (6,20 por ciento anual), Quilicura (11,89 por ciento anual), Puente Alto, (6,83 por ciento anual). Se puede apreciar lo rápido que creció la población de estas comunas si se agrega que Maipú y Puente Alto casi duplicaron su población mientras que Quilicura la triplicó (desde 41.121 hasta 126.518 habitantes). (Galetovic, 2006).

Este crecimiento periférico y desagregado de Santiago, con respecto a las comunas del sector oriente y céntricas, genera un aumento significativo de las necesidades de transporte urbano con la consecuencia del ruido como complemento. Esta investigación se basa fundamentalmente en las calles consolidadas (específicamente tipo cañón) pero, es en la búsqueda de la armonía, del confort urbano, donde nos detenemos para colaborar, con 2 o 3 decibeles menos en las veredas, calles y plazas del centro de Santiago, a través del estudio de los factores que intervienen en la generación, propagación y por supuesto su control e impacto.

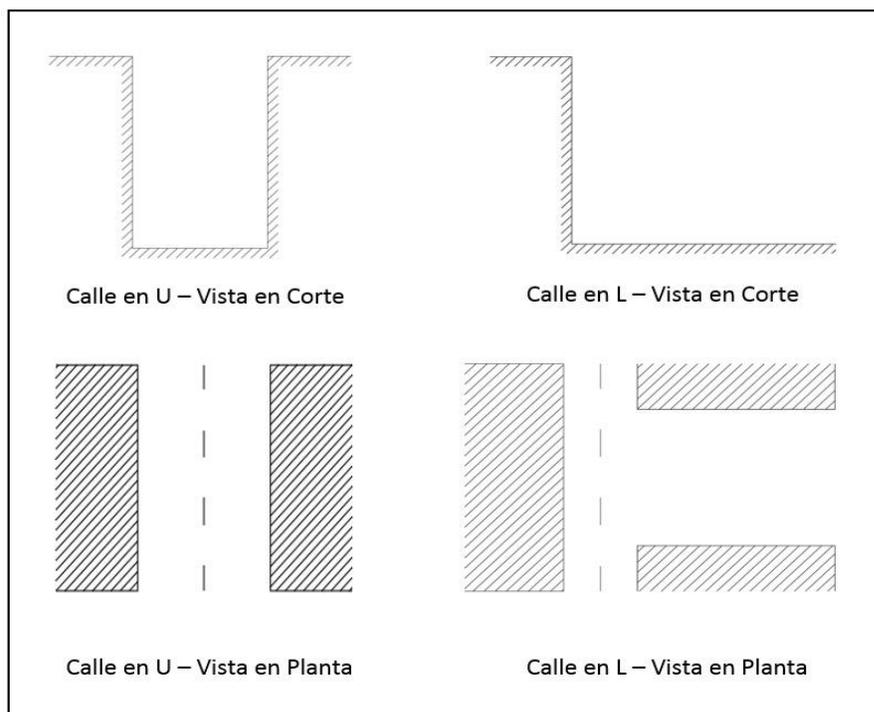
La cantidad de departamentos vendidos en 2005 en Santiago Centro fue de 8.330 unidades, mientras que en la comuna de Quinta Normal fue de 469 y en la comuna de San Miguel se vendieron 554 (López, 2008). Con esto aumenta la densidad de población pero los servicios siguen siendo los mismos, las calles no han modificado su tamaño. Esto, traducido a las actividades de transporte y uso de suelo, se transforma en incremento del ruido y en contaminación, aumentando el deterioro ambiental del espacio público.

Si bien todas las ciudades han nacido en un emplazamiento natural, conforme transcurre el tiempo, este ha pasado a jugar un papel secundario, privilegiándose las vías de transporte, la urbanización de suelos de uso agrícola con fines residenciales, comerciales o industriales, dejando de ser la urbe un complemento del entorno.

Así, los espacios urbanos públicos cubren objetivos de diversa índole: transporte vehicular, peatonal, ciclovías, esparcimiento, comercio ambulante, deporte, cultura, publicidad, decoración, mobiliario urbano, señalética, publicidad, arte urbano (bancos, fuentes de agua, quioscos, focos de iluminación, semáforos). Sin embargo, implícitamente, establecen una fuerte dependencia no solo histórica, sino también emocional, porque se crea un nexo

entre el entorno y las personas, quizás por un sentimiento de pertenencia o de correspondencia.

De esta investigación pueden desprenderse estudios de nivel en altura, que permitirán corroborar que los niveles son relativamente homogéneos, sobre todo en aquellos casos de calles angostas tipo U y L, figura 14, con edificios de gran altura. Este efecto permitirá tomar algunas medidas para evitar la prolongación excesiva, o para reorientar las reflexiones en otras direcciones, así como el uso de fachadas “verdes”, o doble piel con textura que oriente el sonido en forma difusa. Por otra parte, las carpetas de rodado deben tener un mantenimiento adecuado, y al momento de renovar, utilizar carpetas continuas silenciosas aquellas con porosidad logran una atenuación entre 1 y 4 decibeles.



**Figura 14. Tipología de calles tipo U y L. (Fuente: Huaquín, 2016)**

### 5.2.1. Factores Urbanos

Lo más importante de la planificación acústica del espacio urbano, representa el cambio de paso muy necesario en el enfoque de la gestión del entorno acústico, poniendo a la gente en el inicio del proceso en lugar de al final. De esta manera, los usuarios del espacio se convierten en los especificadores primarios de facto de cualquier proyecto. El filósofo alemán Gernot Böhme señaló que: "La planificación urbana ya no puede contentarse con el control del ruido y su reducción. Debe prestar atención a la naturaleza de la atmósfera acústica de las plazas, zonas peatonales, de ciudades enteras". (Kang, 2016).

¿Se puede optimizar el espacio físico ya establecido? Sin duda: el espacio urbano consolidado, aparentemente inamovible, puede transformarse (incorporando criterios acústicos) en un espacio más habitable. Desde una perspectiva urbana, las urbanizaciones de los últimos 30 años en Chile han tenido aciertos muy buenos, y no tanto en relación con el aumento de la contaminación acústica.

Lo que nos acerca al futuro positivo de estas recomendaciones son los planes de renovación urbana, instrumentos que permiten intervenir zonas en búsqueda de mejorar la calidad de vida, la habitabilidad y la movilidad, a escala local y barrial.

A comienzos de los 90, hubo cambios políticos y culturales trascendentales, y el centro de Santiago no fue la excepción. Desde el censo de 1982, la comuna perdía población. Sus residentes optaban por buscar viviendas más amplias en la periferia, en barrios más seguros y "alejados del ruido". El fenómeno se precipitó con el terremoto de 1985 y el daño irreversible de diversos inmuebles céntricos. A 20 años del plan de renovación urbana, cambió el perfil del habitante de Santiago Centro. (López, 2005).

Los espacios públicos son utilizados por las personas que viven y trabajan en la ciudad. Los viajes peatonales en el interior de Santiago Centro han aumentado, producto del aumento de la densidad de habitantes. Luego, el impacto sonoro en la población aumenta proporcionalmente según la cantidad de personas afectadas.

Las recomendaciones de planificación urbana para producir cambios en el impacto acústico sobre calles, veredas y finalmente en los ciudadanos, están orientadas a distintas acciones mancomunadas con los tomadores de decisiones del ordenamiento urbano. Se puede apreciar que los factores urbanos y acústicos descritos coexisten e interactúan en la vida citadina. (Figura 15).

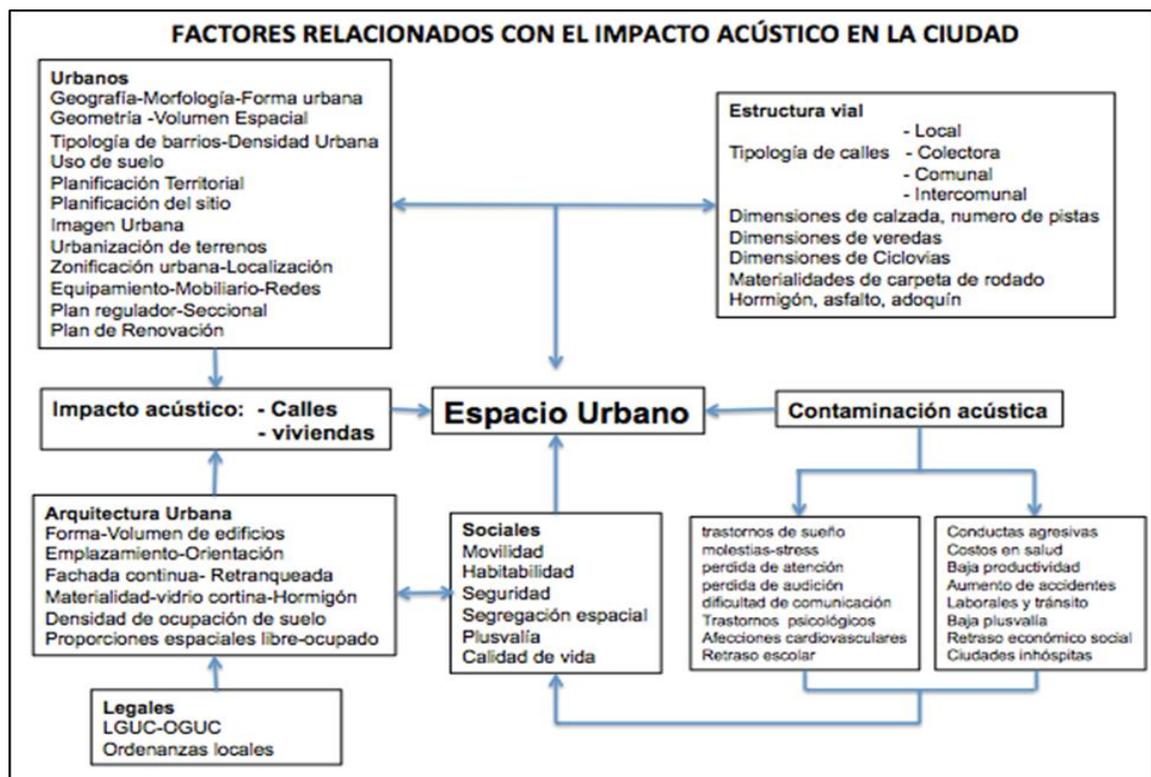
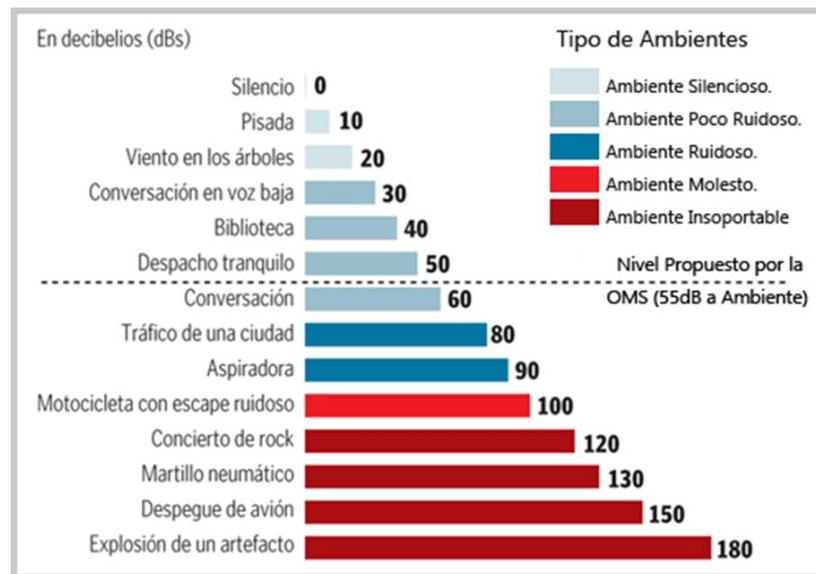


Figura 15. Diagrama, Factores relacionados con el impacto acústico en la ciudad.

(Fuente: Huaquín, 2016).

El análisis de un sector o barrio pasa por su actividad, emplazamiento, forma urbana y uso de suelo, condición de regulación local a que esté sometido (sea plan regulador, seccional, plan comunal, plan de renovación urbana, o cualquier política de desarrollo urbano vigente) para la zona, barrio o espacio en estudio.



**Figura 16. Niveles de presión sonora, y presiones correspondientes de diversas fuentes sonoras. (CEA, 2015)**

La figura 16, nos permite ver los niveles de ruido de diferentes fuentes generadoras. La Organización Mundial de la Salud considera dañinos todos los niveles por sobre los 85 decibeles. El ruido es considerado un factor psicosocial de salud. Los accidentes del trabajo y tráfico vehicular, tienen frecuentemente su origen en la monotonía, en estados de tensión emocional (por ejemplo, conflictos matrimoniales y frustración en el trabajo), en el estímulo excesivo a causa del ruido y del tráfico. (OMS, 1976).

Si podemos dar valor al espacio urbano desde la percepción auditiva y visual, es decir, si logramos controlar las reflexiones (como se ha demostrado)

incorporando espacio privado al espacio público, modificando la textura de fachadas, mejorando las carpetas de rodado, cambiando el transporte, modificando el uso de calles y aplicando todo un concepto abordado en este trabajo, con una disminución de solo 3 decibeles lograremos una sensación de que el ruido ha disminuido en un tercio de su magnitud (Everest, 2009. Harrys, 1977).

La percepción acústica de un sonido es una materia de la psicoacústica rama de la psicofísica, estudia la relación existente sobre el estímulo de carácter físico y la respuesta de carácter psicológico que el mismo provoca. Existe una relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que hace de ellas el cerebro, es una disciplina empírica. Los resultados se obtienen estadísticamente a partir de los resultados concretos de experimentos realizados con cada uno de los sujetos del experimento.

