



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil Acústica

Profesor Patrocinante  
Jorge Arenas B., Ph.D.  
Instituto de Acústica  
Universidad Austral de Chile

## *Cuantificación del Impacto Acústico de las Plantas de Proceso en el Sistema de Monitoreo Continuo de Ruido de Enap Refinerías S.A., Refinería Bío-Bío.*

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al título profesional de Ingeniero Civil Acústico.

**JOAQUÍN MARCELO STEVENS CASTRO**  
**VALDIVIA – CHILE**  
**2008**

## **Agradecimientos**

*A mis papás...*

*A David y Vicente...*

*Al Willy y sus historias...*

*A los amigos y las buenas conversas...*

*A Miles Davis...*

*Al Centro de Alumnos de Ingeniería Civil Acústica 2006...*

*A Enap Refinerías S.A....*

*A Freddy Guzmán...*

*Al Instituto de Acústica...*

*A Jorge Arenas...*

*A Brasil...*

*A Valdivia...*

*A Carolina y su infinita energía...*

*Gracias por ayudarme en mi formación universitaria.*

... *“Como una Onda Sonora en Campo Libre”*.

## **Resumen**

Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo de predicción de las emisiones sonoras de la Refinería Bío-Bío de Enap Refinerías S.A. Usando los estándares ISO9613-2 y CONCAWE se estima el impacto acústico de las plantas de proceso en el sistema de monitoreo continuo de ruido de la Empresa. La potencia sonora se estima a través de una campaña de medición mediante el estándar ISO8297 y, adicionalmente, se incorpora una corrección por efectos meteorológicos la cual cuantifica los efectos del gradiente de temperatura atmosférico y el vector viento, datos obtenidos de la torre meteorológica de la Empresa. Para validar el modelo, se comparan los resultados modelados con la información real entregada por el sistema de monitoreo.

## **Summary**

This work shows the development of a model to predict the sound propagation at the Oil Refinery Enap Bío-Bío. The acoustic impact by the process plants, measured by a continuous noise monitoring system available at the plant is estimated by means of ISO9613-2 and CONCAWE standards. On the other hand, sound power levels have been estimated by ISO8297 standard in a measurement campaign. In addition, meteorological effect corrections have been considered. These corrections estimate the effects on the sound prediction method of both atmospheric temperature gradient and wind-vector. These data are obtained from the plant's meteorological station. Finally, the simulated results are compared with the data obtained from the monitoring system for validating the model.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS. ....</b>	<b>12</b>
2.1. GENERAL.....	12
2.2. ESPECÍFICOS. ....	12
<b>3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
3.1. RUIDO URBANO.....	13
3.2. RUIDO INDUSTRIAL. ....	16
3.3. PROPAGACIÓN DEL RUIDO EN EXTERIORES. ....	17
3.3.1. <i>Fuentes Puntuales</i> .....	17
3.3.2. <i>Divergencia geométrica</i> . ....	18
3.3.3. <i>Absorción del aire</i> . ....	19
3.3.4. <i>Topografía del suelo</i> .....	20
3.3.5. <i>Difracción</i> .....	21
3.3.5.1. <i>Barreras</i> .....	22
3.3.6. <i>Refracción</i> .....	24
3.3.6.1. <i>Efecto de la temperatura</i> . ....	24
3.3.6.2. <i>Efecto del viento</i> . ....	26
3.4. PREDICCIÓN DEL NIVEL SONORO.....	27
3.4.1. <i>Normativa de referencia</i> .....	28
3.4.1.1. ISO 9613-1:1993 (1993).....	28
3.4.1.2. ISO 9613-2:1996 (1996).....	29
3.4.1.3. Conservation of Clear Air and Water in Europe (CONCAWE) (1981).....	29
3.4.1.4. ISO 8297:1994 (1994).....	30
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>31</b>
4.1. DISEÑO DE PROYECTO. ....	31
4.2. CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE POTENCIA SONORA. ....	36
4.2.1. <i>Normativa de referencia</i> .....	36

4.2.2. Contorno de medición. ....	40
4.2.3. Periodo de estudio. ....	42
4.2.4. Intervalo de medición. ....	42
4.2.5. Instrumentación. ....	43
4.2.6. Condiciones ambientales. ....	44
4.2.7. Ruido de fondo. ....	44
4.2.8. Procedimiento. ....	45
4.2.9. Resultados. ....	46
4.2.10. Conclusiones. ....	49
4.3. ALGORITMO DE POSICIÓN. ....	50
4.3.1. Generación. ....	50
4.3.2. Análisis de error. ....	52
4.3.3. Resultados. ....	54
4.3.4. Conclusiones. ....	56
4.4. SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO DE RUIDO. ....	57
4.5. ALGORITMO DE PREDICCIÓN. ....	58
4.5.1. Resultados. ....	63
4.5.1.1. Niveles sonoros proyectados. ....	64
4.5.1.2. Atenuación Atmosférica $A_{atm}$ ....	67
4.5.1.3. Atenuación por efectos del suelo $A_{gr}$ ....	68
4.5.1.4. Atenuación por propagación en sitios industriales $A_{site}$ ....	69
4.5.1.5. Corrección meteorológica $K_4(C_{me16})$ ....	70
4.5.1.6. Atenuación total. ....	72
4.5.2. Conclusiones. ....	73
4.5.2.1. Monitor maestranza. ....	73
4.5.2.2. Monitor 4 Sur. ....	74
4.5.2.3. Monitor 7 Sur. ....	75
<b>5. CORRELACIÓN. ....</b>	<b>77</b>
5.1. RESULTADOS. ....	78

<b>6. CONCLUSIONES FINALES.....</b>	<b>79</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>80</b>
<b>8. ANEXOS. ....</b>	<b>83</b>
8.1. GENERACIÓN CCR. ....	83
8.2. ANÁLISIS DE ERROR CCR. ....	89
8.3. ALGORITMO DE PREDICCIÓN. ....	92

## 1. INTRODUCCIÓN.

Enap Refinerías S.A., la Empresa Nacional del Petróleo fue creada el 19 de junio de 1950 por el Estado de Chile. Su giro comercial es la exploración, producción y comercialización de hidrocarburos y sus derivados, lo cual realiza tanto en Chile como en el extranjero, constituyendo una red de negocios en el campo del petróleo, el gas natural y otros productos energéticos como el gas natural licuado y la geotermia.

Enap realiza actividades de exploración y producción de petróleo crudo y gas natural (*upstream*), y de refinación y logística de combustibles y otros productos derivados del petróleo (*downstream*). Con una larga y rica experiencia en este negocio, también entrega servicios ligados con la industria petrolera, tales como construcción y mantenimiento de la infraestructura petrolera, tanto en tierra como en mar; y logística para transporte y almacenamiento de combustibles líquidos y gaseosos.

Las refinerías de Enap, Aconcagua, Bío-Bío y Gregorio, procesan 230.000 barriles diarios de petróleo y producen 13 millones de metros cúbicos de combustibles al año. Estas refinerías abastecen aproximadamente el 85% de los combustibles que consume Chile y exporta productos refinados a países de Centro y Sudamérica.

Enap aplica un *código de conducta responsable* en todas las áreas de su gestión, con el fin de incorporar, en cada una de ellas, el desafío del crecimiento con responsabilidad social empresarial (RSE). En este contexto, realiza importantes contribuciones a la sociedad, entre las que distinguen su obligación primaria de realizar aportes al Estado, la inversión de recursos para el mejoramiento de la calidad de los combustibles y para la minimización del impacto ambiental de sus operaciones, además de un conjunto de programas de extensión social y comunitaria.

En Enap, el concepto de *responsabilidad social* se ha centrado en un mejor y pro activo desempeño frente al medio ambiente y en contribuir al desarrollo social y cultural de

la comunidad nacional y las comunidades regionales y locales donde se insertan sus filiales, ya sea en Chile o en el exterior.

En el plano del monitoreo ambiental de sus instalaciones, las cuales abarcan emisiones líquidas (efluentes líquidos), emisiones sólidas y emisiones a la atmósfera, destaca el seguimiento de las emisiones sonoras de la Refinería Bío-Bío. La Empresa cuenta con un Sistema de Monitoreo Continuo de Ruido (SMCR), compuesto por 3 estaciones fijas (de ahora en adelante, *monitores de ruido*), el cual entrega información constante para todo el año laboral, permitiendo estimar el impacto acústico hacia la población El Triángulo (ver figura 1), comuna de Hualpén, Región del Bío-Bío, cumpliendo de este modo con la normativa chilena vigente [3, 8].



**Figura 1.** Vista aérea de la Refinería Bío-Bío Enap Refinerías S.A.

El registro de las emisiones de ruido ha permitido desarrollar dos importantes trabajos de titulación de Ingeniería Acústica de la Universidad Austral de Chile [3, 19], estableciendo un estándar de trabajo para la Empresa.

Siguiendo una línea de desarrollo y tomando como punto de partida dichos trabajos, es de interés para la Empresa el estimar la composición del ruido medido por el sistema de monitoreo, de manera de detectar mejoras y ventajas en términos de gestión ambiental.

Así, el Proyecto en cuestión considera el desarrollo de un modelo de predicción de las emisiones sonoras de la Refinería Bío-Bío, caracterizando el impacto acústico de las instalaciones de proceso en el SMCR.

## **2. OBJETIVOS.**

### 2.1. General.

- Desarrollar un modelo de predicción de las emisiones sonoras de la Refinería Bío-Bío de Enap Refinerías S.A., el cual permita cuantificar el impacto acústico de las instalaciones de proceso en el SMCR.

### 2.2. Específicos.

- Desarrollar una metodología para la campaña de medición de potencia sonora mediante ISO8297.
- Determinar el centro acústico de las plantas de proceso a través de medición y el desarrollo de una rutina computacional en MATLAB®7.
- Estimar el impacto acústico de las plantas de proceso en el SMCR. a través de ISO9613-2 – CONCAWE y el desarrollo de una rutina computacional en MATLAB®7
- Determinar la efectividad del modelo de predicción mediante la correlación de los resultados obtenidos con el registro del SMCR para un intervalo específico de jornada laboral.

### **3. MARCO TEÓRICO.**

#### *3.1. Ruido urbano.*

El ruido no sólo es un problema en los países industrializados, sino también en muchos que se encuentran en vías de desarrollo, especialmente debido al progreso tecnológico, urbanización e incremento del tráfico vehicular, ferroviario y aéreo. En las últimas décadas, cada vez más países en todo el mundo han reconocido que la lucha activa contra el ruido es necesaria, incrementándose el número de naciones en establecer regulaciones para evaluar y gestionar el ruido urbano [3].

Así también, la preocupación mundial por el medio ambiente, y la importancia que se le ha dado a la variable ambiental en el intercambio comercial, ha llevado a los gobiernos a dar mayor interés por todo tipo de contaminación, y entre ellas, la contaminación acústica [1].

El ruido es una molestia que afecta a un gran número de personas en los sectores urbanos e influye negativamente en su bienestar físico y mental. Por ejemplo, a niveles de presión sonora de 65 dBA, el descanso de las personas se ve seriamente perturbado produciendo en la mayoría de ellas una gran molestia. En algunos países de la Unión Europea del 20% al 25% de las personas siente molestia por el ruido de tráfico vehicular, del 2% al 15% por el ruido de tráfico aéreo, y del 2% al 4% por el ruido de tráfico de los trenes. Por ello, no debe sorprender que la molestia producida por el ruido urbano se haya expandido en la ciudadanía, como también, sus efectos y consecuencias a largo plazo en la salud. Está claro que el ruido urbano es un problema real de salud ambiental [2].