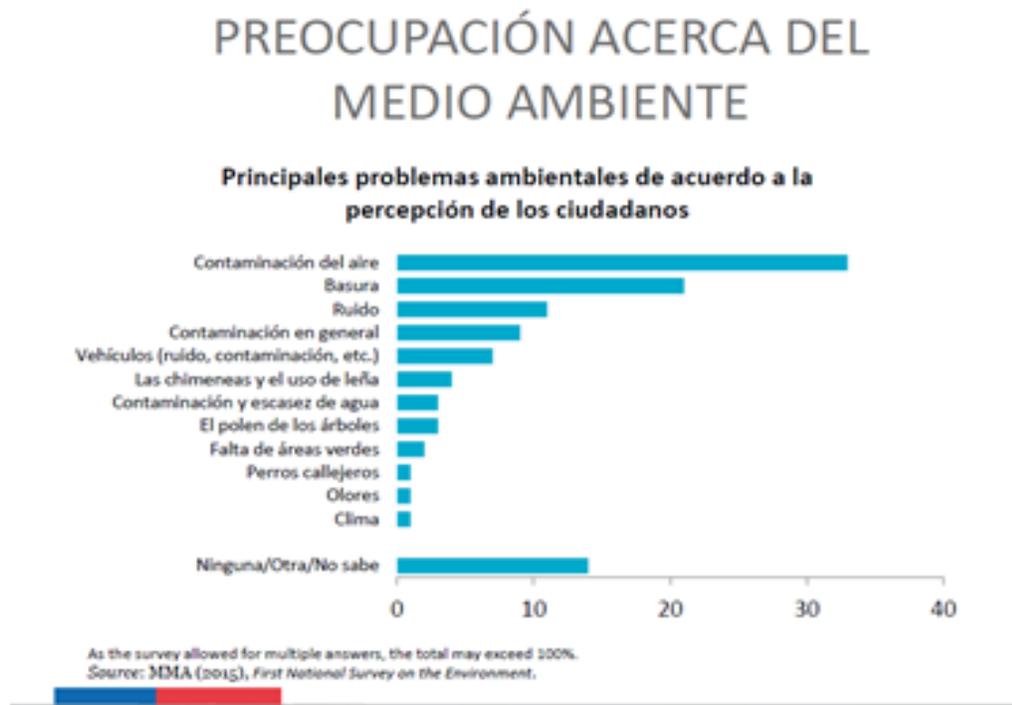


Figura 19: La percepción ciudadana acerca del medio ambiente. (Fuente, MMA, 2015)

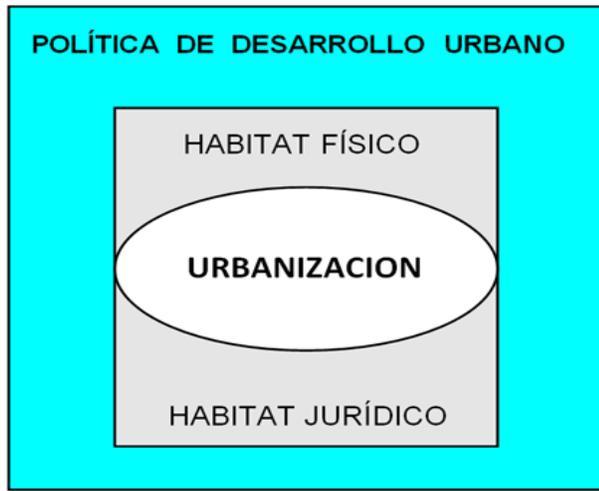
En la Figura 19, podemos observar, que la percepción de los chilenos frente los problemas del medio ambiente, el ruido está en tercer lugar, razón suficiente para incluir al ruido entre la prioridades de las políticas de desarrollo urbano.

### **5.2.2. Política Nacional de Desarrollo Urbano, PNDU.**

De las Generalidades: La nueva Política Nacional de Desarrollo Urbano se origina en la ausencia de una política urbana explícita para guiar el desarrollo de las ciudades de Chile. La PNDU centra su atención en las personas y su calidad de vida, constituyéndose ésta en su eje fundamental.

Del Diagnostico Urbano de la PNDU: la política constata problemas importantes: en cuanto a la movilidad, la falta de conectividad y la congestión; en cuanto a la cultura, la deficiente conservación del patrimonio y la falta de valoración cultural; en cuanto a la calidad ambiental y urbana, la agresión a los sistemas naturales y la falta de espacios públicos de calidad; y en lo institucional; la ineficacia institucional en la administración de las ciudades. (PNDU, 2014)

El espacio público toma un papel de protagonista, no solo porque diseña el trazado del espacio construido, sino también es el lugar por excelencia de la sociabilidad y del contacto que caracteriza la ciudad. Es el espacio de la cotidianidad, del juego, de las relaciones casuales o habituales con los otros, de los recorridos a las diferentes actividades. (Borja & Muxi, 2000).



**Figura 20. Política Nacional de Desarrollo Urbano. (Fuente: elaboración propia).**

El espacio urbano cae dentro de la categoría de bien común. Se encuentra limitado física y jurídicamente. Las calles, veredas, parques, plazas, caminos y puentes son bienes nacionales de uso público. Podemos usufructuar de ellos, pero ¿hasta qué punto? (Figura 20).

Las normativas entran en esta etapa, para asegurarnos de que los espacios que frecuentamos nos sean habitables y para evitar que continúen deteriorándose. Las normativas actuales (en relación con la conservación y protección del individuo y del entorno de los agentes contaminantes, como el ruido) son débiles y, por lo tanto, flanqueables. El ruido, sobre ciertos niveles, constituye una molestia y un perjuicio, dependiendo de una valoración que se debiera establecer.

Desde el punto de vista legal existe el término “perjuicio”, que técnicamente es ineficiente ya que no impone una barrera clara sobre la cual basarse. El ruido, como perjuicio público, constituiría un delito (es decir, sería merecedor de una sanción legal). En cambio, como perjuicio privado sería un agravio, contemplando una compensación para su reparación. Precisar el rol de

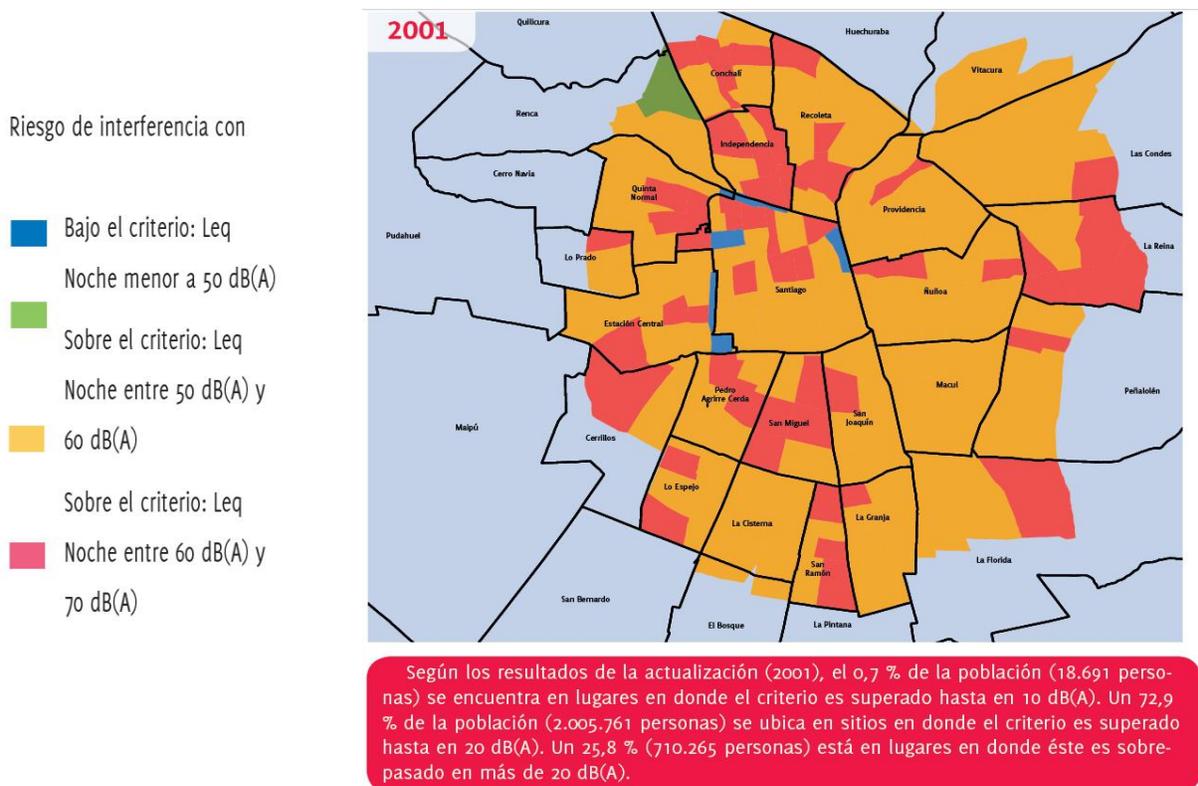
perjuicio en público o privado será, por tanto, un aspecto fundamental para establecer su importancia. (Harrys, 1997).

Perjuicio implica daños físicos comprobables. Por ejemplo: privación del sueño, daño a la salud. Generalmente, cuando se habla en estos términos es porque existe un sector industrial o comercial que interfiere las actividades de los residentes de un sector privado, por medio de una extensa zona de producción de ruido (una calle). Por lo general requiere, además, de la identificación de la fuente de emisión. Nace entonces el concepto de “zona de reducción de ruido”, donde es posible moderar los niveles y prevenir cualquier aumento posterior, por medio de la circunscripción del problema a un área específica. Los municipios cuentan con una importante herramienta de acción, como son las ordenanzas municipales, que tienen más bien un carácter prohibitivo que regulador.

En Inglaterra existen, incluso, actas de compensación territorial, donde aquellos propietarios que sean víctimas de un aumento de los niveles de ruido de tránsito hasta un nivel por sobre el límite prescrito en la normativa (por causa de construcción de nuevas vías de circulación o mejoramiento de las ya existentes), reciben una compensación para la aislación sonora de sus casas. En el ámbito de la planificación, se les concede a las autoridades facultades que les permiten establecer lineamientos específicos sobre cuándo otorgar concesiones y cuándo requerir, por ejemplo, aislación sonora en una construcción. Estas se refieren tanto al nivel de ruido en el área que interfiera con el desarrollo propuesto, y al ruido que pueda ser emitido en el proceso de desarrollo. (Lambert, 1998).

En Chile en el año 1989, en la Región Metropolitana se realizó el “Estudio base de generación de niveles de ruido” del Gran Santiago, encargado por la Intendencia Metropolitana, con el propósito de evaluar y analizar el ruido comunitario exterior, en una zona que cubrió cerca de 280 km<sup>2</sup>. En dicha

cobertura espacial habitaban aproximadamente 3 millones de personas, distribuidas en 180 distritos censales (de acuerdo con los datos obtenidos del censo de población del año 1982, los cuales correspondían a 23 comunas de la Región Metropolitana). Mediante este estudio, se pudo detectar los sectores donde la situación sonora presentaba mayores niveles de ruido. Al mismo tiempo, permitió identificar los posibles riesgos a los cuales estaba sometida la población expuesta al ruido urbano, considerando normativas nacionales e internacionales. Dicho estudio fue actualizado por el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA, 2001). Dentro de los principales resultados, destaca la evaluación del criterio de interferencia con el sueño de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, determinándose que en la zona de estudio no existían lugares sin riesgo de interferencia con el sueño. (Figura 21).



**Figura 21, Mapa de riesgo de interferencia con el sueño, Gran Santiago, 1989-2001.**

**Fuente: Intendencia 1989, SESMA, 2001.**

En 1994, la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente (D.O. de fecha 9 de marzo de 1994), fundamenta la necesidad de una planificación ambiental y orienta, a través de sus postulados, hacia el cuidado de la naturaleza y el paisaje (aire, suelo, agua, flora y fauna), requiriendo la integración de la dimensión ambiental en la planificación de los usos del espacio, por medio de los instrumentos de planificación.

Actualmente, se están elaborando dos normas: la Norma de Emisión de Ruidos Generados por Actividades de Construcción, que debe incorporar criterios de planificación, de información a la comunidad y una certificación de la emisión de las maquinarias y equipos; y la “Norma de Emisión de Ruido para Vehículos Livianos, Medianos y Motocicletas”, tendrá una estructura similar al D.S. 129 (norma de ruido de buses), en la cual se establecerían exigencias para el ingreso al parque vehicular y en los posteriores controles en las revisiones técnicas (MTT, 2002). Promulgada el 24 de febrero del 2015, por el MMA, “Establece Norma de Emisión de Ruido para Vehículos Livianos, Medianos y Motocicletas”, la cual deberá entrar en vigencia el 02 de diciembre de 2017.

La sección de Control de Ruido Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente, ha elaborado el documento Estrategia para la Gestión del Control de Ruido Ambiental (MMA, 2010-2014), que en una de sus partes permite que otros ministerios interactúen, como por ejemplo:

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, MINVU. Se hacen necesarias dos regulaciones complementarias que tienen relación directa con las funciones del MINVU: calidad acústica de la vivienda y “ordenamiento territorial”. Así, de modo de incorporar exigencias a las reglamentaciones vigentes o elaborar una nueva regulación, se impulsará un convenio de cooperación que incorpore los dos aspectos. En detalle, el convenio de cooperación con el MINVU debiera contemplar:

- Ordenamiento territorial/instrumentos de planificación territorial. Contacto: División de Desarrollo Urbano, DDU. Se debe iniciar un trabajo formal para incluir el ruido como variable de decisión, que permita la mixtura de actividades de un modo compatible.

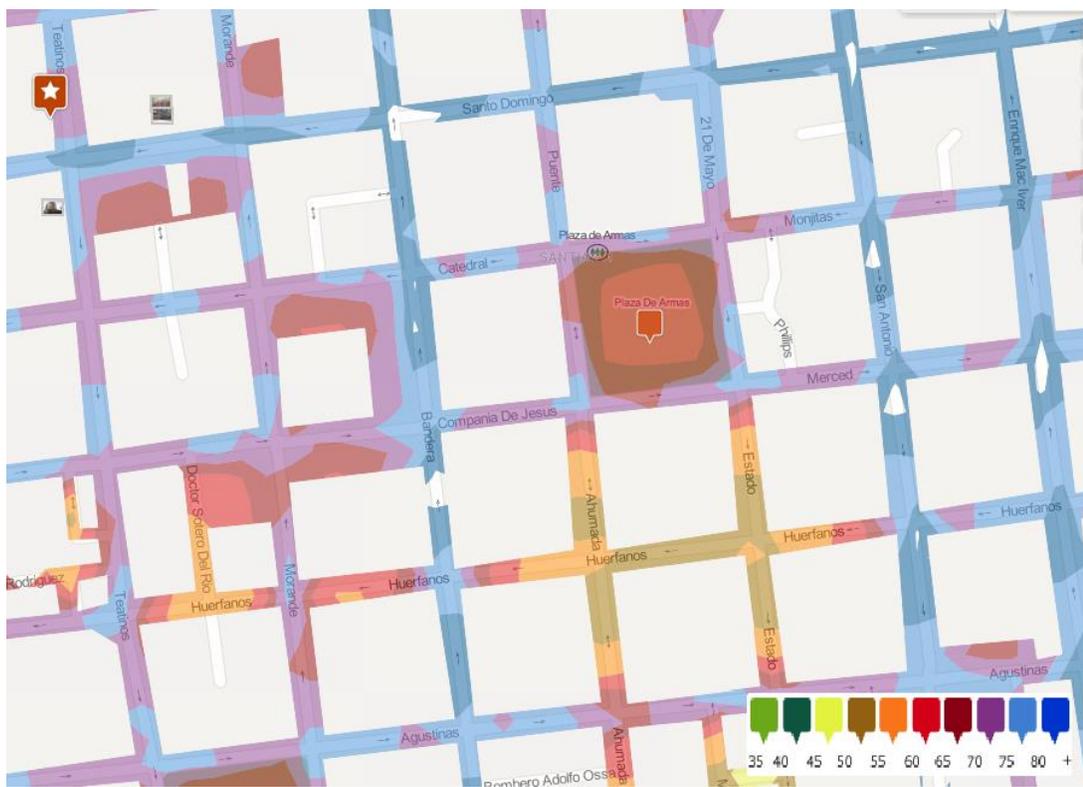
- Calidad acústica de la edificación. Contacto: división técnica. Si bien la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones establece exigencias de aislamiento acústico, no lo establece para las fachadas, por lo que se hace necesario mejorar e implementar el sistema de calidad acústica de las edificaciones.

Los estudios indican que el ruido es sobrepasado entre 20 y más decibeles de lo recomendado por EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) y el 98,7 % de la población está expuesta a la interferencia con el sueño. La normativa actual plantea la necesidad de incorporar los instrumentos de planificación ambiental. Es aquí donde el estudio y los resultados de la difusión acústica, recomienda el vínculo entre factores acústicos y urbanos, para mejorar la calidad de vida, a través del control acústico del espacio urbano.

### **5.2.3. Ordenamiento Territorial**

Durante el año 201, como instrumento de planificación territorial, Dentro de las políticas de planificación urbana se ha incorporado (a través, del Ministerio del Medio Ambiente MMA), los mapas de ruido. Esta gestión permite avanzar en la dirección que la Comunidad Europea a trazado en materia de contaminación acústica. En Chile se ha elaborado mapas de varias ciudades incluyendo, Coquimbo-La Serena, Temuco-Padre Las Casas, Valdivia, y el Gran Santiago. Su ejecución se ha realizado por el Ministerio del Medio Ambiente y encargado al Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile, Valdivia.

Las vías exclusivas han sido un gran aporte en la descongestión vehicular en el centro de Santiago, incluyendo la concentración del transporte urbano en algunas calles céntricas. Calles Teatinos por ejemplo no es vía exclusiva y ha disminuido significativamente sus niveles. La Figura 22, nos permite ver que los niveles de las calles: San Antonio, Mac-Iver, Bandera fluctúan entre 75 y 80, dB(A) y Teatinos entre 70 y 75 dB(A).



**Figura 22. Mapa de ruido del centro de Santiago, (Fuente: Elaboración propia en base a MMA, 2014)**

Cuadro 1 Valores máximos de ruido ambiental recomendados por la OCDE y UE		
RECOMENDACIONES OCDE - UE		
$L_d$	Periodo diurno	65 dBA
$L_n$	Periodo nocturno	55 dBA

Nota:

$L_d$ : Nivel de presión sonora continuo equivalente para el periodo diurno.  
 $L_n$ : Nivel de presión sonora continuo equivalente para el periodo nocturno.

Fuente: CONAMA, 2009.

Nuestra obligación como país, frente a los compromisos adquiridos en tratados internacionales tales como la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), es dar cumplimiento a las recomendaciones y en las referidas al “tema ruido” que apuntan al refuerzo de las políticas de control de ruido:

- Reforzamiento de las regulaciones existentes, especialmente las relacionadas con fuentes móviles y aeronaves;
- Promover la fabricación de productos más silenciosos, etiquetado de productos, incentivos económicos y acciones informativas;
- Establecer mecanismos de financiamiento;
- Proteger a la población más expuesta por medio del manejo del transporte, instalación de barreras acústicas, aislamiento de edificios;
- Prevención de nuevas situaciones ruidosas a través del “ordenamiento territorial, especialmente en áreas urbanas”.

Todo problema de control de ruido urbano debe ser analizado considerando los tres componentes fundamentales, interrelacionadas:

1. Las fuentes de ruido.
2. Las vías de propagación del ruido entre fuentes y receptores.
3. Los receptores.

La reducción de ruido necesaria en cada fuente dependerá de la contribución de esta a la duración de los niveles predominantes percibidos en los distintos sitios de recepción; de las alternativas técnicas disponibles para reducir el ruido en la fuente, su costo; aceptación económica, política y social; de la autoridad y disposición de distintas instituciones gubernamentales para

implementar esas alternativas de reducción de ruido. Tales alternativas incluyen la implementación de productos más silenciosos, limitación de la duración de la emisión, apantallamiento de las fuentes. Algunas de estas alternativas de reducción pueden requerir una ley apropiada, a través de normas de emisión de ruido.

Técnicas alternativas para modificar los niveles de ruido en las vías de transmisión incluyen la previsión de adecuadas distancias entre las fuentes de ruido y los receptores, el uso de barreras naturales y construidas (tales como, a lo largo de carreteras, protegiendo áreas residenciales), y métodos optimizados de construcción de edificios, para reducir la transmisión en su interior y exterior, como en las calles encajonadas formadas por hileras de edificios.

También se debe incluir en el análisis del control de ruido ambiental, alternativas de protección en los sitios de recepción, a menudo consideradas como último recurso. Es en el receptor donde se aplican las normas de ruido ambiente, basadas en el grado de efecto que el ruido tiene sobre él. Esto dependerá, generalmente, del uso del espacio alrededor del receptor, áreas externas de recreación, zonas residenciales exclusivas, hospitales, escuelas, aislación de edificios, protectores auditivos, modificación y/o alteración del tiempo de algunas actividades.

El control de ruido urbano, el ordenamiento territorial y la planificación del uso del suelo urbano debe ser un proceso integrador, para mejorar la calidad de vida en la ciudad, en la cual el transporte, la construcción, el comercio, viviendas y otras actividades de uso de suelo y sus interrelaciones sean simultáneamente analizadas y evaluadas.

En relación con la arquitectura presente en las fachadas, es posible establecer que los espacios no construidos (es decir, el hecho de que no se utilice el 100% de la línea oficial de edificación) favorecen la amplitud de espacio

en la calle y, de inmediato, tanto la sensación de espaciosidad como niveles menores contribuyen a cambiar el campo sonoro, reduciendo el ruido presente. Esto es interesante de considerar, ya que sugiere un primer criterio acústico aplicable al diseño arquitectónico-urbano, que es incorporar espacios libres no solo para que el peatón interactúe con ellos, sino también con el fin de reducir el impacto de la fuente y del campo sonoro sobre él.

#### **5.2.4. Análisis y proposición de normativas complementarias**

Recientemente se ha promulgado la Ley N° 20.958 (MINVU, 15/10/2016) que: “Establece un sistema de aportes al espacio público”. Si vinculamos esta ley con los permisos de edificación, planes de renovación urbana, seccionales, u otros Instrumentos de Planificación Territorial, podemos lograr generar usos de suelo favorables con el confort acústico.

Existen ruidos evitables e inevitables. Los primeros merecen ser estudiados por especialistas en forma interdisciplinaria, y para los segundos debemos utilizar la legislación como elemento de control.

Adoptar una legislación sobre ruido requiere considerar sus objetivos y alcances. La búsqueda de una adecuada planificación de la localización industrial, residencial, vial y su entorno urbanístico, pasa por el estudio de la regulación de la zonificación urbana tanto a nivel metropolitano como intercomunal o local, planificación del sitio, trazado de calles y avenidas, líneas de edificación, etcétera, tomando en consideración la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, aumentando los aspectos acústicos.

Estos criterios deben agrupar temáticas afines como, por ejemplo, definir la sensibilidad al ruido por zona. Sabemos que actualmente la legislación hace uso del concepto “sensibilidad” de manera implícita a través de considerar un nivel máximo permisible de acuerdo con la definición de una zona. Por

ejemplo, para zona residencial exclusiva el nivel máximo es más restrictivo (D.S. 38, MMA) que para una zona residencial con comercio, lo que la califica como la más sensible. Sin embargo, no incorpora al interior de un hospital o escuela el concepto de zona sensible, que permitiría reorientar el proceso de construcción, logrando la redistribución interior de espacios como medida efectiva de control de ruido sobre los receptores.

Desde el punto de vista de la problemática del ruido en el espacio urbano, los planes de renovación urbana deberían contemplar que existe deterioro urbano no solo cuando existe pérdida de valor de las estructuras por efectos del paso del tiempo, catástrofes o por cambios en el uso del suelo, ya que el valor relativo al ruido también debe estar asociado al confort que se logra en un determinado lugar. Este, sin duda, está relacionado con los niveles de ruido que se desarrollan y perciben en un lugar determinado, y más aún cuando es el propio espacio el que contribuye a incrementarlos.

Actualmente, en muchos países se tratan los problemas de ruido en relación con la construcción en términos de aislación sonora, es decir, de evitar que los ruidos externos penetren al interior de los edificios. Las fuentes también se tratan, para reducir los ruidos que estas generan a través de las vías de transmisión que pueden producir una duplicación de la potencia acústica, que aún no han sido consideradas.

#### **5.2.5. La influencia del espacio construido sobre el campo sonoro**

En calles encajonadas, tipo cañón, se genera un aumento del ruido residual, así como también un campo reverberante<sup>13</sup> producido por la suma de reflexiones que ocurren desde que se genera el sonido por primera vez, hasta que llega a los oyentes. Se postula entonces que se produce un incremento del

---

<sup>13</sup> Campo reverberante: Parte del campo sonoro originado en las reflexiones en diversas superficies de un espacio abierto o cerrado.

nivel de presión sonora, generado por una fuente de ruido como los vehículos al encontrarse en una calle, es decir, un espacio urbano construido con edificaciones en altura y en forma de “U”, con respecto a la misma fuente de ruido situada en campo libre, o semianecoico (sin edificios en altura paralelos).

Se busca establecer una relación entre factores urbanos tales como la tipología de una calle, densidad de edificios, su distribución espacial, altura, ancho de calzada, veredas. Es decir, la forma y ocupación del suelo, arquitectura, fachadas (continua y/o discontinua, con retranqueos), materialidad, diferentes texturas y la influencia que ejercen sobre variables acústicas tales como niveles de presión sonora ( $L_p$ ) en la posición del receptor, reflexiones producidas por cada obstáculo antes de llegar al receptor, dispersión geométrica de los rayos sonoros, ruido residual<sup>14</sup> y reverberación resultante, que permitan establecer cuáles de estos factores tienen incidencia e implicancia en el fenómeno de aumento de los niveles de ruido, y cómo contribuyen en mayor o menor grado a concentrar o direccionar el sonido, aumentando los niveles de ruido percibidos.

#### **5.2.6. La influencia de la imagen urbana sobre el campo sonoro**

Los sistemas viales, las secuencias y la proporción entre espacio libre y construido de un distrito, sector o barrio, también contribuyen de manera importante a la imagen y forma sonora del espacio urbano, ya que un espacio cerrado tiende a producir un incremento de nivel y una sensación de encierro, por la cercanía del receptor a la fuente sonora o por una gran cantidad de superficies de contacto al frente de onda. El flujo vehicular puede ser controlado, permitiendo una mejor distribución de la energía sonora. Por otra parte, la forma urbana bien definida, posición de los edificios en relación con la vereda y calle,

---

<sup>14</sup> Ruido residual: Campo sonoro reverberante no deseado de un ambiente espacial urbano, que se transforma en molestia debido a su componente temporal y energético adicional.

podrá considerarse como medidas de control. Por lo tanto, es posible planificar el uso de suelo en relación con las fuentes de ruido, las superficies reflectoras (vías de transmisión) y los receptores.

El efecto que se pretende conseguir es crear un espacio sonoro acorde con el espacio urbano disponible, pero también que contribuya a formar una imagen atractiva del entorno. En este sentido, el control de las reflexiones, por medio de mantener el dominio de los parámetros que las caracterizan (a saber: su nivel, componentes de frecuencia (espectro), distribución temporal (reverberación) y distribución espacial (difusión) permite lograr una imagen audiovisual menos agresiva y complementaria de la realidad urbana, rescatando la belleza arquitectónica empleada por años en las áreas consolidadas entre otras.

La construcción de volúmenes magistralmente compuestos, que acomodan espacios donde el hombre cumple una función, desarrollando actividad junto a otras personas, es lo que llamamos “planificación urbana” o urbanismo (Parodi, 1983). La incorporación de criterios acústicos a la planificación y diseño urbano, permitirá lograr una percepción audiovisual, mejorada del entorno.