En las ciudades puede existir un gran número de fuentes de ruido. Estas incluyen el ruido de las industrias, comercio, construcciones, obras públicas, máquinas, radios y televisores, sistemas de aire acondicionado e incluso animales [2].

Desde el año 1980, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha tratado con especial énfasis el problema del ruido urbano. Las pautas elaboradas por esta institución, basadas en el efecto sobre la salud de las personas, pueden servir como la base para elaborar normas de ruido dentro del marco de la gestión del control de ruido ambiental. Para estos fines, la OMS sugiere elaborar modelos de predicción que sirvan para determinar la acción sobre la fuente emisora, fijar los niveles de las fuentes existentes y futuras, valorar la exposición al ruido, y comprobar la conformidad de la exposición al ruido con estándares respectivos [1].

Así también, el control de la contaminación acústica debe enfrentarse por medio del desarrollo de guías o normativas, de la identificación de la exposición de las personas al ruido, de la realización de mapas de ruido y de la monitorización de las fuentes de ruido comunitario [1].

En la Unión Europea existen varias iniciativas que son destacables, sin embargo, la principal es el *Libro Verde de la Comisión Europea – Política Futura de Lucha Contra el Ruido* [4]. Este documento inicia su texto reconociendo el ruido ambiental como uno de los principales problemas medioambientales en Europa, y como el responsable de un número cada vez mayor de quejas por parte de la población. Se reconoce que en general, las acciones destinadas a reducir el ruido ambiental han sido menos prioritarias que las destinadas a combatir otros tipos de contaminación, como por ejemplo, la contaminación atmosférica o la contaminación hídrica [1].

En el caso latinoamericano, la mayor parte de la contaminación acústica en las ciudades proviene del tráfico, de las industrias, de situaciones domésticas y de la comunidad en general. El aumento en la potencia automotriz y la falta de silenciadores adecuados, elevan los niveles de ruido en las calles sobre los 70 dB [1].

Chile no escapa a esta situación. En mediciones realizadas por el Instituto de Acústica de la Universidad Austral de Chile en la ciudad de Temuco [7], con

aproximadamente 300.000 habitantes, se detectaron varios sectores con niveles de ruido que en el día sobrepasan los 65 dBA, y en la noche los 55 dBA [2].

Así también, en un estudio realizado en Santiago por Collados en el año 2000 [6], el cual abarcó una superficie de 322 km<sup>2</sup> y una población total de 2,81 millones de habitantes, lo que representa un 54% de la población de Santiago, se observó que un 36% de la población muestreada está expuesta a niveles de ruido en el día por sobre los 65 dBA [2].

Estudios similares se han desarrollado en otras ciudades del país. Tal es el caso de Talcahuano (1997) [8], Iquique (2000) [7], Valparaíso (2000) [7] y Castro (2005) [9]. Esto demuestra una preocupación creciente en la caracterización del ruido urbano por parte de municipalidades y gobierno.

A pesar de que se ha sugerido que la contaminación por ruido es primordialmente un problema lujoso para los países desarrollados, no se puede ignorar que la exposición al ruido de las personas es mayor en países en desarrollo debido a la mala planificación urbanística y baja calidad en las construcciones de las viviendas [2, 6]. Sin embargo, no dejan de ser preocupante los costos que para la sociedad significa la polución por ruido, especialmente el producido por el transporte. Algunos estudios estiman que este costo fluctúa en un rango que va desde el 0,2% al 2% del producto interno bruto (PIB) [4]. Si se utiliza la estimación más baja, en Chile podría alcanzar un valor cercano a los US\$ 120.000.000 [2].

A largo plazo, la planificación territorial es una de las formas más eficientes de reducción del ruido ambiental, pudiendo ser utilizada para evitar que surjan problemas futuros. La reducción a través de la planificación territorial puede incluir la restricción de la utilización de los suelos donde ya se han observado altos niveles, y la restricción de instalación de nuevas fuentes, tales como carreteras o instalaciones industriales, con el objeto de proteger los progresos existentes y fomentar la agrupación de actividades generadoras, preservando de este modo las zonas con bajos niveles [4].

### *3.2. Ruido industrial.*

Usualmente las fuentes emisoras de ruido urbano se clasifican en dos grandes grupos, fuentes fijas y fuentes móviles. La fuente fija es aquella que es diseñada para operar en un lugar fijo o determinado [17] e incluye actividades generadoras tales como terminales de carga y de transporte. Las fuentes móviles son aquellas que corresponden a transporte o que se desplazan en un medio de transporte [2].

Dentro de las fuentes fijas se puede hacer una clasificación de acuerdo a ruido de máquinas y plantas industriales, de construcciones y obras públicas, ruido emitido por servicios de edificaciones, ruido doméstico y de actividades de esparcimiento [2].

La industria mecanizada crea un serio problema, exponiendo a una parte significativa de la población trabajadora a niveles de presión sonora potencialmente perjudiciales. Ella es responsable de emitir altos niveles tanto en el interior de sus plantas como en sus alrededores. De hecho, en los países industrializados se estima que entre el 15 y 20% de la población trabajadora está expuesta a niveles de presión sonora entre 75 y 85 dBA [2].

Los niveles de ruido emitidos están generalmente relacionados con la potencia sonora de la instalación y con otros parámetros pertinentes en términos acústicos. Según la naturaleza del proceso productivo de la actividad industrial, el ruido procedente de estas fuentes puede ser constante durante ciertos periodos de tiempo, fluctuar considerablemente en intervalos temporales más extensos o aumentar en determinados instantes [3, 4, 5].

El ruido emitido por complejos industriales es generado desde un arreglo de fuentes puntuales, lineales y superficiales distribuidas espacialmente sobre las superficies de las instalaciones pertenecientes a dicho perímetro, siendo su propagación generalmente de forma esférica a una distancia igual al doble de la mayor dimensión del área que encierra los focos emisores considerados [3, 4, 5].

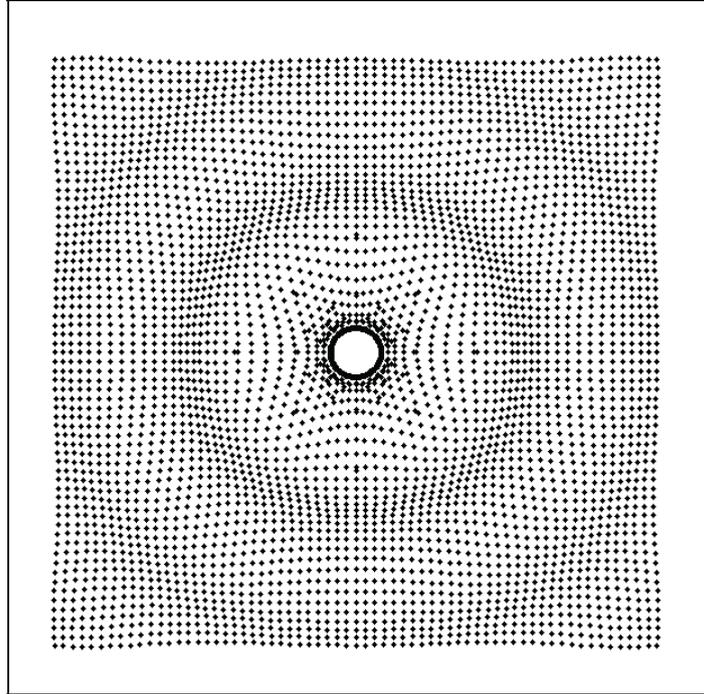
### 3.3. Propagación del ruido en exteriores.

La energía generada por las fuentes sonoras sufre atenuación al propagarse en el aire libre. Esta propagación es afectada por la atenuación a lo largo del camino de transmisión y es estimada a través de correcciones aditivas para la divergencia geométrica, absorción del aire, efecto de vegetación, efecto de topografía del suelo, barreras, reflexiones y difracción en las propias instalaciones industriales [10].

Además, existen otros factores que pueden afectar significativamente la propagación del sonido en la atmósfera. Los efectos meteorológicos del viento, humedad relativa y temperatura del aire alteran la dirección de la onda, la turbulencia la distorsiona, y la viscosidad causa absorción. Este último efecto es mucho mayor para las frecuencias altas que en las bajas, así la atmósfera tiende a actuar como un filtro. Además, la mayor parte de las mediciones son hechas casi al nivel del suelo donde la gente vive y trabaja. Por lo tanto, el estudio de la reflexión y absorción del suelo entre fuente y receptor es muy importante cuando se estudia la transmisión del sonido en campo libre [12].

#### 3.3.1. Fuentes Puntuales.

Las fuentes de ruido tienen diferentes formas. Las máquinas pequeñas son consideradas como fuentes puntuales, el tráfico en carreteras como fuentes en línea, y las fachadas de los edificios como fuentes de superficie. Sin embargo, las fuentes de ruido pueden considerarse como fuentes puntuales simples si sus dimensiones físicas son pequeñas comparadas con la distancia al receptor. Muchas fuentes de ruido comunes, incluyendo las fuentes de ruido industrial, normalmente son tratadas de esta manera. Como se observa en la figura 2, la fuente puntual ideal produce frentes de onda esféricos resultantes de *pulsaciones sucesivas* [10, 11]. La figura 2 muestra como la energía sonora se expande del mismo modo en todas direcciones. A medida que la onda viaja más allá de la fuente, su energía es recibida en un área esférica aumentada.



**Figura 2.** Campo sonoro de una fuente puntual.

### 3.3.2. Divergencia geométrica.

La divergencia geométrica se relaciona con la distribución de la energía sonora emitida por una fuente puntual en superficies esféricas cada vez mayores, según avanza el frente de onda. Esta distribución produce que la intensidad sonora en los puntos del medio, disminuya a mayor distancia de la fuente. De esta forma, para una fuente puntual en un medio homogéneo e isotrópico, se cumple que la intensidad sonora en un punto de una superficie esférica de radio  $r$ , corresponde a:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}. \quad (3.1)$$

donde,  $W$  es la potencia sonora de la fuente puntual. A partir de esta expresión se obtiene que al duplicar la distancia entre fuente y receptor, la intensidad se atenúa en 6 dB para condición de campo lejano; situación análoga para la presión sonora [18].

### 3.3.3. Absorción del aire.

Como el aire no es un medio perfectamente elástico, durante las sucesivas compresiones y rarefacciones, ocurren varios procesos irreversibles y complejos de absorción sonora, los cuales dependen de la frecuencia ( $f$ , en Hz). La absorción sonora en el aire estático e isotrópico es causada por dos procesos. El primero, es el resultado de las combinaciones de los efectos de viscosidad y de conducción de calor durante un ciclo de presión. La atenuación debida a este proceso, llamada absorción clásica, puede ser calculada a través de las Leyes de Kirchhoff. Gill [10] presentó la expresión para el coeficiente de atenuación por absorción clásica en el aire a 20°C en dB/m, como:

$$\alpha_1 = 1,2 \times 10^{10} f^2. \quad (3.2)$$

El segundo efecto de la absorción atmosférica es conocido como relajación molecular y ocurre por la disipación de energía durante el proceso de relajación vibratoria de las moléculas de oxígeno. El proceso depende de la humedad, la temperatura y la presión. Para temperaturas del aire entre  $\pm 10^\circ\text{C}$ , la absorción por relajación molecular, en dB/m, puede ser calculada por:

$$\alpha_2 \cong \frac{7,4 \times 10^{-8} f^2}{u(1 + 4 \times 10^{-6} f \Delta t)}, \quad (3.3)$$

donde,  $\Delta t$  es la diferencia de temperatura relativa a 20°C y  $u$  es la humedad relativa en %. Por lo tanto, la absorción total del aire está dada por:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2. \quad (3.4)$$

En los trabajos más completos sobre la absorción en el aire, también se consideran los efectos de relajación molecular del nitrógeno en el aire. Las ecuaciones presentadas no consideran este efecto, y por lo tanto, son aproximaciones [10].

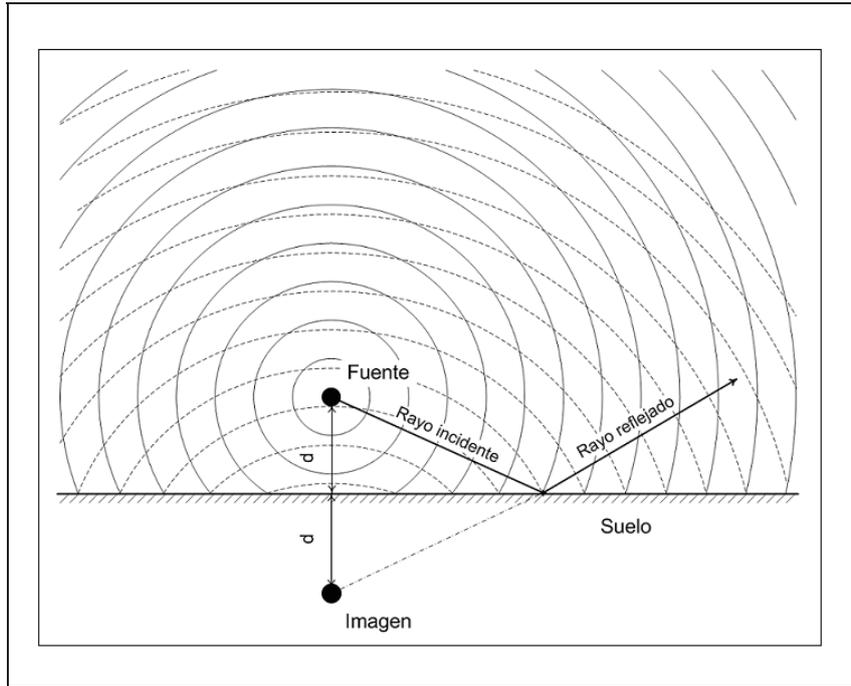
Un método estandarizado para el cálculo de la absorción sonora se presenta en la norma *ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere* [13].

#### 3.3.4. Topografía del suelo.

Cuando las ondas de sonido se ponen en contacto con una superficie, parte de la energía es reflejada, parte es transmitida a través de ella y parte es absorbida. Si la superficie es relativamente plana y acústicamente dura, la mayor parte de la energía es reflejada, y puede considerarse que la superficie refleja el sonido de la misma manera como un espejo refleja la luz. Como las ondas de sonido son vibraciones de presión oscilante en la atmósfera, la onda reflejada y directa pueden reforzarse o cancelarse entre sí por efectos de fase y geometría, produciendo problemas para realizar mediciones en las cercanías, por ejemplo, del suelo [12]. En la figura 3 se observa este principio simple. Una situación similar se presenta para el caso de reflexión en superficies verticales, tales como muros o edificios, existiendo correcciones a la hora de efectuar mediciones en sus cercanías.

El efecto de atenuación producto de la topografía del suelo, es diferente para suelo acústicamente duro (concreto o agua), suave (pasto, hierba o vegetación) y superficies mixtas, caracterizándose de acuerdo a un *factor de tipo de suelo* [15]. La atenuación por efectos del suelo es calculada en bandas de frecuencia tomando en consideración el tipo de suelo existente en el camino de propagación fuente – receptor [12, 15].

Las precipitaciones pueden afectar la atenuación por efectos del suelo. La nieve, por ejemplo, entrega una atenuación sonora considerable, causando incluso un alto gradiente de temperatura. Existen normativas que regulan las mediciones en este tipo de condiciones [5].



**Figura 3.** Efecto de la topografía del suelo en la propagación del sonido.

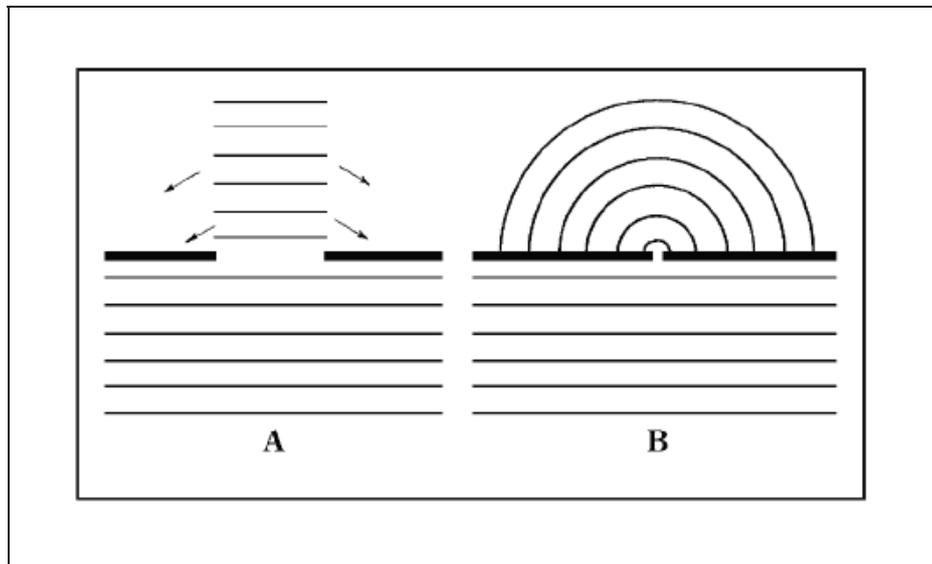
### 3.3.5. Difracción.

Cuando un frente de onda encuentra un obstáculo, parte de la onda es desviada de su curso original. Los obstáculos que se encuentran en el camino de propagación fuente – receptor, además de absorber, pueden reflejar o *difractar* la energía sonora.

La efectividad con que un obstáculo es capaz de difractar, esto es, cambiar las propiedades de dirección del frente sonoro, se determina de acuerdo a la relación entre la longitud de onda ( $\lambda$ , en metros) y las dimensiones del objeto.

El efecto de difracción para una superficie con abertura se muestra en la figura 4. En el caso A, aberturas grandes en términos de  $\lambda$  permiten al frente de onda pasar con poca perturbación. Si la abertura es pequeña en comparación con  $\lambda$ , los frentes de onda que penetran en el agujero actúan casi como fuentes puntuales, generando un campo sonoro

semiesférico en la zona posterior a la superficie (caso *B*). En la práctica, situaciones de este tipo se encuentran en la propagación de sonido a través de sitios industriales.



**Figura 4.** Efecto de difracción en el frente de onda [18].

#### 3.3.5.1. Barreras.

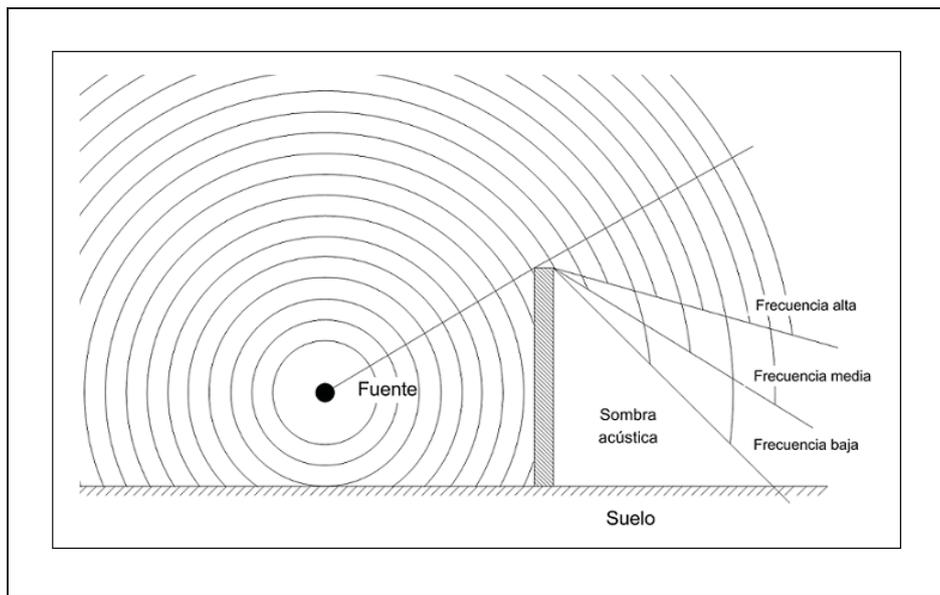
Las barreras son usadas para la atenuación del ruido de tráfico causado por el flujo de vehículos, maquinas en faenas de construcción, y maquinaria asociada a complejos industriales. También se utilizan en ambientes internos para separar sectores ruidosos.

La presencia de una barrera o divisor, crea un apantallamiento el cual bloquea la línea recta de visión entre fuente y receptor, causando atenuación por difracción en el borde superior. La zona de *sombra acústica* es mayor para barreras altas y en frecuencias altas (ver figura 5).

La atenuación depende de la altura, de la posición de la barrera y de  $\lambda$ . Estas variables son incorporadas en el número de Fresnel ( $N$ ), dado por:

$$N = \frac{A+B-C}{\lambda/2}, \quad (3.5)$$

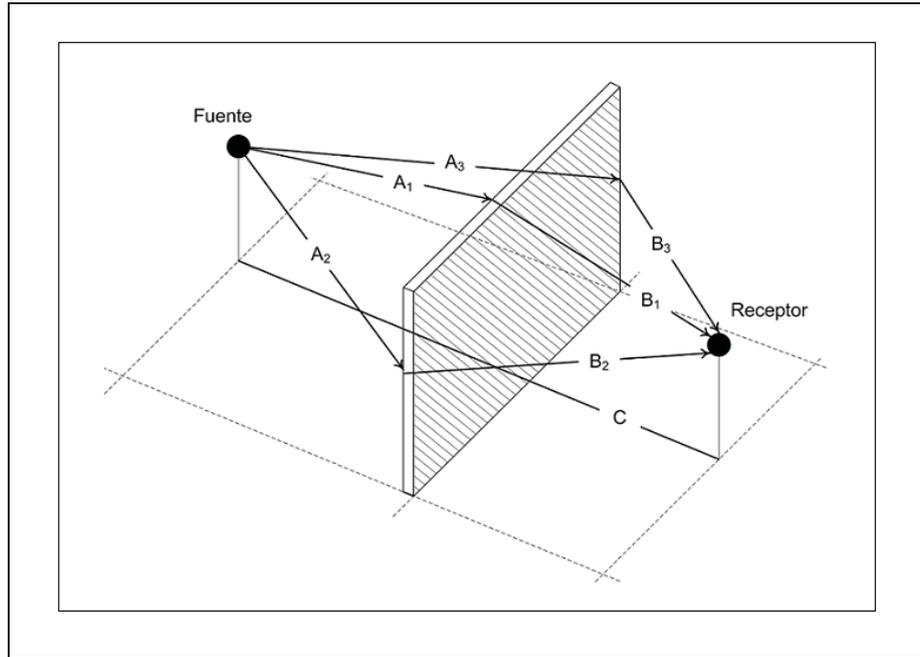
donde,  $A$  es la distancia desde la fuente al borde superior de la barrera,  $B$  es la distancia desde el receptor hasta el borde superior de la barrera y  $C$  es la distancia entre fuente y receptor.