#### **5.2.7. Modelos de cálculo y predicción de niveles de ruido, producidos por el tráfico vehicular urbano.**

Se refiere a la determinación de un patrón que describa eficientemente el ruido de la ciudad, generado principalmente por tráfico de vehículos, transporte público y camiones. Esto se traduce en fórmulas matemáticas que expresan al ruido como función de ciertos parámetros que no caen en la categoría de urbanos (a saber, velocidad de circulación, flujo vehicular, distancia con la posición de interés y otros). Principalmente, tratan de proyectar los niveles de ruido en una zona urbana, partiendo con un análisis de

fuentes sonoras tipo (fuente línea<sup>15</sup> y fuente aérea), estableciendo la influencia de la velocidad de flujo vehicular y distancia de la fuente al receptor (Lyon, 1974)

En materia de predicción de niveles de ruido se pueden encontrar dos categorías o métodos de evaluación. Primero, están todos aquellos cuyos cálculos se realizan con la ayuda de fórmulas matemáticas, tablas o gráficos. En segundo lugar, se utilizan programas de computación preparados especialmente para ello. Por ejemplo: Noise Monitoring System, Brüel & Kjaer; Soundplan, For noise & Air Pollution Evaluation, B + B int. según ISO 9613, CADNA, (Computer Aided Noise Abatement) y otros.

También, la utilización de maquetas a escala permite abordar problemas complejos cuya solución mediante modelos teóricos presente dificultades. Sin embargo, con la tecnología actual, las maquetas virtuales<sup>16</sup> aparecen como un método para evaluar la prolijidad de los diseños. A medida que se profundiza en las investigaciones, los resultados se evalúan estadísticamente, utilizando regresiones matemáticas complejas, de manera de medir el error de los resultados, incluso requiriendo tecnología computacional aun no disponible. (Can, 2015)

Basado en un conocimiento detallado de los diferentes aspectos que definen la complejidad de la propagación del ruido y las fluctuaciones estadísticas que experimentan sus distintos niveles, es que la predicción teórica de los niveles sonoros en áreas urbanas ha sido abundante.

En general, ha consistido fundamentalmente en el desarrollo de alguna relación entre los parámetros que describen el campo acústico mediante

---

<sup>15</sup> Fuente línea: Formada por un tráfico vehicular continuo, con respecto a un punto a 90° desde un observador.

<sup>16</sup> Maquetas Virtuales: Modelaciones computacionales de volúmenes como herramienta para simular fenómenos acústicos de una manera virtual. Se utiliza software de arquitectura que interactúan con los de ruido y/o acústica.

descriptores<sup>17</sup> tales como el  $Leq$ <sup>18</sup> (nivel continuo equivalente), clima de ruido<sup>19</sup>,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ , o  $L_{90}$ <sup>20</sup>, y la densidad del tráfico vehicular (como fuente principal de ruido).

Estudios realizados en Francia por la División de Acústica Ambiental, han determinado fórmulas que expresan los niveles de ruido para describir calles tipo cañón y que nos permiten comparar que, respecto a la posición de una fuente línea, al aire libre, existe un incremento de nivel de 2 dB, si el espaciamiento entre edificios es bajo (menor a 30 m). A medida que el espaciamiento aumenta, se reduce dramáticamente el nivel de ruido resultante, ya que su respuesta se asemeja más a un espacio abierto (campo libre<sup>21</sup>). Estas fórmulas, corroboradas empíricamente, han tenido éxito, y se sugiere su desarrollo y manejo como una herramienta útil para la planificación de nuevas vías de circulación (Can, 2015. Lyon 1974). Actualmente, existen muchos modelos de predicción de ruido de tráfico vehicular —modelo RLS-90 (Alemania), modelo CERTU (Francia), modelo CoRTN (Gran Bretaña), modelo (STL-86 Suiza), modelo FHWA (USA).

El estudio realizado por Richard Lyon *Rol de las reflexiones múltiples y la reverberación en la propagación de ruido urbano*, resume de muy buena forma los efectos que estos elementos producen (reflexiones en un campo sonoro). Sin embargo, deja claro que **la difusión no ha sido estudiada en detalle**, a pesar de que se presume que su importancia es relevante en términos de distribuir y prolongar espacialmente el campo sonoro de una fuente, con el

---

<sup>17</sup> Descriptores de ruido: Son indicadores de nivel de ruido, que permiten definir sus características esenciales, Ej:  $Leq(A)$ .

<sup>18</sup>  $Leq$ : Es un descriptor que permite estudiar la historia del ruido o su tendencia a largo plazo. Representa el nivel continuo equivalente que poseería la misma energía sonora en el mismo intervalo de tiempo T, que el ruido actual.

<sup>19</sup> Clima de ruido: Diferencia  $L_{10}$ - $L_{90}$ .

<sup>20</sup>  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ : Descriptores llamados percentiles, y representan a aquellos niveles de ruido que se han excedido durante un 10, 50 o 90% del período de tiempo de medida T.

<sup>21</sup> Campo Libre: Denota un espacio libre de obstáculos, donde no ocurren reflexiones. Ocurre por tanto solo sonido directo, es decir, un sonido que procede exclusivamente de la fuente sonora directamente, sin reflejarse, condición anecóica.

consiguiente aumento de la reverberación. Las técnicas empleadas en el estudio de las reflexiones han sido, por una parte, efectuar mediciones de atenuación de nivel de ruido con la distancia, corroborando que el nivel decrece más rápido en espacios abiertos que en espacios profusamente construidos.

Los software existentes permiten evaluar este factor de forma relativamente precisa, mediante la utilización de acústica de rayos (acústica de imágenes) y de reflexión especular, asociando un coeficiente de absorción en banda ancha a cada una de las fachadas de los edificios relevantes, con muy buena correlación empírica, considerando que las reflexiones ocurridas en las superficies de fachadas y calzada, producen un incremento del nivel continuo equivalente ( $L_{eq}$ ), que va desde 1 dB hasta 3,5 dB. Estas predicciones establecen los aportes en dB para cada tipo de materialidad empleada en la calzada. De estos, el adoquín aportaría el mayor incremento de nivel (4 dB), mientras el asfalto liso, el menor (-0,5 dB). Para el caso de fachadas, el aporte promedio al incremento de nivel es de 2 a 3 dB, coincidente con los resultados obtenidos en Francia. (Kang, 2007)

#### **5.2.8. Estudios de planificación urbana orientados al uso adecuado del suelo como una forma de descontaminar o reducir niveles de ruido:**

Diversos estudios consideran tanto la distribución del espacio para vías y zonas residenciales, barreras naturales de acuerdo con la topografía y morfología urbana, barreras artificiales de acuerdo con el entorno. Estos estudios son, en su mayor parte, de un conjunto de recomendaciones propuestas a los gobiernos de diversos países, tales como USA (Air Force, Army, The Navy, EPA), en Chile (MINVU, MOP), en Inglaterra, Alemania, Francia, España, Comunidad Europea y Brasil, por instituciones públicas, con el fin de tomar en cuenta criterios y medidas antes de urbanizar un sector. (Onaga, 2006. EPA, 1978. FHWA, 2011). Dentro de este grupo se encuentran

interesantes trabajos estadísticos sobre modelos de distribución de transporte por el método del trayecto mínimo. Actualmente se está utilizando la veridización de fachadas, urbanizaciones sustentables, ciudades inteligentes y una planificación urbana sostenible, en concreto las ciudades consumen altas cantidades de energía para el funcionamiento de los sistemas urbanos, (transporte), y mayor es la generación de residuos ambientales. (Echebarria, 2003).

Desde el punto de vista urbano, la mayor parte de los estudios y reportes recopilados, (Can, 2015; Lynch, 1980; Kang, 2007; Borja, 2000) realizan un análisis de elementos que puedan aportar alguna solución a casos particulares de ruido, sugiriéndose como una medida efectiva el ordenamiento territorial, control del uso del suelo y forma urbana (específicamente la utilización de zonas más o menos sensibles), dependiendo de las actividades y máximo ruido permitido, hasta llegar a zonas exclusivamente industriales,. Desde el punto de vista del control es útil, presenta la dificultad de estar relacionado más bien con la planificación del suelo, antes de generar una nueva urbanización, más que para actuar en una área consolidada. Sin embargo, como medida de redistribución de espacios, cuando se lleven a cabo nuevas urbanizaciones, modificaciones a los planes reguladores, seccionales y planes de renovación urbana, es posible tomar en consideración edificios que no sean sensibles al ruido, de carácter administrativo, oficinas, edificios de estacionamientos y utilizar para bloquear edificios cuyo uso sea exclusivamente residencial.

El espacio público toma un papel de protagonista, no solo porque diseña el trazado del espacio construido, sino también es el lugar por excelencia de la sociabilidad y del contacto que caracteriza a la ciudad. Es el espacio de la cotidianidad, del juego, de las relaciones casuales o habituales con los otros, de los recorridos a las diferentes actividades. (Borja, 2000).

### **5.2.9. Influencia de factores económicos en la correcta distribución del suelo:**

Toda solución que se implemente, particularmente bajo un criterio acústico, reviste una importancia económica. No se puede desconocer el hecho de que se hace necesaria una mejor distribución de la densidad urbana, un aprovechamiento de los espacios intraurbanos. Sin embargo, continuar utilizando suelo agrícola, (logrando extensiones de matrices, redes, vías de circulación y otros), producirá a la larga un desequilibrio ecológico y llevará a que la ciudad no pueda autoabastecerse. Una buena solución planteada es la redefinición interna de la ciudad, que conlleve la conservación de ciertas zonas.

La economía en transporte trae varias consecuencias, como la reducción de los tiempos de viajes y el mejor aprovechamiento de la jornada de trabajo debido a que las personas estarán menos cansadas. Esto puede conseguirse por medio de acercar los servicios a los usuarios, lo que exige, sin duda, mayor inversión de parte de la empresa privada y pública. Generalmente, estos costos los termina pagando el usuario, que a cambio recibe un mejor servicio y aprovecha mejor su tiempo. Por tanto, las consecuencias económicas se dejan ver cada vez que se plantea una solución, por muy simple que parezca.

La planificación urbana ha sido desplazada por el impacto político-económico que agresivamente se impone al desarrollo urbano sostenible y equilibrado de los barrios de Santiago, como una metrópoli que debiera otorgar oportunidades a sus vecinos. El deterioro de la mayoría de las comunas de la capital y sus alrededores (como Recoleta, Conchalí, Renca, Quinta Normal, San Joaquín, Cerro Navia, Estación Central o Lo Prado), tanto en infraestructura como en equipamiento y áreas verdes, como en escasez de planificación urbana y anarquía en el uso de las redes viales, las ha transformado en comunas de pequeños talleres, bodegas, galpones, garajes y pequeñas industrias contaminantes. Este uso del suelo no colabora con una economía social de

mercado, y la imagen urbana y mental que nos ofrece la ciudad es de un constante, paulatino e inexorable deterioro ambiental. (Borja, 2000)

Los costos que genera la contaminación acústica no se perciben en forma tangible, ya que el ruido es el más elusivo de los contaminantes. Sin embargo, los efectos son finalmente un costo para el país en salud, en menor rendimiento laboral, en baja plusvalía de áreas y en barrios contaminados.

#### **5.2.10. Técnicas de control de ruido tradicionales y otros estudios:**

Diferentes técnicas eficientes de control de ruido podrían aplicarse a los procesos de urbanización, pero estas se ven limitadas por el espacio físico disponible para su implementación. Sin embargo, ya se han utilizado barreras en autopistas y puntos sensibles (como colegios), pero aún existen viviendas en las que el impacto de las autopistas por el ruido y la contaminación atmosférica es mucho (por ejemplo Autopista Vespucio Sur, construida en un espacio físico reducido y en un espacio de uso comercial, industrial y residencial bastante denso en edificación y población).

¿Qué se puede esperar entonces como solución a los crecientes problemas de ruido? En Chile, pronto entrará en vigencia la norma de emisión de ruido emitido por buses de locomoción colectiva urbana y rural, (MTT, 2003) esperándose que sea una medida efectiva de control. Sin embargo, esta reducción de niveles de ruido está drásticamente limitada por el funcionamiento adecuado de los vehículos, por lo que es difícil que se logre una disminución importante de sus niveles, particularmente si consideramos que son miles las máquinas circulando diariamente. Además, con el elevado y sostenido crecimiento del parque automotriz, esta medida probablemente pase inadvertida, al menos en calles con alto flujo vehicular.

Como ejemplo, tenemos la implementación del proyecto TranSantiago, en 2007, y en cuyos primeros años se pudo apreciar claramente una baja en los niveles de ruido (tanto por la menor cantidad de máquinas en operación, mayor capacidad y eficiencia del sistema), pero al parecer, actualmente, el ruido por el mal mantenimiento de motores, carrocería y carpetas de rodado se mantiene (e incluso podría haber aumentado), a pesar de la implementación de horas valle en las que circulan menos buses/hora. Aun así, la variable más influyente es la intensidad de flujo y velocidad de flujo.

El 19 de diciembre de 2015 se publicó por parte del Ministerio del Medio Ambiente una norma de emisión de ruido para vehículos livianos, medianos y motocicletas, la que deberá entrar en vigencia 24 meses después de publicada, es decir, en diciembre de 2017. Sin embargo, los niveles permitidos para vehículos livianos de pasajeros y comerciales estarán entre 74 y 80 dB(A), lo que en presencia de otros vehículos sumados podrá permitir en una calle de alto flujo niveles de hasta 83-85 dB(A)<sub>máx.</sub>

Recientemente, se ha publicado un documento que estudia el efecto de las reflexiones difusas y accesorios dentro de las calles tipo cañón, y la predicción de la propagación sonora por el método del código de rastreo de una partícula de sonido (*Can, 2015*). En este trabajo se concluye que el impacto de la difusión por fachadas y accesorios en la atenuación del sonido dentro de cañones urbanos, es función de la geometría de la calle (ancho y alto) y parámetros acústicos (*absorción y dispersión de las fachadas*), así como de las características de la zona en estudio como función del libre camino medio. Ellos realizaron 32.175 simulaciones usando un código de rastreo de partículas SPPS, concluyendo que el impacto de los parámetros acústicos estudiados es fuertemente dependiente en el comportamiento de la atenuación del sonido, debido a las reflexiones difusas.