**Figura 5.** Barrera acústica.

Para el caso práctico de una barrera finita, las ondas sonoras se *curvan por difracción* no sólo debido al borde superior de la barrera, sino también por los 2 bordes laterales, disminuyendo la atenuación (ver figura 6).

El efecto adicional de reflexión sonora en el piso, puede ser calculado usando la teoría de fuente-imagen y de interferencia. En este caso, la superficie es reemplazada por la imagen de la fuente y una imagen ficticia de la barrera, simétricas e idénticas a ambas, de manera similar a lo observado para los efectos de la topografía del suelo en el punto 3.3.4 [10].



**Figura 6.** Difracción en una barrera finita.

### 3.3.6. Refracción.

La refracción provoca cambios en la dirección de viaje del frente de onda por diferencias en la *velocidad de propagación* del medio, las cuales están relacionadas con las variaciones de temperatura en la atmósfera y la influencia del vector viento ( $\mathbf{v}$ ).

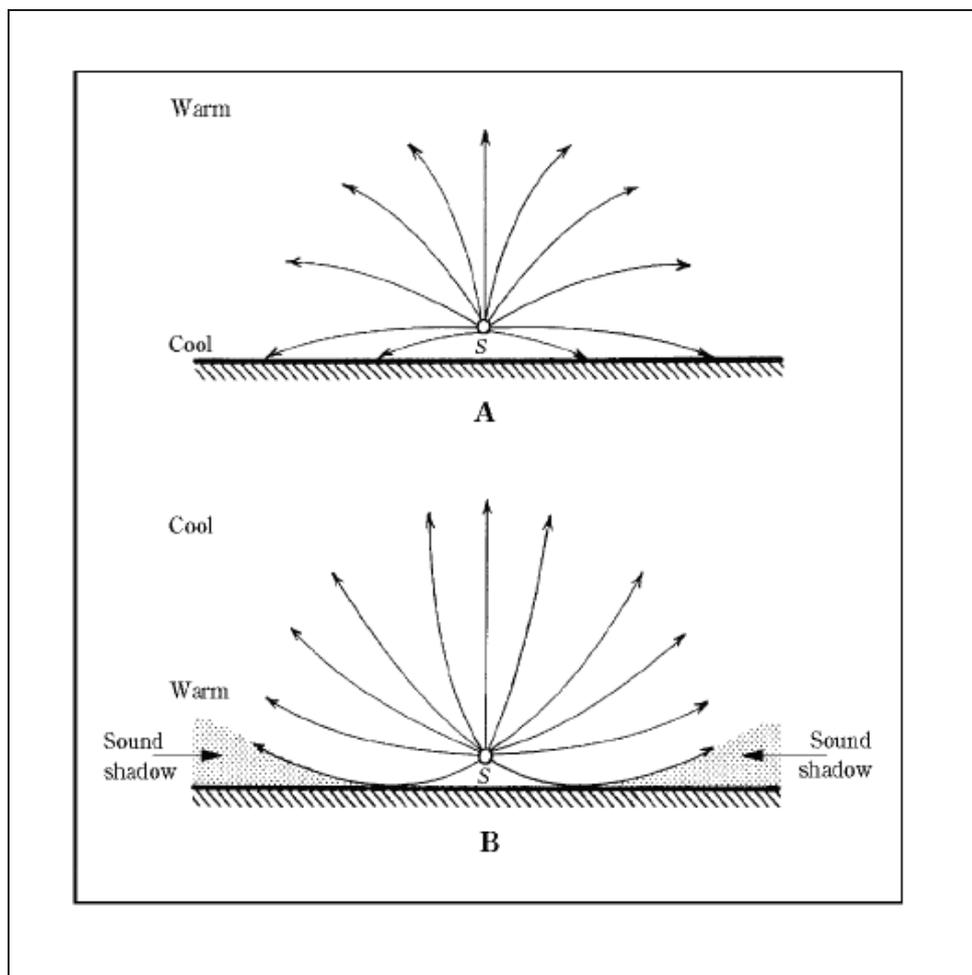
#### 3.3.6.1. Efecto de la temperatura.

La velocidad del sonido ( $C$ ) se incrementa con la temperatura de acuerdo a la ecuación (3.7) en m/s [20],

$$C = 331.4 + 0.607\theta, \quad (3.7)$$

donde,  $\theta$  es la temperatura del ambiente en °C. Es importante recordar que, en una atmósfera normal, la temperatura por sí misma decrece con la altura. El resultado es que, en

ausencia del viento, las ondas del sonido cambian de dirección a partir del suelo, formándose una *región oscura* [18]. Algunas veces, sin embargo, el gradiente de temperatura cerca del suelo es positivo, por lo que la temperatura se incrementa con la altura. Esta situación se conoce como *inversión térmica* y conduce a efectos opuestos a los descritos anteriormente. Los efectos de refracción para disminución o aumento de temperatura con la altura se observan en la figura 7 [18].

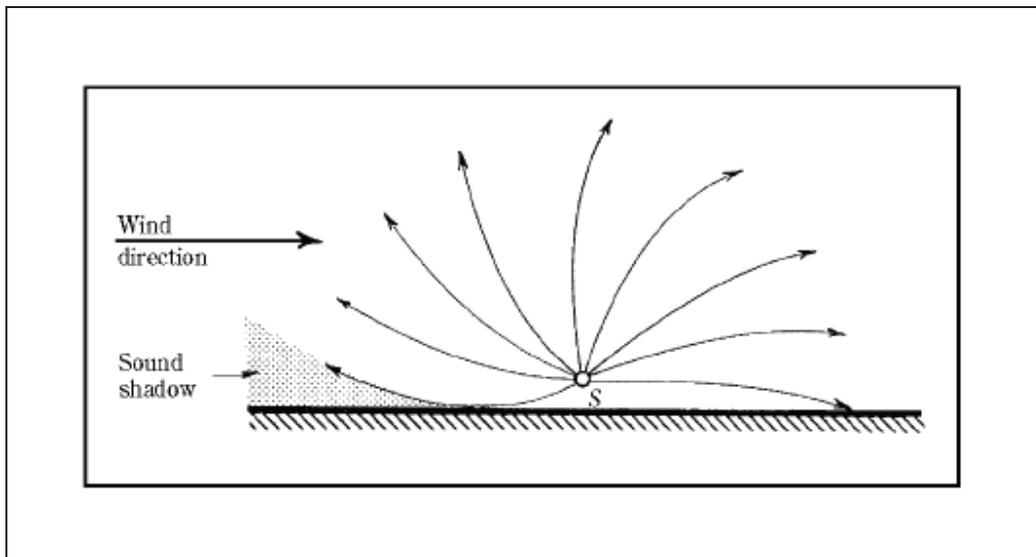


**Figura 7.** Refracción del sonido causado por la temperatura [18].

### 3.3.6.2. Efecto del viento.

Ya que el aire es viscoso, la velocidad del viento a nivel del suelo es cero. Por encima del suelo la velocidad del viento se incrementa con la altura hasta que la velocidad de la masa principal de aire es alcanzada. Esta región de variación de la velocidad del viento puede ser de muchos cientos de metros de espesor y afecta las mediciones de la mayor parte de las fuentes de ruido. El efecto es que la dirección del frente de onda cambia mientras el sonido viaja a través de la capa de aire con diferentes velocidades de viento [12].

La figura 8 muestra que a favor del viento el efecto de refracción hace girar las ondas de sonido hacia el piso y el nivel de sonido se incrementa comparado con la situación de efectos sin refracción. En contra del viento el efecto de refracción es opuesto, formándose una región de sombra provocando una disminución del nivel sonoro [18].



**Figura 8.** Refracción del sonido causada por el viento [18].

### 3.4. Predicción del nivel sonoro.

En el análisis del campo acústico en exteriores es importante desarrollar relaciones entre la potencia sonora de las fuentes, los niveles de presión sonora en el receptor y la influencia de los diferentes caminos de propagación. La predicción de los niveles de presión sonora en áreas externas adyacentes a las fuentes de ruido requiere de un análisis acabado [3, 5, 10].

El cálculo de la atenuación sonora desde la fuente al receptor, en combinación con las respectivas mediciones de emisión, normalmente es realizado en base a un algoritmo estandarizado, siendo un procedimiento común en muchos países, donde cada cual aplica los modelos aceptados en el ámbito nacional, o bien, el determinado por un sector industrial [3].

Existen varios procedimientos para predecir los niveles de presión sonora en áreas adyacentes a instalaciones industriales que utilizan la información de la potencia acústica de las fuentes sonoras y las atenuaciones del frente de onda en el camino de propagación. Estos modelos consideran a las fuentes emisoras como fuentes puntuales y cuantifican los niveles de presión sonora en bandas de octava entre 63 y 8000 Hz [3, 10].

Sin embargo, no hay gran diferencia entre los métodos de cálculo y los softwares existentes [3, 10]. Por otro lado, en algunos casos, es interesante un método basado en niveles equivalentes de presión sonora con ponderación A ( $L_{eq}$ , [dBA]) en banda ancha. Así también, la información en bandas de octava puede ser utilizada para la identificación de las bandas de frecuencia dominantes en el espectro sonoro [10].

En la Tabla 1 se presentan los principales softwares de predicción sonora utilizados actualmente en el mundo [10].

**Tabla 1.** Softwares de predicción sonora.

<b>Software</b>	<b>Fabricante</b>	<b>País</b>	<b>Sitio web</b>
ArcAcus	Akusti	Finlandia	<a href="http://www.akusti.com">www.akusti.com</a>
CADNA	Datakustic GmbH	Alemania	<a href="http://www.datakustik.de">www.datakustik.de</a>
ENM	RTA Technology	Australia	<a href="http://www.rtagroup.com.au">www.rtagroup.com.au</a>
IMMI	Wölfen	Alemania	<a href="http://www.woelfel.de">www.woelfel.de</a>
INM	Federal Aviation Administrarion	U.S.A.	<a href="http://www.aee.faa.gov">www.aee.faa.gov</a>
LIMA	Stapelfeldt Ing. mbM	Alemania	<a href="http://www.stapelfeldt.de">www.stapelfeldt.de</a>
MITHRA	01dB	Francia	<a href="http://www.01db.com">www.01db.com</a>
NoiseMap	WS Atkins Noise & Vibration	Inglaterra	<a href="http://www.noisemap2000.com">www.noisemap2000.com</a>
Predictor	Brüel & Kjaer	Dinamarca	<a href="http://www.bksv.com/bksv">www.bksv.com/bksv</a>
SoundPlan	Braunstein + Berndt GmbH	Alemania	<a href="http://www.soundplan.com">www.soundplan.com</a>
TNM	Federal Highway Administrarion	U.S.A.	<a href="http://www.mctrans.ce.ufl.edu">www.mctrans.ce.ufl.edu</a>

### 3.4.1. Normativa de referencia.

3.4.1.1. ISO 9613-1:1993 (1993). *Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere* [13].

Esta norma especifica un método analítico para el cálculo de la atenuación del sonido como consecuencia de la absorción atmosférica para un rango amplio de condiciones meteorológicas. La atenuación debido a la absorción atmosférica se especifica para *tonos puros* en términos de un coeficiente de atenuación en función de la frecuencia del sonido (50 a 10 kHz), temperatura (- 20 a +50°C), humedad relativa (10 a 100%) y presión del aire (101.325 kPa). Las fórmulas se entregan también para rangos de frecuencia más amplios, por ejemplo, las frecuencias ultrasónicas, en donde se disminuye la presión del aire; y para el caso en que las señales de ruido no corresponden a tonos puros.

3.4.1.2. ISO 9613-2:1996 (1996). *Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 2: General Method of Calculation* [14].

Esta norma describe un método para el cálculo de la atenuación sonora durante la propagación en exteriores con el fin de predecir los niveles de ruido ambiental a cierta distancia de un número de fuentes sonoras. El método predice el nivel de presión continuo equivalente con ponderación A [ $L_{eq}$ , dBA], tal como se describe en la norma ISO1996, para ciertas condiciones meteorológicas [3].

3.4.1.3. Conservation of Clear Air and Water in Europe (CONCAWE) (1981). *The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities* [15].

En este informe se describen los resultados de un proyecto de investigación diseñado para producir un nuevo y completo modelo para la evaluación de la propagación del ruido en el medio ambiente. El trabajo en sí se llevó a cabo por la empresa *Acoustic Technology Ltd.* (Southampton, Inglaterra), en conformidad con un programa definido por CONCAWE. Se entregan los detalles sobre el desarrollo de un modelo inicial, las mediciones experimentales y las etapas de perfeccionamiento para producir la versión final y tres versiones simplificadas. El informe describe el desarrollo durante el periodo de estudio de distintas curvas de atenuación para seis categorías de condiciones meteorológicas para cada banda de octava, y la estimación de intervalos de confianza para las predicciones a través de la aplicación de análisis estadístico. El informe concluye con una comparación entre el nuevo modelo CONCAWE y otros dos modelos de propagación. Se incluyen tablas de valores de absorción atmosférica, gráficos y ecuaciones para calcular los parámetros de atenuación, así como una breve descripción de los métodos de análisis estadísticos utilizados.

3.4.1.4. ISO 8297:1994 (1994). *Acoustics – Description of Sound Power Levels of Multisource Industrial Plants for Evaluation of Sound Pressure Levels in the Environment – Engineering Method* [16].

En esta norma se especifica un método de ingeniería para determinar los niveles de potencia acústica de *plantas industriales multifuente*, de interés para la evaluación de niveles de presión sonora en el medio ambiente. El método se limita a grandes instalaciones industriales con múltiples fuentes de ruido en su interior, que tengan sus dimensiones principales en el plano horizontal, y que fundamentalmente, irradian sonido de manera uniforme en todo el plano horizontal. Los niveles de presión sonora sin ponderación se miden en bandas de octava. Los resultados se expresan tanto en bandas de octava (63 a 4000 Hz), como en niveles de potencia acústica ponderados A, si es necesario [3].

## **4. METODOLOGÍA.**

### *4.1. Diseño de Proyecto.*

A partir de una revisión bibliográfica y siguiendo una línea de desarrollo en vista de los trabajos de titulación anteriores, en los cuales se estimó el impacto acústico de la Refinería Bío-Bío [3] y el impacto acústico generado por la circulación vehicular a través de la Avenida Ribera Norte [19] hacia la Población El Triángulo; se presenta factible determinar un nuevo impacto acústico, esta vez, desde el área de maquinaria hacia el SMCR, información de utilidad a la hora de implementar medidas de control de ruido o desarrollos futuros en relación al planeamiento de nuevas instalaciones.

Las instalaciones de la Refinería Bío-Bío se identifican como un sistema multifuente exterior de alta complejidad, debido a la envergadura de la maquinaria, dimensiones asociadas e influencia de factores meteorológicos, como la magnitud y dirección del viento.

Como es usual en plantas industriales, durante el día existe gran circulación de vehículos en faena, tales como camionetas, buses de traslado de personal y camiones de carga, identificadas como fuentes sonoras móviles. Así también se observa circulación de aviones de pasajeros superior hacia y desde el Aeropuerto Carriel Sur, y circulación de vehículos livianos y pesados a través de la Avenida Ribera Norte, sector industrial Talcahuano; todas fuentes sonoras a minimizar a la hora de efectuar una predicción de nivel sonoro considerando solamente el impacto que generan las instalaciones de proceso.

En las figuras 9, 10, y 11 se observan las instalaciones de la Refinería Bío-Bío de Enap y la ubicación de los monitores de ruido Maestranza (*mM*), 4 Sur (*m4S*) y 7 Sur (*m7S*) (en rojo).



**Figura 9.** Monitor maestranza e instalaciones sector norte Refinería Bío-Bío Enap.

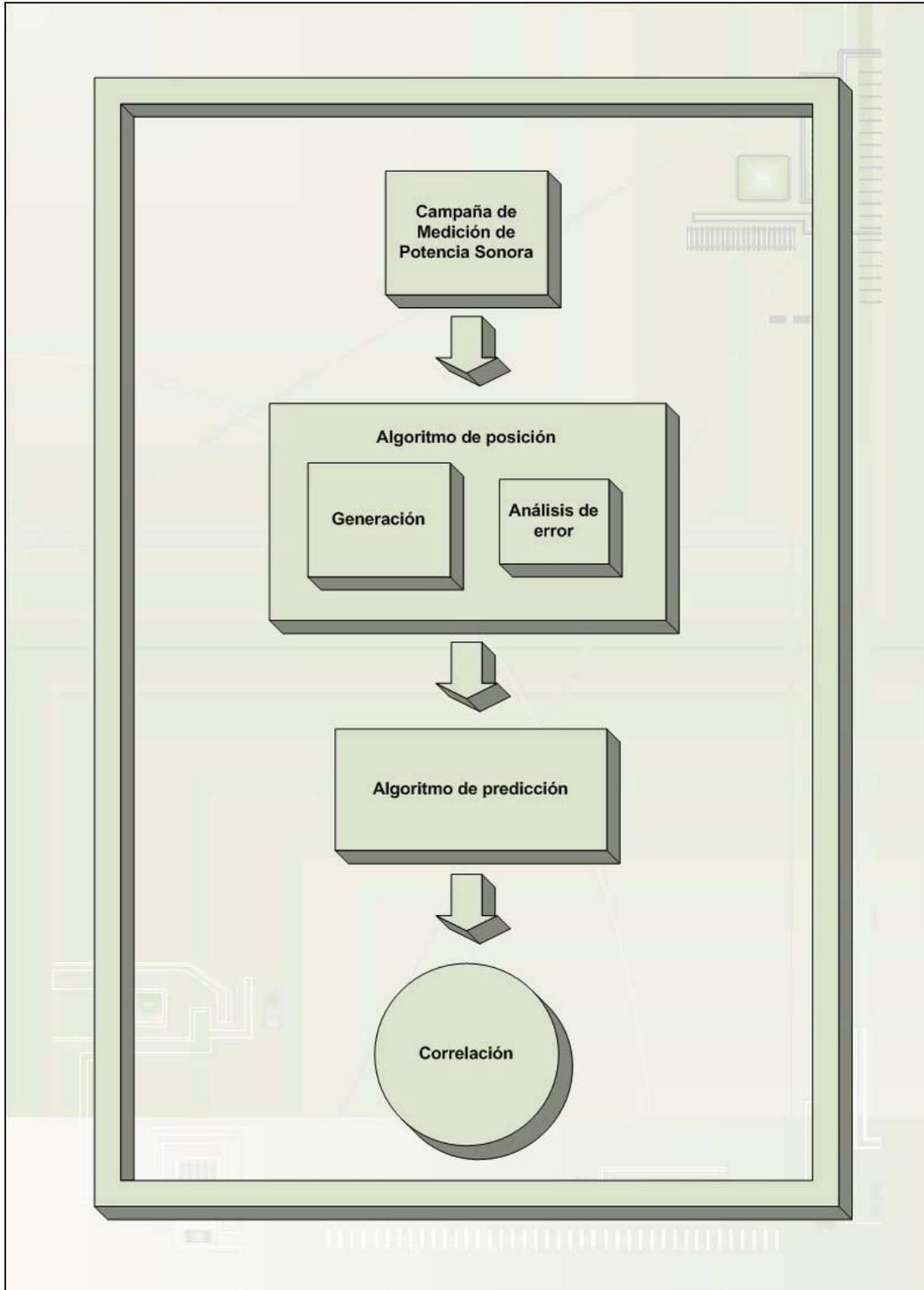


**Figura 10.** Monitor 4 Sur e instalaciones sector norte Refinería Bío-Bío Enap.



**Figura 11.** Monitor 7 Sur e instalaciones sector norte – sur Refinería Bío-Bío Enap.

De acuerdo a estos antecedentes, el marco teórico y la normativa disponible (ver sección 3.4.1.), se determinó caracterizar el impacto acústico de las instalaciones de proceso utilizando un modelo de fuentes sonoras puntuales mediante un *algoritmo de predicción*, obteniendo la potencia sonora ( $L_W$ ), a través de una campaña de medición. La posición de las fuentes sonoras en el plano general de la Refinería Bío-Bío se determinó a través de un *algoritmo de posición*, el cual establece el *centro acústico (CA)* de las plantas de proceso. La etapa final, corresponde a la *correlación*, sección que compara los resultados de la predicción con el registro del SMCR para un intervalo específico de jornada laboral, determinando la efectividad del modelo planteado. Todos los algoritmos corresponden a rutinas computacionales desarrolladas en MATLAB® 7 [22] (ver anexo).



**Figura 12.** Diagrama esquemático del proyecto.

#### 4.1.1. Fuentes sonoras.

Las fuentes sonoras puntuales se componen por sectores de maquinaria agrupados de acuerdo al trazado de calles interiores y 2 antorchas pertenecientes al sistema de seguridad de la Refinería. Éstas se incorporaron considerando el historial de reclamos por ruido de la población vecina (criterio cualitativo). En este sentido, es importante la altura de descarga hacia la atmósfera (sobre 50 m) y la potencia sonora efectiva, resultado que se observará en las secciones siguientes.

Así, el modelo de predicción considera a 8 *plantas de proceso multifuente* y 2 *antorchas* como fuentes. En la Tabla 2 se encuentran los detalles de posición de acuerdo al plano general de la Refinería Bío-Bío (CN-12379-J), estableciendo un perímetro para las plantas de proceso por la unión de los 4 puntos cartesianos.