Este trabajo ha desarrollado un procedimiento empírico (mediciones acústicas de campo) que permite demostrar que la causa más importante generadora de campo reverberante urbano y de un incremento de los niveles de ruido en calles tipo cañón, es producto de las múltiples reflexiones, la difusión acústica producida por la geometría y morfología urbana, (por el tamaño de veredas, la arquitectura de edificios, las fachadas y su materialidad), tipología de barrios y avenidas, por los tipos de fuentes de ruido y transporte urbano.

## **6. CASOS ESTUDIOS**

Este trabajo se inició en el año 1995 y 1996, durante el proceso de tesis para optar al grado de magister en urbanismo, documento que no fue defendido. Se ha rescatado el caso estudio de aquella época, lo que contrastado con las mediciones de campo actuales, que se ilustran a continuación, por la relevancia del tiempo y la historia que conlleva contar con datos de hace más de 20 años, permite ver la evolución del ruido y del fenómeno de difusión en el tiempo.

La actualización se realizó en tres fases: mediciones el año 1996, toma de mediciones en 2016, y maquetas virtuales, a través de software Soundplan v7.2 y EASE v4.1. Los datos son relacionados entre sí, obteniendo gráficos, curvas, análisis y discusión de resultados.

## 6.1 Caso estudio 1, AÑO 1996

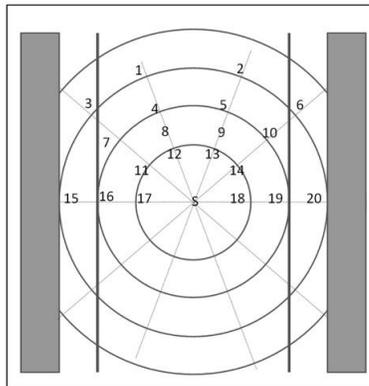
### 6.1.1. Procedimiento para la realización de mediciones

En el año 1996 se utilizó un método que permitió medir la respuesta energética y temporal en distintas direcciones. Las mediciones se llevaron a cabo bajo el siguiente esquema:

- a) Selección de equipamiento para toma de muestras y generación de ruido.
- b) Elección de un espacio urbano consolidado, calles “U” y “L”.
- c) Utilización de descriptores de ruido, determinan las variables a medir.

Se elaboró un patrón para toma de muestras de ruido, como una forma representativa de relacionar y registrar el campo sonoro de una calle.

El procedimiento fue medir primero en campo libre el  $L_p$  de una fuente sonora. Luego, se utilizó la misma fuente para medir *in situ* el  $L_p$ , a lo largo y ancho de los espacios escogidos, de acuerdo con un patrón de mediciones (Figura 23), acercándonos y alejándonos de las paredes de edificios.



**Figura 23. Patrón referencial de puntos a medir, alrededor de una fuente omnidireccional. (Fuente: elaboración propia).**

En forma previa, se mide ruido de fondo, luego tiempo de reverberación en ambos costados de la calle, ubicando siempre la fuente en el

centro. Con las mediciones se establecen contornos isobáricos. Para minimizar los efectos de este tipo de ruido, se realizan las mediciones en día domingo en la mañana, horario en que hay menor tráfico vehicular y peatonal.

### **6.1.2. Descriptores de ruido:**

- Ruido de fondo<sup>22</sup>:  $L_{eq}$  [dB(A)]
- Tiempo de reverberación: T60 (seg.)
- Nivel de presión sonora:  $L_p$  en dB(A)

Establecer dimensiones físicas y geometría. Implica determinar el espacio a estudiar, su tamaño, y todas las medidas que tengan relación con la arquitectura del lugar y su materialidad.

- Ancho calle
- Altura edificios
- Forma
- Largo calle
- Existencia de elementos de fachadas.

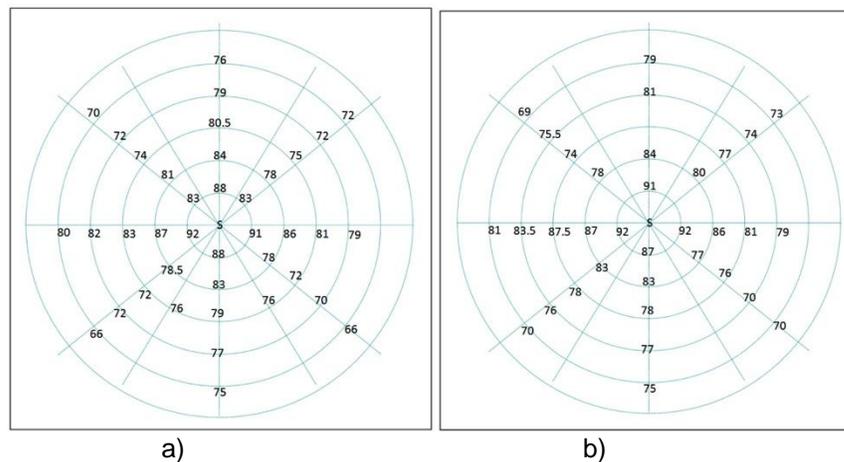
### **6.1.3. Descripción de la fuente de ruido**

Del ruido generado por flujo vehicular, se obtuvo un análisis espectral de una grabación del ruido emitido por un microbús, que fue previamente filtrada por curva A. Este muestra lo que el oído humano percibe preferentemente, por lo que se aprecia que la molestia principal se encuentra en las frecuencias medias. Esto conlleva a escoger una fuente de ruido que mantenga estas características de radiación espectral, es decir, cuya energía se concentre entre las bandas de 200 Hz y 6,3 kHz, con una tolerancia de +/- 3 dB.

---

<sup>22</sup> Ruido de fondo: Es aquel que se percibe en un lugar, y que procede del exterior. En el caso de un espacio urbano, se considera el ruido existente en el lugar bajo estudio, sin que existan fuentes en ese mismo lugar.

Se dispuso de una fuente sonora, considerada patrón para el procedimiento de medición empleado, que consistió en generar ruido rosa<sup>23</sup> a 100 dB(A), con cuatro parlantes de alta direccionalidad, orientados en cuatro ejes direccionales simétricos, con un ángulo de cobertura de 80 grados y una sensibilidad de 90 dB a 1 m. La respuesta de la fuente se midió en el parque O'Higgins, para verificar la atenuación por distancia en condición semianecóica así correlacionar los datos en condiciones de campo reverberante, (calle tipo U).



**Figura 24. Ambiente semianecóico (suelo con pasto). Todas las medidas en dB(A). (Elaboración propia).**

#### 6.1.4. Descripción del lugar de medición

Se procede a medir en día domingo, en horario 7.30 a 10.30 de la mañana. Se escoge las calles Teatinos y Huérfanos, principalmente por ser calles donde se da una combinación de situaciones que sirven de claro ejemplo para caracterizar las reflexiones especulares y difusas en un espacio en términos de ruido. Los elementos de la arquitectura de estas calles se distinguen claramente y son: marquesinas, ubicadas en torno a segundo y tercer piso, edificios de gran altura en ciertos tramos, sectores en L y en U, entrantes en edificios, diversidad de materiales (grandes ventanales, frontones de hormigón, otros), gran presencia de mobiliario urbano y mucha locomoción colectiva.

<sup>23</sup> Ruido rosa: Señal de ruido patrón de igual energía en todo el espectro de frecuencia.

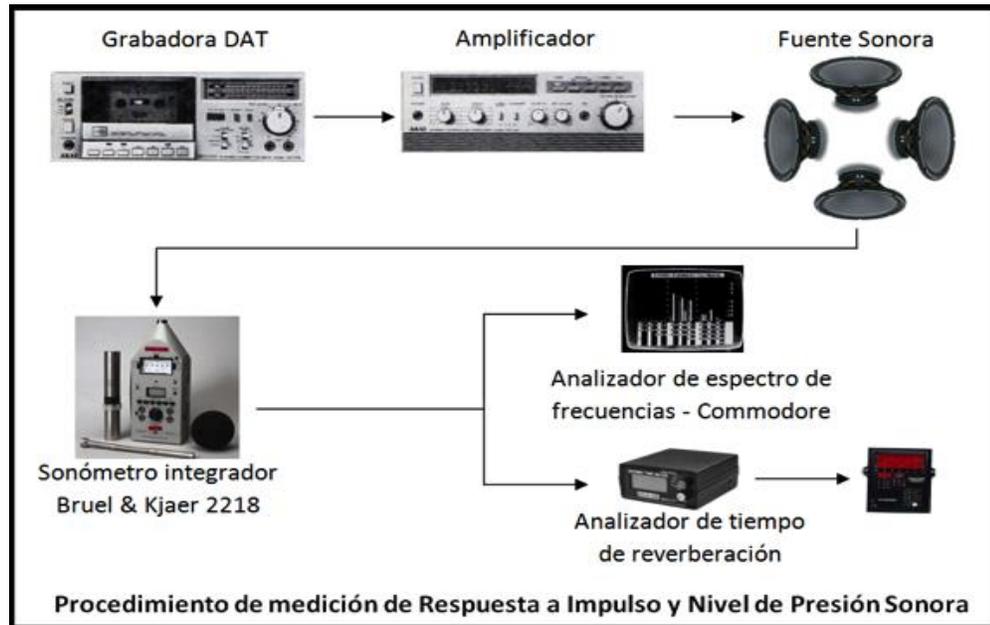


Figura 25. Parque O'Higgins, medición de fuente en campo semianecóico. Huérfanos, fachada con textura (1996). Calle en U y L, Teatinos. (Huaquín, 1996-2016)

### 6.1.5. Equipamiento empleado.

La figura 26, muestra el diagrama en bloque del equipamiento utilizado en las mediciones.

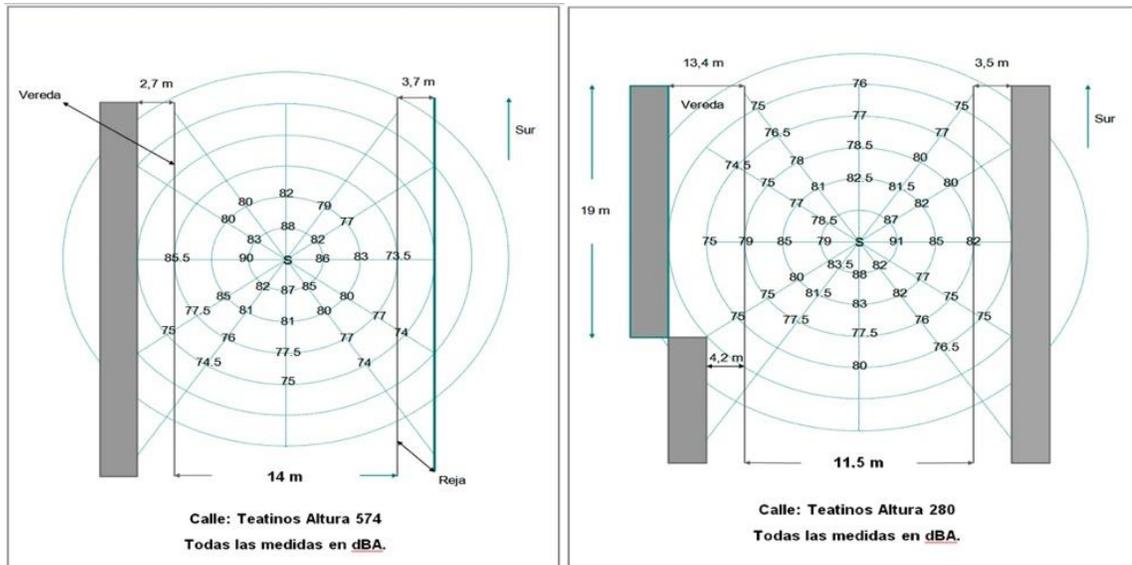
- Sonómetro de precisión Brüel & Kjaer modelo 2218.
- Calibrador B&k 4230.
- Medidor de tiempo de reverberación digital, por bandas de octava.
- Amplificador de potencia de 80 Watts.
- Cuatro parlantes Phillips de 50 W tipo *driver*.
- DAT, grabadora de audio digital.



**Figura 26. Diagrama en bloque del equipamiento usado, año 1996. Elaboración propia.**

El sistema se calibra cada vez que se efectúa una nueva medición. Para las muestras de análisis espectral se utiliza un sistema analizador de espectro en tiempo real Goldline DSCPI, por bandas de 1/3 de octava. Además, se utilizó un sistema DAT portátil para registrar el decaimiento de nivel, y tiempo de reverberación. El micrófono se encontraba a una altura de 1,5 metros sobre el nivel del suelo. El nivel de presión de referencia utilizado fue de 100 dBA a 1 metro de distancia de la fuente. Las circunferencias concéntricas tienen radios cuya diferencia es 4 metros, a partir de la posición central de la fuente.

### 6.1.6. Resultados de las mediciones:



a)

b)

Figura 27 a) Calle Teatinos altura 280; b) Calle Teatinos altura 574. Medidas en dB(A).  
(Fuente: elaboración propia)

### 6.1.7. Análisis de tiempo de reverberación

La siguiente tabla de mediciones de tiempo de reverberación se obtuvo por medio del análisis de una grabación digital de ruido impulsivo generado en cada lugar de medición anterior.

Medición	T60 (seg)						obs.
	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz	
1	2,12	3,23	2,93	2,70	3,58	2,74	p.1
2	3,02	2,95	3,03	2,91	3,23	2,89	p.2
3	2,74	3,46	3,04	2,90	2,62	3,13	p.3
4	2,57	3,03	3,14	2,86	2,73	3,23	p.4

Tabla 1. Tiempo de reverberación calles Teatinos y Huérfanos, año 1996.