**Tabla 2.** Coordenadas fuentes sonoras.

Fuente Sonora	P1		P2		P3		P4	
	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
Antorcha Etileno	875,00	-638,00	-	-	-	-	-	-
Antorcha Refinería	850,00	-380,00	-	-	-	-	-	-
CCR	204,00	-15,00	297,00	-15,00	297,00	-96,50	219,50	-87,30
CHT	332,70	107,00	394,20	107,00	392,90	13,90	332,70	13,90
Coker	989,00	-83,50	1084,00	-83,50	1084,00	-187,50	989,00	-187,50
Etileno	324,40	-128,40	460,00	-128,40	460,00	-221,40	324,40	-221,40
HDT	914,00	-94,50	954,00	-94,50	954,00	-187,50	914,00	-187,50
Hydrocracking	206,10	-276,00	291,70	-276,00	302,80	-429,00	196,10	-432,90
Zona de Proceso	8,60	-128,50	222,60	-128,50	229,90	-221,40	8,60	-215,00
Zona Suministros	14,00	-10,00	176,30	-10,00	176,30	-97,00	14,00	-97,00

## 4.2. Campaña de medición de potencia sonora.

### 4.2.1. Normativa de referencia.

Para estimar la potencia sonora de las plantas de proceso, se utilizó la norma *ISO8297:1994, Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Multisource Industrial Plants for Evaluation of Sound Pressure Levels in the Environment – Engineering Method* [16]. La expresión para  $L_W$  en bandas de octava corresponde a la ecuación (4.1), la cual es función del nivel de presión sonora promedio sobre el contorno de medición ( $\overline{L}_p$ , Ec. 4.2), el término de área ( $\Delta L_S$ , Ec. 4.3), la corrección por proximidad ( $\Delta L_F$ , Ec. 4.4), el término de corrección por micrófono ( $\Delta L_M$ , Ec. 4.5) y la atenuación sonora producto de la absorción atmosférica ( $\Delta L_\alpha$ , Ec. 4.6).

$$L_W = \overline{L}_p + \Delta L_S + \Delta L_F + \Delta L_M + \Delta L_\alpha \quad \text{dB} \quad (4.1)$$

$$\overline{L}_p = 10 \lg \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pi}} \right] \quad \text{dB} \quad (4.2)$$

donde,  $L_{pi}$  es el nivel de presión sonora en bandas de octava para la  $i$ -ésima posición de micrófono, y  $N$  el número total de posiciones,

$$\Delta L_S = 10 \lg \left( \frac{2S_m + hl}{S_0} \right) \quad \text{dB} \quad (4.3)$$

donde,  $S_m$  es el área de medición,  $h$  la altura de micrófono (1.5 m),  $l$  el perímetro de medición y  $S_0$  el área de referencia (1 m<sup>2</sup>),

$$\Delta L_F = \lg \left( \frac{\overline{d}}{4\sqrt{S_p}} \right) \quad \text{dB} \quad (4.4)$$

donde,  $\bar{d}$  es la distancia promedio de medición y  $S_p$  el área de planta,

$$\Delta L_M = 3 \left( 1 - \frac{\theta}{90} \right) \text{ dB} \quad (4.5)$$

donde,  $\theta$  es el ángulo en el cual la sensibilidad del micrófono decae 3 dB. En este caso,  $\Delta L_M = 0$ , micrófono omnidireccional,

$$\Delta L_\alpha = 0.5\alpha\sqrt{S_m} \text{ dB} \quad (4.6)$$

donde,  $\alpha$  es el coeficiente de absorción atmosférica obtenido de acuerdo a la norma ISO9613-1 en función de la humedad relativa y temperatura, datos descargados de la torre meteorológica de la Refinería Bío-Bío para cada día de medición.

En el caso de las antorchas, se utilizó de manera inversa el estándar ISO9613-2:1996, *Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 2: General Method Calculation* [14]. Esto es, a partir de la medición del nivel de presión sonora continuo equivalente a favor del viento ( $L_{fi}(DW)$ ), se estimó  $L_W$ , incorporando adicionalmente una corrección por efectos meteorológicos ( $K_4$ ), extraída del modelo CONCAWE:1981: *The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities* [15], por constatarse altas velocidades de viento para los días y horarios de medición. En acuerdo a la *Estabilidad Atmosférica de Pasquill* y las correspondientes *Categorías Meteorológicas* [3, 15], para valores de viento de 6 m/s y radiación solar de 104.2 mW/cm<sup>2</sup> se obtiene una categoría tipo 6 ( $C_{met6}$ ).

Lo anterior se incorpora en la ecuación (4.7), considerando también la atenuación sonora ( $A$ , Ec. 4.8) en condiciones de campo libre, y una corrección por directividad ( $D_c$ ), la que se asume como  $D_c = 0$ , omnidireccional,

$$L_W = L_{fi}(DW) - D_c + A + K_4 \text{ dB} \quad (4.7)$$

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} \quad \text{dB} \quad (4.8)$$

donde,  $A_{atm}$  es la atenuación atmosférica,  $A_{div}$  la atenuación producto de la divergencia geométrica y  $A_{gr}$  la atenuación por efectos del suelo,

$$A_{div} = 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad \text{dB} \quad (4.9)$$

donde,  $d$  es la distancia entre antorcha y posición de micrófono, y  $d_0$  la distancia de referencia (1 m),

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad \text{dB} \quad (4.10)$$

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad \text{dB} \quad (4.11)$$

donde,  $A_s$  es la atenuación del suelo en la región de la fuente descrita por el factor de tipo de suelo  $G_s$ , región de la fuente sonora;  $A_r$  la atenuación del suelo en la región del receptor descrita por el factor de tipo de suelo  $G_r$ , región del receptor; y  $A_m$  la atenuación del suelo en la región media entre fuente y receptor, descrita por el factor de tipo de suelo  $G_m$ , región media. En este caso,  $G_s = G_r = G_m = 0$ , suelo duro.

**Tabla 3.** Expresiones a utilizar para calcular  $A_s$ ,  $A_r$  y  $A_m$  en bandas de octava [14].

Nominal midband frequency Hz	$A_s$ or $A_r$ <sup>1)</sup> dB	$A_m$ dB
63	- 1,5	- 3q <sup>2)</sup>
125	- 1,5 + $G \times a'(h)$	- 3q(1 - $G_m$ )
250	- 1,5 + $G \times b'(h)$	
500	- 1,5 + $G \times c'(h)$	
1 000	- 1,5 + $G \times d'(h)$	
2 000	- 1,5(1 - $G$ )	
4 000	- 1,5(1 - $G$ )	
8 000	- 1,5(1 - $G$ )	
NOTES		
$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2})$ $b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$ $c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$ $d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$		
1) For calculating $A_s$ , take $G = G_s$ and $h = h_s$ . For calculating $A_r$ , take $G = G_r$ and $h = h_r$ . See 7.3.1 for values of $G$ for various ground surfaces. 2) $q = 0$ when $d_p \leq 30(h_s + h_r)$ $q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}$ when $d_p > 30(h_s + h_r)$ where $d_p$ is the source-to-receiver distance, in metres, projected onto the ground planes.		

Las ecuaciones de atenuación en dB para  $K_4$  en función de  $C_{met6}$  en bandas de octava son las siguientes,

$$K_4(C_{met6})_{63 \text{ Hz}} = 69.3 - 73.2(\log d) + 24.688(\log d)^2 - 2.7531(\log d)^3 \quad (4.12)$$

$$K_4(C_{met6})_{125 \text{ Hz}} = 29.5 - 25.62(\log d) + 6.286(\log d)^2 - 0.4904(\log d)^3 \quad (4.13)$$

$$K_4(C_{met6})_{250 \text{ Hz}} = 31.7 - 23.81(\log d) + 4.055(\log d)^2 - 0.1043(\log d)^3 \quad (4.14)$$

$$K_4(C_{met6})_{500 \text{ Hz}} = 19.8 - 8.8(\log d) - 2.035(\log d)^2 + 0.6747(\log d)^3 \quad (4.15)$$

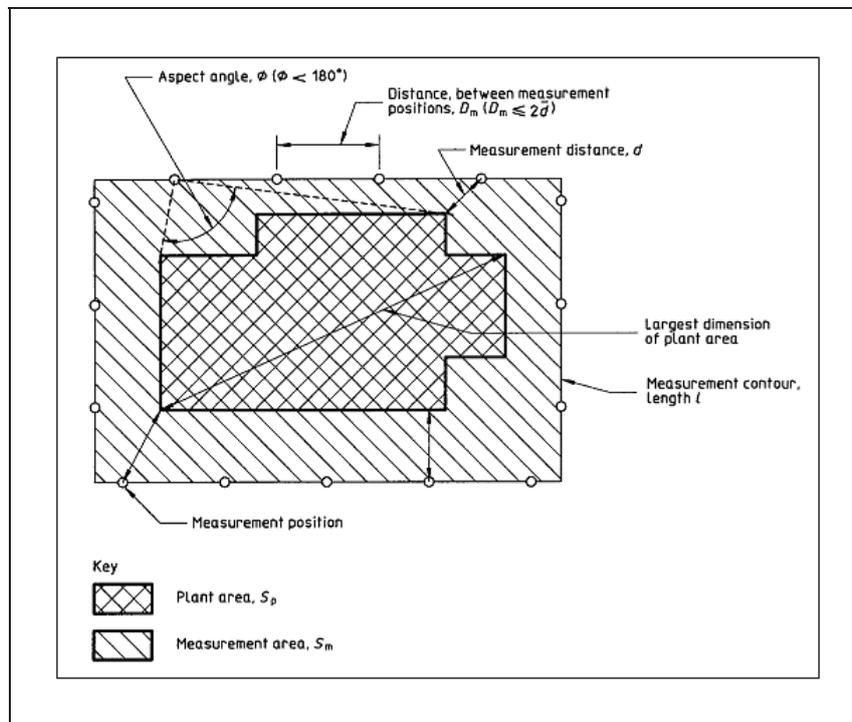
$$K_4(C_{met6})_{1000 \text{ Hz}} = 123.4 - 127.6(\log d) + 42.017(\log d)^2 - 4.584(\log d)^3 \quad (4.16)$$

$$K_4(C_{met6})_{2000\text{ Hz}} = 82.3 - 90.98(\log d) + 31.444(\log d)^2 - 3.584(\log d)^3 \quad (4.17)$$

$$K_4(C_{met6})_{4000\text{ Hz}} = 66.4 - 60.77(\log d) + 16.409(\log d)^2 - 1.4457(\log d)^3 \quad (4.18)$$

#### 4.2.2. Contorno de medición.

Para cada planta de proceso se diseñó un contorno de medición considerando lo expuesto en ISO8297 para las posiciones de micrófono [3, 16]. En el caso de las antorchas, la medición se efectuó a lo largo de la calle Seis Sur, identificada como eje de posición de micrófono. En la Tabla 4 se presentan antecedentes con respecto a la superficie de la planta ( $S_p$ ), perímetro de medición ( $l$ ), posiciones de micrófono ( $i$ ), distancia de medición ( $D_m$ ) y distancia promedio de medición ( $\bar{d}$ ).



**Figura 13.** Contorno de medición ISO8297 [16].

**Tabla 4.** Antecedentes diseño de medición.

<b>Fuente Sonora</b>	$Sp$ [m2]	$l$ [m]	$i$	$Dm$ [m]	$\bar{d}$ [m]
Antorcha Etileno	-	-	5	30	147,5
Antorcha Refinería	-	-	3	30	106,9
CCR	7991	473	19	25	15,2
CHT	1995	237	16	15	15,5
Coker	9826	512	21	25	16,9
Etileno	13543	592	20	30	15,3
HDT	3720	344	23	15	9,4
Hydrocracking	16600	660	22	30	17,2
Zona de Proceso	19513	716	29	25	13,3
Zona Suministros	14121	499	24	25	13,2

La figura 14 es una vista aérea de la planta de proceso Etileno. La figura 15 indica la ubicación de las Antorchas Etileno y Refinería.