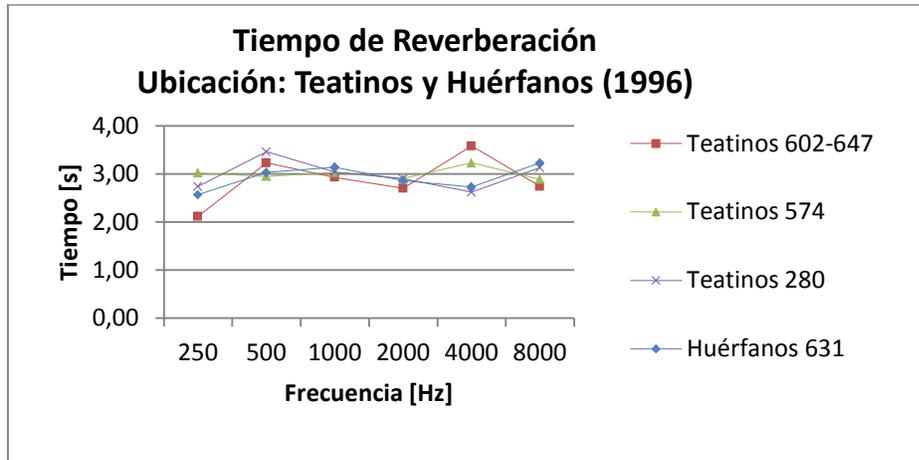


Figura 28. Gráfico Tiempo de Reverberación calles Teatinos y Huérfanos, año 1996.

La diferencia de niveles observada en la calle tipo U, con respecto al ambiente semianecóico son entre 2 y 3 decibeles a medida que se dobla la distancia. Se puede apreciar que los tiempos superan en su mayoría el valor 2,5 a 3,0 segundos. Esto es bastante largo, con respecto a una condición semianecóica donde los tiempos son más cortos, en la mayoría de los casos 1 segundo. A modo de ejemplo, un tiempo de reverberación promedio de 1,6 segundos corresponde a un recinto cerrado como el Carnegie Hall de Nueva York, cuya capacidad es de 2.800 personas, con un volumen de 24.300 metros cúbicos. Si traducimos este volumen a dimensiones, podríamos decir que corresponde a una sala de 40x40x15 metros aproximadamente. Tomando el ancho de una calle como un valor 15 metros, cubriendo una distancia equivalente a 40 metros a lo largo de la calle, tendríamos edificios de 40 metros de altura. Esto corresponde aproximadamente a un edificio de 16 pisos.

Esta comparación se ha hecho pensando en el volumen de aire equivalente que pueda producir un tiempo de reverberación similar, sin tomar en cuenta la absorción total. Luego, se logran tiempos altos en espacios abiertos, ya sea por volumen de aire semiencerrado o por falta de absorción en los

materiales del suelo y las fachadas. Indudablemente que esto último es un elemento que se debe considerar para controlar y aminorar esta prolongación innecesaria de sonidos.

## **6.2. Caso estudio 2, AÑO 2016**

En esta ocasión, se repitieron las mediciones desde el punto de vista energético en condiciones ideales y el efecto de la fachada continua, es decir, se midió la atenuación y aumento de nivel por efecto de las reflexiones difusas, así como el tiempo de reverberación, fenómeno temporal que ocurre al medir con una fuente impulsiva, la prolongación que el sonido reflejado produce en las calles tipo cañón.

Se midió en día domingo nuevamente para evitar ruidos e interferencia de tráfico vehicular. Se genera un ruido patrón (ruido rosa) de 100 decibeles, de manera de excitar acústicamente la calle elegida y recuperar la respuesta del ruido residual con reflexiones, de diferentes puntos en la vereda.

### **6.2.1. Equipamiento empleado.**

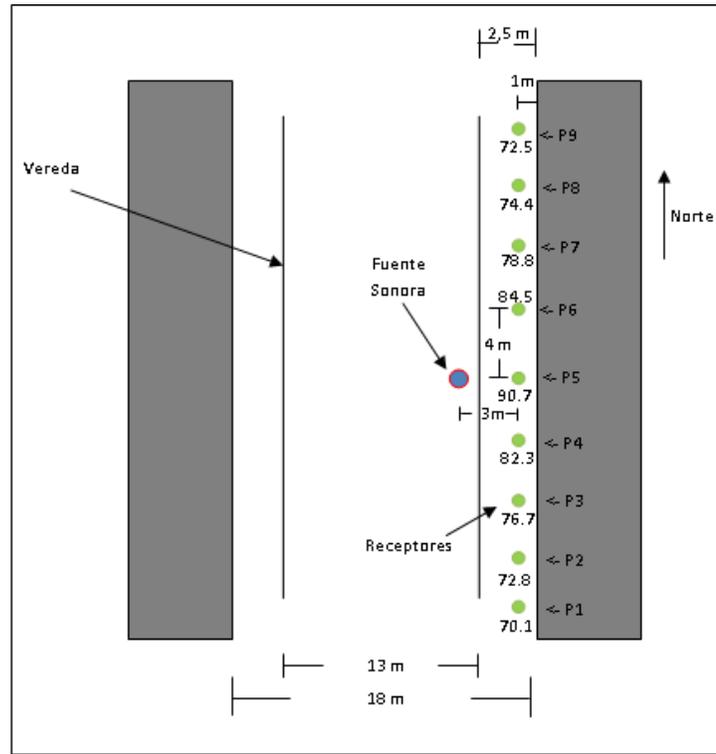
La figura 29, muestra el diagrama en bloque del equipamiento empleado en las mediciones.

- Pistola de salva.
- Sonómetro integrador Larson Davis modelo 824.
- Calibrador Larson Davis modelo CAL200.
- Micrófono condensador Behringer ECM8000.
- Grabadora portátil digital Tascam DR-680.
- Computador portátil.



**Figura 29. Diagrama en bloque de equipamiento utilizado, año 2016.**  
(Fuente: elaboración propia)

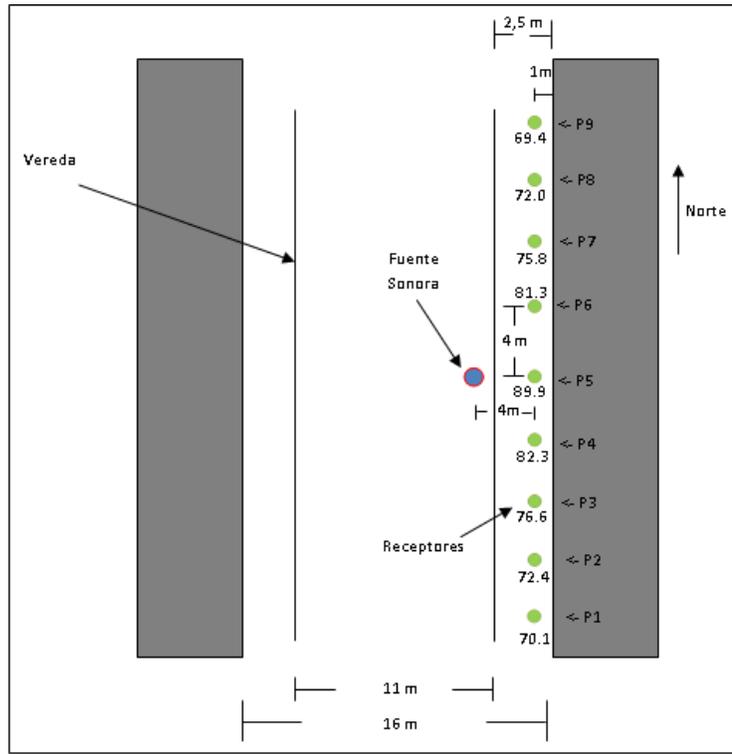
Las mediciones se realizaron en la calle Teatinos y Cerro El Plomo, (Figuras, 30 y 31), se utilizó una modalidad diferente de capturar los datos (respecto año 1996); la fuente en la mitad de la calle, pero midiendo a lo largo de la vereda, obteniendo puntos y valores cada 4 metros. Esta modalidad nos permitió evaluar la atenuación por distancia de la fuente y el efecto a nivel de reflexiones regulares desde un punto de vista superficial, a diferencia del método anterior en que se tomaron las muestras de la calle desde una perspectiva de distancias concéntricas desde la fuente. Posteriormente, se midió en calles tipo L y con amplias veredas, luego con fachadas verdes y materialidad combinada, absorción en veredas y fachadas, textura con elementos vidriados, con forma difusora piramidal. (Figura 31).



**Figura 30. Medición de Nivel de presión sonora (Leq). Calle Teatinos 600, (Fuente: elaboración propia)**

Ubicación: Teatinos (Medición en terreno – Año 2016)				
Receptor	Distancia Fuente-Receptor [m]	Distancia primera reflexión [m]	Leq dB(A)	Lmáx dB(A)
P1	16,28	16,76	70,1	74,3
P2	12,37	13	72,8	73,4
P3	8,54	9,44	76,7	76,9
P4	5	6,4	82,3	83,3
P5	3	5	90,7	91,0
P6	5	6,4	84,5	85,5
P7	8,84	9,44	78,8	80,1
P8	12,37	13	74,4	75,3
P9	16,28	16,76	72,5	73,2

**Tabla 2. Niveles de Presión Sonora, calle Teatinos N° 600, (Elaboración propia)**



**Figura 31. Medición de Nivel de Presión Sonora (Leq). Calle San Antonio.  
(Elaboración propia)**

Ubicación: San Antonio (Medición en terreno – Año 2016)				
Receptor	Distancia Fuente-Receptor [m]	Distancia Primera Reflexión [m]	Leq dB(A)	Lmáx dB(A)
P1	16,49	17,09	70,1	72,1
P2	12,65	13,42	72,4	73,4
P3	8,94	10	76,6	79,6
P4	5,66	7,13	82,3	83,3
P5	4	6	89,9	90,4
P6	5,66	7,13	81,3	83,0
P7	8,94	10	75,8	76,2
P8	12,65	13,41	72,0	72,5
P9	16,49	17,09	69,4	70,9

**Tabla 3. Niveles Presión Sonora, calle San Antonio. (Elaboración propia)**

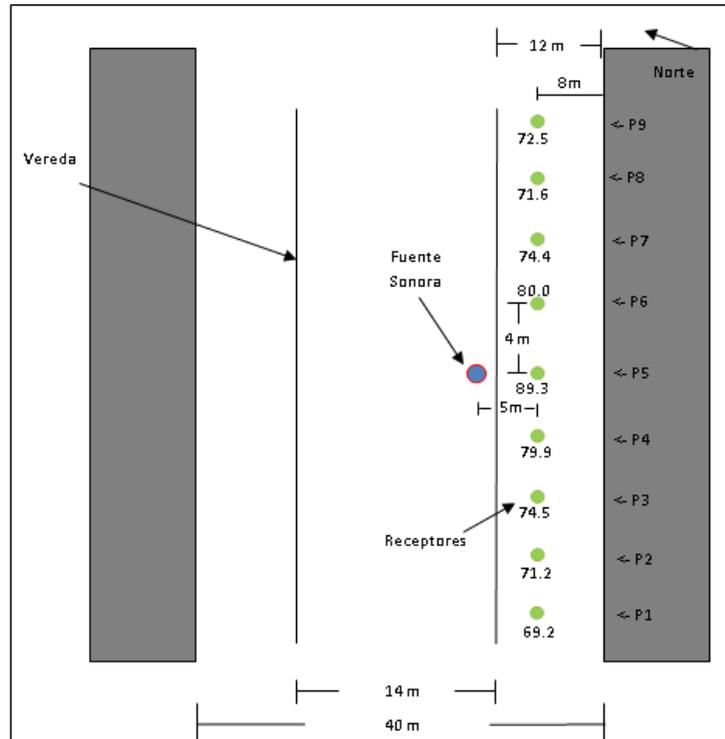


Figura 32. Medición de Nivel de presión sonora ( $L_{eq}$ ).Cerro El Plomo.

(Fuente: elaboración propia).

Ubicación: Cerro El Plomo (Medición en terreno – Año 2016)				
Receptor	Distancia Fuente-Receptor [m]	Distancia Primera Reflexión [m]	$L_{eq}$ dB(A)	$L_{máx}$ dB(A)
P1	16,62	26,51	69,2	70,8
P2	13,42	24,25	71,2	72,4
P3	9,18	22,51	74,5	74,8
P4	6,40	21,36	79,9	80,5
P5	5	21,0	89,3	89,5
P6	6,40	21,36	80,0	80,6
P7	9,18	22,51	74,4	75,7
P8	13,42	24,25	71,6	73,0
P9	16,62	26,51	69,0	70,5

Tabla 4. Niveles de presión sonora calle Cerro El Plomo. (Fuente: elaboración propia).

### 6.2.2. Resultados de Mediciones de nivel tablas y gráficos:

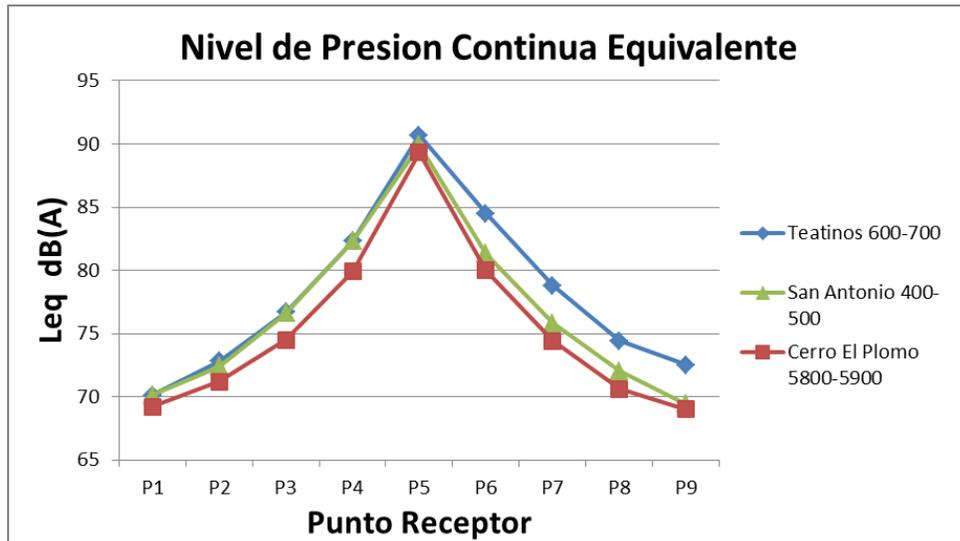


Figura 33. Resultado Mediciones de Nivel de presión sonora (Leq).  
Teatinos, Cerro El Plomo, San Antonio. (Elaboración propia).

En la Figura 33, se observa que la diferencia de niveles entre calles tipo cañón (Teatinos, San Antonio), y calle con fachada con textura y verberización, (Cerro El Plomo), es de 2 a 4 decibeles.



Figura 34. Calle Teatinos, y Cerro el plomo. (Huaquín, 2016)

### 6.2.3. Tiempo de reverberación, calle Teatinos 635

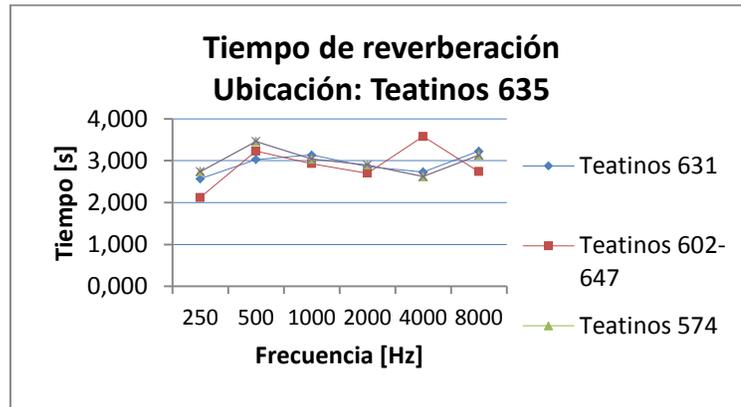


Figura 34. Tiempos de reverberación medidos en Teatinos, diferentes alturas. (Elaboración propia).

Los resultados de los tiempos de reverberación medidos en calle teatinos en diferentes puntos son de 3 seg aproximadamente. (Figura 34).

A continuación se comparan los tiempos de reverberación medidos con los obtenidos mediante el software de modelación EASE v4.1. En la simulación se consideró hormigón como material de fachadas de los edificios.

T30 [s] – Medición		T30 [s] – EASE	
Frecuencia [Hz]	[s]	Frecuencia [Hz]	[s]
125	1,453	125	2,300
250	1,658	250	2,300
500	2,195	500	2,250
1000	2,122	1000	2,220
2000	1,822	2000	2,120
4000	1,458	4000	1,720
8000	0,840	8000	1,080

Tabla 5. T30 medición y T30 modelación en EASE v4.1.(Fuente: elaboración propia)

## 6.2.4 Comparación energética y T60

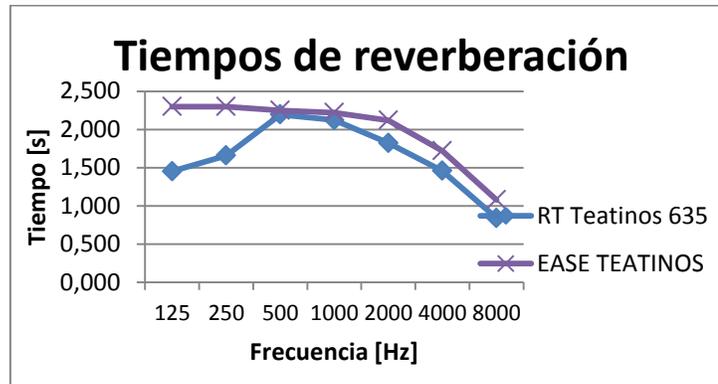


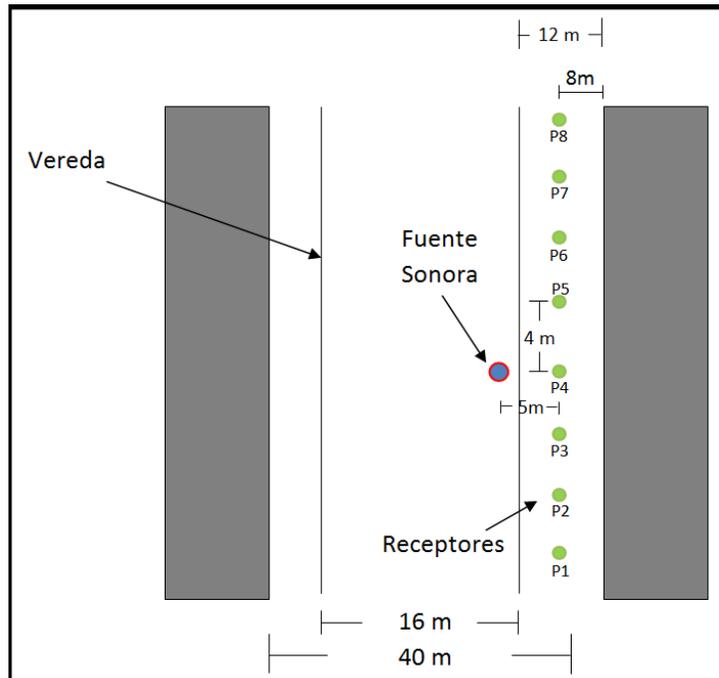
Figura 36. Comparación tiempo de reverberación medido y modelado en software EASE. (Fuente: elaboración propia).



Figura 37. Edificios con textura en fachada, forma piramidal, calles en “U”, Cerro el Plomo. Avda. Isidora Goyenechea. (Huaquín, 2016).

## 6.3. Acústica virtual

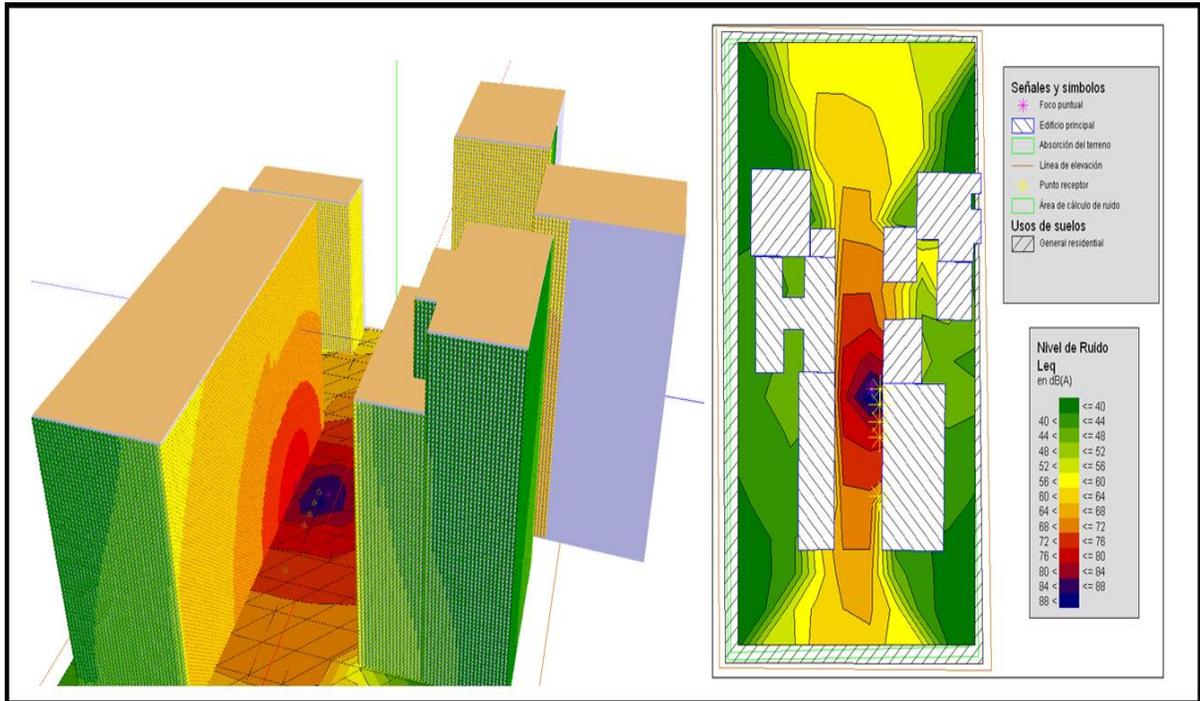
Se realizaron dos modelos de propagación a través de distintos software computacionales, para evaluar el efecto de la configuración de fachadas lisas y con textura. Para ambos casos se utilizó el posicionamiento de la fuente y la distancia entre puntos, como se muestra en la (Figura 38).



**Figura 38. Distribución de receptores en software de modelación EASE v4.1.  
(Fuente: elaboración propia)**

Donde la distancia de la fuente a la fachada es 13 metros, la distancia de la fuente al punto central son 5 metros y la distancia entre puntos es de 4 metros.

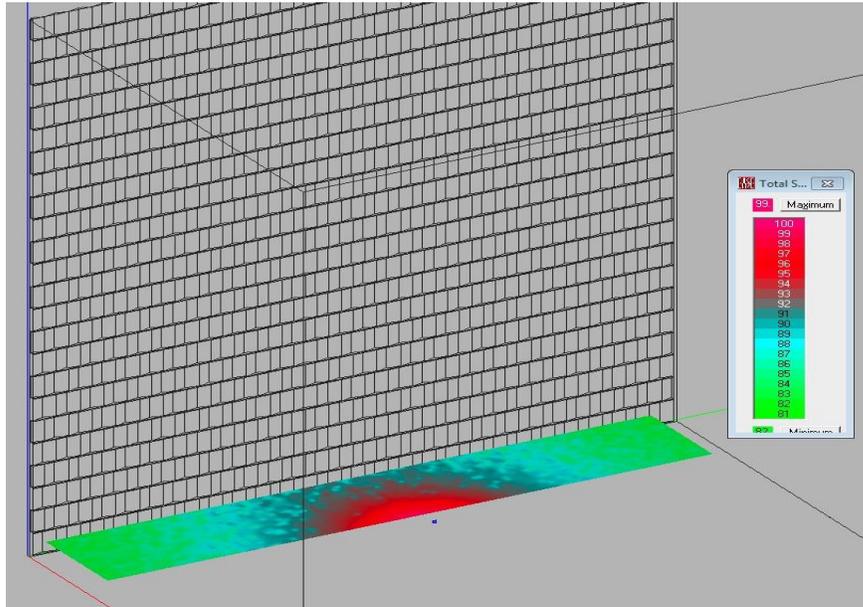
De los resultados obtenidos con el software SoundPlan v7.2 es posible indicar que para el ensayo de ambos tipos de fachada no existen mayores diferencias de nivel de presión sonora entre los puntos modelados. Esto se debe mayormente a que dicho software no permite caracterizar una fachada, dándole propiedades de mayor o menor difusión. Al menos, utilizando la variable de pérdida por reflexión, no se aprecian diferencias considerables.



**Figura 39. Mapa de ruido, modelación software Soundplan v7.2.  
(Fuente: elaboración propia).**

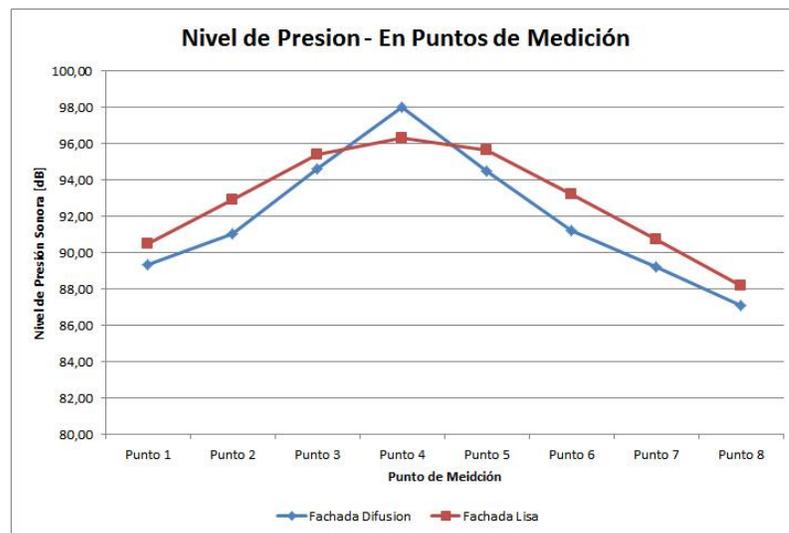
La Figura 39, nos permite observar el modelo realizado en el software SoundPlan v7.2, en el cual se ilustran las diferencias de nivel de presión sonora al interior de una calle de tipo cañón, pero sin el componente de reflexiones de sus fachadas.

En el segundo caso, se realizó el mismo ejercicio mediante el software EASE v4.1, el cual nos permite diseñar una fachada con elementos curvos para simular una fachada difusa, “con textura”. Además, nos permite incorporar las propiedades de absorción y dispersión a cada una de las superficies utilizadas en el software. La fuente y los puntos de evaluación se tomaron de la misma forma que en el software anterior.



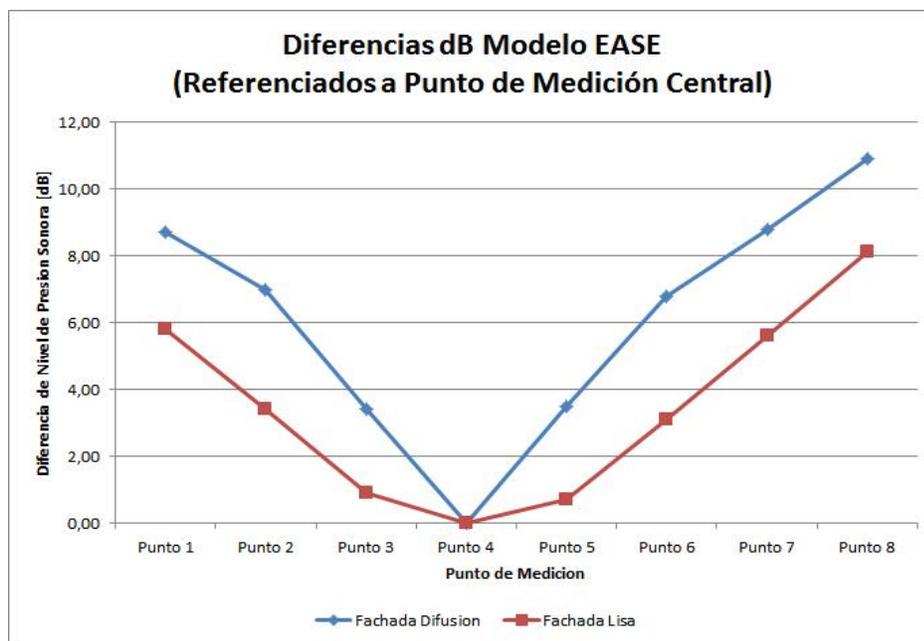
**Figura 40. Nivel de Presión Sonora total, aplicada a una fachada con textura.**  
(Fuente. Elaboración propia).