**Figura 14.** Planta de proceso Etileno.



**Figura 15.** Antorcha Refinería y Antorcha Etileno.

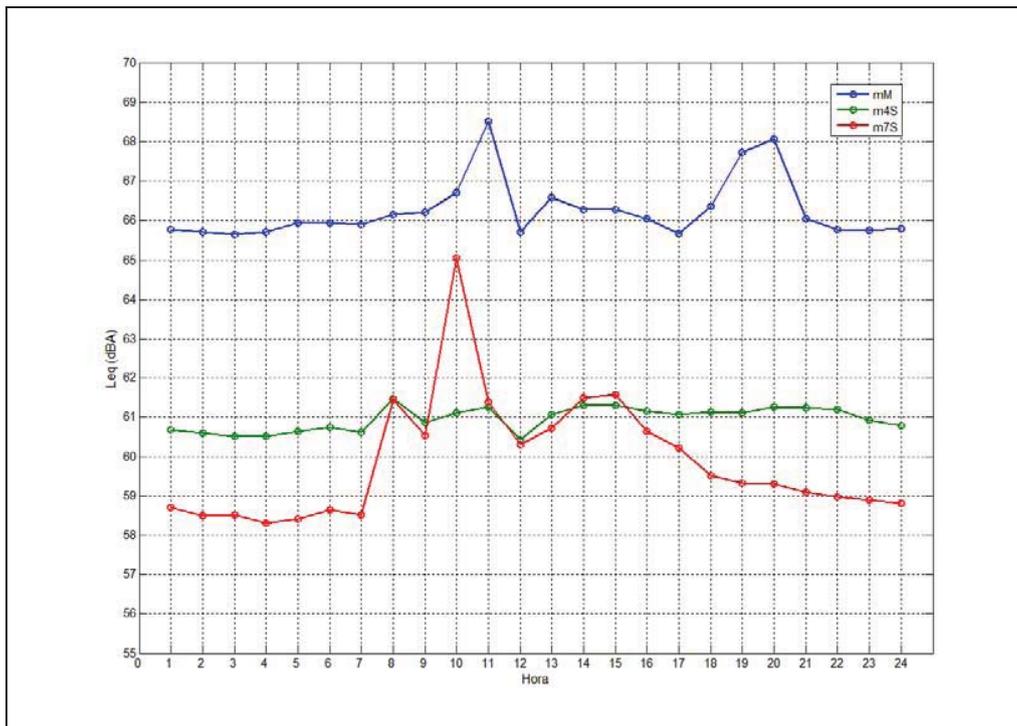
#### 4.2.3. Periodo de estudio.

Para la Provincia de Concepción, la temporada de lluvias se extiende desde abril a septiembre de cada año, condición meteorológica que no permite efectuar mediciones acústicas en exteriores. Por este y otros motivos prácticos, se determinó como *periodo de estudio* el intervalo entre el 22 de noviembre de 2007 al 3 de enero de 2008, correspondiente a 43 días de jornada laboral. Se consideró como variable crítica la factibilidad de medición, evitando las condiciones de detención, mantenimiento y puesta en marcha de maquinaria, coordinando esta situación con el departamento de control de proceso respectivo.

#### 4.2.4. Intervalo de medición.

Se determinó como intervalo óptimo de medición, el intervalo en donde la actividad de producción se encuentra en pleno funcionamiento (9:00 – 13:00 hrs.). En la figura 16 se observa el comportamiento del nivel equivalente hora ( $L_{EQ}$ ) en el SMCR, para la *jornada*

*laboral promedio*; valores diarios promediados energéticamente para el periodo de estudio. Para los monitores Maestranza y 4 Sur se observa un comportamiento cuasi estable con oscilaciones del orden de 3 dBA, como máximo. El comportamiento del monitor 7 Sur presenta oscilaciones mayores en la lectura, por lo que se identifica como la estación mayormente sensible al inicio y finalización de las actividades de proceso.



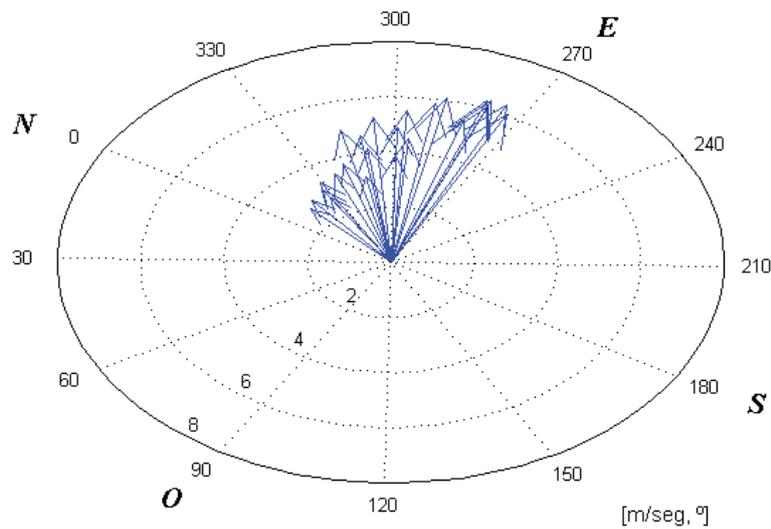
**Figura 16.** Nivel equivalente hora jornada laboral promedio.

#### 4.2.5. Instrumentación.

El equipo utilizado corresponde a un sonómetro clase 1 Larson Davis System 824 [21], con su respectiva pantalla anti-viento y atril de sonómetro para una elevación de 1.5 m sobre el suelo, registrando el  $L_{EQ1min}$  para cada posición de micrófono. Los datos se descargaron a un notebook mediante el software 824 Utiliy [21] y a través de una interfaz de conexión RS232 – USB.

#### 4.2.6. Condiciones ambientales.

De acuerdo a lo señalado en la sección 4.3.1, para las antorchas se aplicó una corrección por efectos meteorológicos, por motivos relacionados con la distancia promedio de medición (Tabla 4) y la influencia del viento [3, 5, 12]. La figura 17 es un diagrama polar donde se observa el comportamiento para la jornada laboral promedio. Se identifica como predominante la dirección noreste, con magnitudes máximas por sobre los 6 m/s.



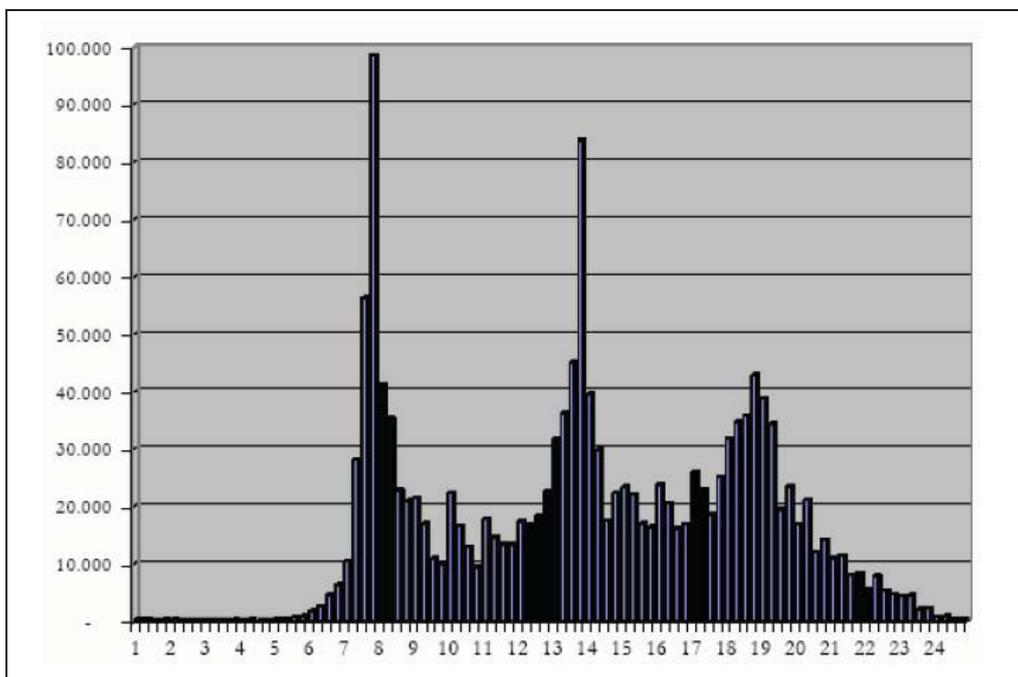
**Figura 17.** Vector viento jornada laboral promedio.

#### 4.2.7. Ruido de fondo.

El ruido de fondo se compone por la operación simultánea de las plantas de proceso y la influencia de la circulación de vehículos a través de la Avenida Ribera Norte, sector industrial Talcahuano (ver figuras 9, 10 y 11) [19]. La figura 18 es un histograma de desplazamientos totales en un día laboral normal [3], donde se observa que, para horarios

entre 8:00 y 13:00 hrs, la situación se normaliza. No se contempló efectuar mediciones nocturnas, en donde claramente la situación se minimiza.

Frente a la imposibilidad de detener la operación de las plantas de proceso, debido al sistema productivo del petróleo [24, 25], se determinó efectuar las mediciones en el campo cercano de la fuente sonora en análisis, minimizando la influencia del entorno. Este antecedente se consideró en el diseño del contorno de medición.



**Figura 18.** Distribución horaria (desplazamientos por cuarto de hora) para día laboral en el Gran Concepción [3].

#### 4.2.8. Procedimiento.

El objetivo principal fue medir las plantas de proceso y antorchas en condición de funcionamiento normal. Mayores detalles sobre las condiciones de operación en los horarios de medición corresponde a información reservada de la Empresa.

Las mediciones se realizaron en su mayoría en los ejes de las calles interiores de la Refinería. Debido a la existencia de fuentes sonoras móviles, se determinó eliminar los datos que fueran influidos por el paso de vehículos en las inmediaciones de la posición de micrófono de acuerdo a un criterio de campo, repitiendo la medición por punto. La Tabla 5 presenta las fechas de medición y el respectivo tiempo de duración del procedimiento.

**Tabla 5.** Duración procedimiento de medición.

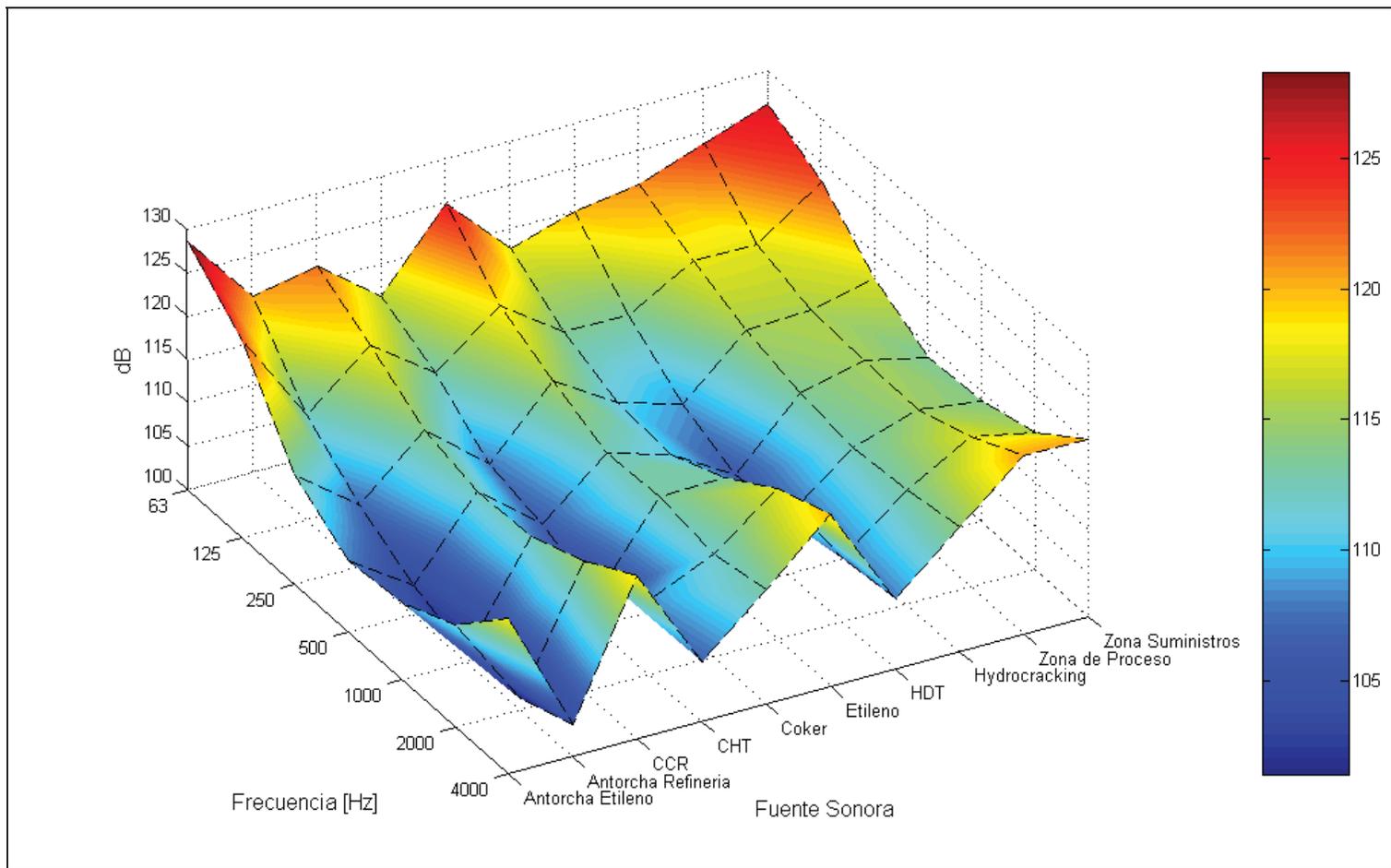
<b>Fuente Sonora</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tiempo [min]</b>
Antorcha Etileno	14-12-07	15
Antorcha Refinería	14-12-07	10
CCR	26-11-07	50
CHT	12-12-07	35
Coker	03-01-08	50
Etileno	22-11-07	40
HDT	03-01-08	50
Hydrocracking	23-11-07	50
Zona de Proceso	19-12-07	55
Zona Suministros	30-11-07	80