Se realizaron dos ensayos (fachada difusa y lisa), (Figura 40), que entregaron resultados diferentes, debido a que el software sí considera las reflexiones que se producen al interior de la simulación de este tipo de calle tipo cañón. Los niveles de presión sonora obtenidos en cada caso fueron los siguientes. (Figura 41)



**Figura 41. Resultados nivel de presión en puntos de modelación.**  
(Fuente: elaboración propia)

Normalizando los datos de ambos ensayos al valor del punto central de medición, con el fin de evaluar las diferencias hacia los puntos laterales, se observa que, para el ensayo de la fachada difusa, (respecto a la fachada lisa) la atenuación es de 2,5 a 3 decibeles entre ellas. Esto implica una menor disminución del nivel de presión sonora en una calle tipo cañón con materialidades de fachada (vidrio y hormigón con textura) que con fachadas difusas (Figura 42). Por lo tanto, esto corrobora los resultados de los estudios de (Can, 2015). Así, también se confirman las mediciones del año 1996 y los de 2016 en las mediciones de campo.



**Figura 42. Diferencias entre 2,5 a 3, entre fachada lisa y con textura, modelo EASE. (Fuente: elaboración propia)**

## 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se pudo demostrar que en las mediciones del año 1996, en relación con la situación de campo libre, el nivel de presión decae a 77 dB(A) en calle Teatinos, recién después de recorridos 24 metros de distancia respecto a la fuente. En cambio, al aire libre (campo semianecoico), se logra este mismo nivel a 16 metros de distancia de la fuente. En primera instancia, esto nos conduce a inferir que en una calle con edificios de gran altura, la energía sonora decae más lentamente, prologándose el ruido en el espacio urbano.

Los niveles en el primer ejemplo presentan cierta uniformidad. Particularmente dentro del radio de los 16 a 20 metros, donde las diferencias de nivel de presión caen en el rango de 2 a 3 dB. Esto es bastante significativo, puesto que los niveles, en vez de decaer, se mantienen prácticamente estables con la distancia. Si pensamos que la situación real de calles, con alto flujo vehicular, formándose una fuente línea, es de esperar que se produzcan niveles altos y muy estables producto de lentos decaimientos de energía producidos por campo reverberante que se superpone al sonido original de la fuente, aumentando y prolongando estos niveles.

Es interesante observar que a lo largo de la vereda, es decir, en línea recta por el centro de la misma, se cumple que la atenuación de nivel con la distancia es entre 3 y 4 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente. Se puede observar además que el decaimiento de nivel es menor mientras más angosta es la calle y/o más altos son los edificios. Particularmente, en la Figura 33, se puede observar, consecuentemente, la atenuación por distancia de la fuente línea.

Esto significa que los materiales presentes en las fachadas de los edificios actualmente (vidrio, grandes muros de hormigón, elementos metálicos) no juegan un rol relevante en términos de absorción, porque la mayoría son

altamente reflectantes, contribuyendo a la prolongación sonora en el tiempo y al incremento del nivel de presión total. Esta situación podría mejorar si la combinación de materiales arrojara un coeficiente de absorción promedio mayor.

Finalmente, las calles en L favorecen enormemente la amplitud espacial, logrando niveles muy por debajo de los producidos en calles en U. Evidentemente, el efecto sobre el campo sonoro resultante se aprecia en el segundo caso, donde los niveles en el costado sin edificios son bastante menores que con ellos (más de 5 dB de diferencia).

## 8. CONCLUSIONES

El campo reverberante urbano, como se ha demostrado, es el causante de importantes contribuciones de nivel sonoro y de la prolongación innecesaria de ruidos molestos. Producido por la combinación de espacios semicerrados (como calles tipo U y de baja absorción superficial, es decir, con paredes duras y lisas). Mientras más encajonada sea la calle, mayor será el campo reverberante urbano resultante; mientras más duro el material, mayor será su capacidad de reflejar sonido.

Incorporar criterios acústicos al diseño urbano no es una cuestión de que la acústica deba estar presente por un aforismo, sino por la urgente necesidad de reducir los niveles de contaminación de nuestras ciudades. Las fuentes están llegando a sus límites de reducción de niveles, la aislación de los edificios y su diseño interior contribuyen a evitar los efectos nocivos sobre las personas, pero cuando estamos en contacto con la ciudad, no hay protección para las personas sino la reducción de los posibles agentes contaminantes.

Queda demostrado teóricamente en los estudios de casos, que el ruido residual es un componente del espacio urbano, y que es posible de controlar aplicando los factores urbanos relacionados, a través, de los instrumentos de planificación como planes de renovación, ordenanzas municipales, y la planificación urbana, ofreciendo la oportunidad de generar veredas, plazas, con un confort acústico ambiental necesario para los usuarios de estos espacios.

La demostración teórica y de los casos estudios, indican que un sonido en campo libre se atenúa más rápidamente que en campo reverberante, (condición de una calle encajonada y su diferencia a cortas distancias). Su magnitud llega a ser 3 a 4 decibeles más intensa, ofreciéndonos la oportunidad

de reducir ese valor. Esto, aplicado a la percepción de los peatones significa una reducción mayor a un 30 por ciento de su magnitud.

La tendencia de las acciones para reducir los ruidos en la Comunidad Europea ha sido la incorporación de mapas de ruido como instrumentos de planificación territorial, (existentes en Chile). Recientemente se ha instalado medidores de nivel de presión sonora en calles de Alicante en España, como una forma de obtener la información del ruido en tiempo real, medida muy importante y utilizada en Chile a nivel experimental en los años 90, pero aún son medidas que colaboran a nivel de diagnóstico, frente a acciones concretas como el uso de normativa y otras medidas asociadas a un vínculo real con el hacer ciudad y la planificación urbana.

La incorporación de medidas concretas, tales como el manejo de la forma urbana, orientación de los volúmenes o materialidades del suelo, fachadas, transporte colectivo eléctrico y la planificación urbana, son posibles de estudiar y modelar. En estudios de difusión acústica urbana recientes, se demostró que los difusores aportan una reducción al ruido residual. Su aplicación efectiva será motivo de futuras investigaciones.

La incorporación de los usuarios de los espacios públicos, como parte de los tomadores de decisiones a través de estudios estadísticos y medidas de control, son fundamentales. En el futuro una planificación urbana que contemple factores acústicos, a través de un Plano Regulador (u otro Instrumento de Planificación Territorial), con la necesaria metodología interdisciplinaria, incluyendo a los usuarios a través de encuestas, estudiando y calificando las políticas urbanas a las escalas que corresponda, podrá utilizar nuevas tecnologías de diseño urbano, acústica activa, tecnología en neumáticos, pavimentos porosos más silenciosos y otros medios de transporte amigables con el medio ambiente.

## 9. BIBLIOGRAFIA

Bertrand M. (1998) Las Escalas Visuales en el Urbanismo. *Presentación y comentario crítico de las tesis Blumenfeld*. documento UR 381.

Blumenfeld H. (1979). *Metropolis and Beyond*, John Wiley & Sons, USA.

Borja, J. & Muxi, Z. (2000). *El Espacio Público: Ciudad y Ciudadanía*. Barcelona (España). Electa.

Can, A., Fortin, N. & Picaut, J. (2015). *Accounting for the effect of diffuse reflections and fittings within street canyons, on the sound propagation predicted by ray tracing codes*, Ifsttar, Ame, Lae Lunam, Université. BP 92101, 44321, France.

CEA, (2015), Ruido y audífonos. [www.ceasanvicente.com](http://www.ceasanvicente.com)

Constitución Política de Chile. (1980).Cap. III, Art. 19.8°.

Costabal, H. & Seballos, S. (Nov. 1984). Estudio comparativo del entorno acústico y la agudeza auditiva en un hábitat urbano y rural. *3er. Encuentro Nacional Universitario sobre Medio Ambiente*. USACH, Santiago.

Crocker, M. (2007). *Handbook of noise and vibration control*, John Wiley & Sons, Inc.

Department of the Air Force, The Army and the Navy (1978). *Planning in the Noise Environment*, EPA, USA.

Echebarría, M. & Aguado, I. (2003). La planificación urbana sostenible. *Universidad del País Vasco. BIBLID* [1137-439X, 24; 643-660].

Everest, A. & Pohlman, K. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. Mc. Graw-Hill. USA.

Galetovic, A. (2006). *SANTIAGO dónde estamos y hacia dónde vamos*. Centro de estudios Públicos. ISBN 956-7015-39-2.

Harrys, C.M. & Weisler, R.L. (1977). *Manual para el control de Ruido I, II*, Universidad de Columbia. Edit. Mc Graw Hill. USA.

Highway Traffic Noise (2011). *Analysis and Abatement Guidance FHWA-HEP-10-025*, USA.

INE. (2013). Informe anual de vehículos motorizados. Ministerio de Economía. Chile.

INE, (2015). Productos estadísticos, demográficos vitales. Ministerio de Economía. Chile.

Jakab, Z. (31-03-2011). La OMS alerta de las enfermedades ligadas al ruido en las ciudades. El País On-Line. Madrid. Recuperado de: [http://sociedad.elpais.com/sociedad/2011/03/31/actualidad/1301522407\\_850215.html](http://sociedad.elpais.com/sociedad/2011/03/31/actualidad/1301522407_850215.html)

Kang, J. (2016). *Soundscape and the Built Environment*, Editado por Jian Kang & Brigitte Schulte-Fortkamp. Taylor & Francis Group, LLC, USA.

Kuttruff, H. (1982). A mathematical model for noise propagation between buildings. *Journal of Sound and Vibration. Institut fur Technische Akustik der Rheinisch Westfilischen Technischen Hochschule, Aachen, Germany*. 85(l), 115-128.

Kuttruff, H. (1991). *Room Acoustics*, Institut für Technische Akustik, Technischen Hochschule, Aachen, Germany.

Lambert, J. Kail, JM. y Quinet E. (1998). "Transportation noise annoyance: and economic Issue", Sydney-Australia 22-26. *Noise effects*.

López M., E. (2005). Destrucción creativa y explotación de brecha de renta: Discutiendo la renovación urbana del peri-centro sur poniente de Santiago de Chile entre 1990 y 2005. Depto. de Urbanismo, Universidad de Chile. Recuperado de: [http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/101.htm#\\_edn1](http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/101.htm#_edn1).

Lynch, K. (1980). *La Planificación del Sitio*. Gustavo Gili.

Lyon, R. (1974). Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation. *Journal, Acoustical Society of America*, Vol. 55 N°3.10.60;50.75, 50.80; 55.35.

Malchaire, J. & Horstman, S. (1974). Urban Noise Model. *Université Catholique De Louvain, Belgium. Kettering Laboratory of Cincinnati Ohio*. 50.50, 50.75.

Matas, J.C. (Oct 1, 1979). El Perfil Ambiental, Eure N°22. 57. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*.

Ministerio del Medio Ambiente. Sección de Control de Ruido Ambiental (2010 – 2014). *Estrategia para Gestión del Control de Ruido Ambiental*. Departamento de Asuntos Atmosféricos, División de Políticas y Regulación Ambiental, MMA, Gobierno de Chile.

Ministerio Secretaria General de la Presidencia MINSEGPRES, (1994), Ley 19.300, Ley de Bases del Medio Ambiente. Gobierno de Chile.

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, MTT, (2003), D.S. N° 129/02, Del “*Norma de Emisión de Ruido para Buses de Locomoción Colectiva Urbana y Rural*”. D.O. 07, de Febrero de 2003. Gobierno de Chile.

Möser, M. & Barros, J. (2004). *Ingeniería Acústica Teoría y Aplicaciones*, Berlín, ISBN 3-00-014278-9.

Organización Mundial de la Salud, (1976), 29ª Asamblea Mundial de la Salud. Bibliothéque OMS, A29/8.

Onaga Hirochi, H. & Rindel, J. (18 Abril 2006). Acoustic characteristics of Urban Streets in relation to scattering caused by building facades. *Applied Acoustics*. 0003-682x.

Parodi, G. (1983). Contaminación en los Centros Urbanos, FAU, Universidad de Chile.

Picaut, J. Hossam H Eldien; & Billon, A. (2010). An experimental study of the use of acoustic diffusers to reduce noise in Urban Areas. France, Dammam University, Kindom of Saudi Arabia; University of Liège, Belgium. *Acta Acústica*. Vol. 95, p. 653–668.

PNDU (2014). Resumen de la Política Nacional de Desarrollo Urbano. Recuperado de <http://cndu.gob.cl/>.

Ramírez González, A., Domínguez Calle, E. (2011). El ruido vehicular urbano: Problemática agobiante de los países en vías de desarrollo, *Rev. acad. colomb. cienc. exact. fis. nat.* vol.35 no.137. Bogotá, Colombia.

Secretaria Interministerial de Planificación de Transporte. SECTRA (2015). Encuesta anual de vehículos en circulación. MTT, Gobierno de Chile.

Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente SESMA, (2001), Estudio base de generación de niveles de ruido del Gran Santiago, *MMA.gob.cl/1304/articles-52016\_Capitulo\_4.pdf*.

Stryjenski, J. (1967). *L'acoustique appliquée à l'urbanisme*. Les Éditions Techniques, Genève. Francia.

Stryjenski, J. (1983). La propagación del sonido vista por un Arquitecto, *Urba* 206. Francia.

Trieb, M.(1972). Objetivos del Diseño Urbano, *Stadbauwelt* N° 35.