#### 4.2.9. Resultados.

Los resultados del procedimiento se presentan en la Tabla 6. Buscando una interpretación visual se confeccionó una figura tridimensional, la cual establece una comparación entre las 10 fuentes sonoras. De modo cualitativo se identifica el tipo de ruido medido en relación al tiempo de medición, como ruido constante. Un mayor análisis deberá incorporar un estudio por punto de posición de micrófono, y medición para distintos modos de operación [3, 10]. Sin embargo, para este nivel, los resultados se consideran como suficientes.

**Tabla 6.** Niveles de potencia de las fuentes sonoras en análisis.

<b>L<sub>w</sub> [dB]</b>	<b>Bandas de Frecuencia [Hz]</b>						
	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
Antorcha Etileno	128.54	122.68	112.64	108.19	108.85	111.79	118.02
Antorcha Refinería	120.33	112.12	107.21	103.35	101.2	101.19	103.71
CCR	121.74	118.1	113.86	112.18	112.42	115.07	118.8
CHT	116.19	112.85	107.86	106.37	103.48	108.45	106.89
Coker	124.93	118.57	115.39	112.51	112.99	111.81	113.16
Etileno	117.68	113.67	110.82	110.43	113.15	117.4	119.83
HDT	119.9	113.39	108.77	106.04	106.86	107.41	108.08
Hydrocracking	121.05	117.7	115.23	113.46	112.53	113.2	114.39
Zona de Proceso	123.79	117.57	115.54	115.22	114.97	117.22	120.56
Zona Suministros	126.24	122.82	117.06	113.49	113.87	115.75	120.46



**Figura 19.** Niveles de potencia de las fuentes sonoras en análisis.

#### 4.2.10. Conclusiones.

- En relación a los resultados, se observa una componente importante en el rango 63 – 125 Hz para la Antorcha Etileno, Coker y Zona Suministros, situación a considerar en relación a la cuantificación del impacto acústico en el SMCR.
- Se observa un comportamiento similar entre la Antorcha Refinería, CHT y HDT, en el rango 250 - 4000 Hz. Un comportamiento semejante se aprecia entre la Zona de Proceso y la Zona Suministros para casi todo el rango de frecuencia.
- La potencia sonora de las antorchas se encuentra dentro del orden de magnitud de la potencia de plantas de proceso.
- Con respecto al ruido de fondo y de acuerdo al análisis cualitativo señalado en ISO8297, se estima como despreciable el ruido producto de la Avenida Ribera Norte sector industrial Talcahuano, debido a la distancia (por sobre los 50 m) y los apantallamientos de las instalaciones de servicio y bodegas del sector este, con respecto a la altura de posición de micrófono.
- Se minimizó la influencia del ruido de fondo producto de la operación simultánea de las plantas de proceso, efectuando las mediciones en el campo cercano, estableciendo adicionalmente un criterio de incorporación de fuentes sonoras al modelo de predicción. En este sentido, se menciona la situación de la planta de proceso Merox, en donde la alta influencia de las emisiones sonoras de la planta Etileno, determinó su exclusión del modelo.
- Como conclusión general, se implementó de manera exitosa el procedimiento de medición de potencia sonora, de acuerdo a los requerimientos prácticos de una situación de terreno. Se obtuvo información importante para el desarrollo del

modelo de predicción, estableciendo, de igual forma, un estándar de trabajo para proyectos futuros.

### 4.3. Algoritmo de posición.

Una vez obtenidos los resultados de potencia, es necesario establecer la posición de cada fuente puntual en un punto específico del espacio, obteniendo de esta forma una mejor caracterización de las emisiones de las plantas de proceso. Para las antorchas la posición se determina por el punto de descarga de gases a la atmósfera.

El algoritmo funciona en 2 etapas (ver figura 12), la primera es la sección de *generación* la cual implementa una grilla de fuentes sonoras de prueba y calcula el impacto acústico en cada posición de micrófono. Lo siguiente corresponde al *análisis de error*, etapa que determina la zona en donde se encuentra el *centro acústico* mediante la comparación de los datos predichos y los recolectados durante la campaña de potencia.

#### 4.3.1. Generación.

A cada fuente sonora de prueba se le asigna el nivel de potencia sonora medido por ISO8297 y se estiman los niveles de presión  $L_{pi}$  de acuerdo a ISO9613-2, considerando las atenuaciones  $A_{div}$ ,  $A_{atm}$ , y  $A_{gr}$  en bandas de frecuencia. A modo de ejemplo, en la figura 20 se visualiza una grilla de fuentes sonoras de prueba (azul) con espaciamiento de 5 m, el contorno de medición (rojo) y las 19 posiciones de micrófono (verde) para la planta de proceso CCR. La rutina de MATLAB®7 se encuentra en anexo, los datos de entrada corresponden a:

$P_i$  : Coordenadas i-ésima posición de micrófono.

$cM$  : Vértices contorno de medición.

$cP$  : Vértices plantas de proceso.

$L_{pi}$  : Nivel de presión sonora i-ésima posición de micrófono en bandas de frecuencia.

$a$  : Coeficiente de atenuación atmosférica.

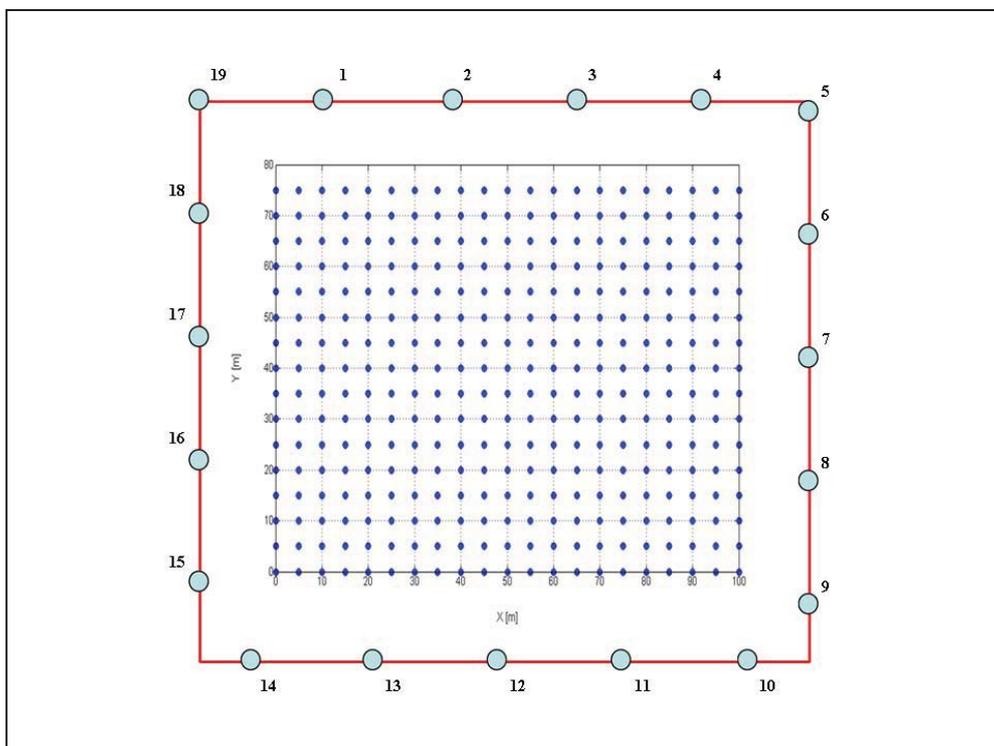
$L_w$  : Nivel de potencia sonora planta de proceso.

$dx$  : Delta X grilla de fuentes sonoras.

$dy$  : Delta Y grilla de fuentes sonoras.

$hS$  : Altura fuentes sonoras.

$L$  : Dimensiones plantas de proceso.



**Figura 20.** Fuentes de prueba y posiciones de micrófonos planta CCR.

La información para cada planta de proceso se ingresa por separado a la rutina. Los datos de salida corresponden a:

$CS$  : Coordenadas fuentes sonoras de prueba.

$L_{ftBA}$  : Predicción de nivel de presión sonora en  $i$ -ésima posición de micrófono en banda ancha.

$L_{piBA}$  : Nivel de presión sonora en i-ésima posición de micrófono en banda ancha.

#### 4.3.2. Análisis de error.

Establecidos los datos de salida de la etapa de generación se ingresa a la etapa de análisis de error. Se establece un parámetro de *error inicial* ( $e_i$ ) de acuerdo a la ecuación 4.19.

$$e_i = \left| L_{fiBA} - L_{piBA} \right| \quad \text{dB} \quad (4.19)$$

Así también se presenta las limitaciones del método de predicción desarrollado en ISO9613-2 (Tabla 7) como antecedente a considerar en lo que sigue. En este caso, la altura promedio entre fuente sonora de prueba y punto de medición corresponde a cero, por lo que es de interés el intervalo  $0 < h < 5 \text{ m}$ ,  $\pm 3 \text{ dB}$ .

**Tabla 7.** Error del método de predicción presentando en ISO9613-2 [14].

Height, $h$ *)	Distance, $d$ *)	
	$0 < d < 100 \text{ m}$	$100 \text{ m} < d < 1\,000 \text{ m}$
$0 < h < 5 \text{ m}$	$\pm 3 \text{ dB}$	$\pm 3 \text{ dB}$
$5 \text{ m} < h < 30 \text{ m}$	$\pm 1 \text{ dB}$	$\pm 3 \text{ dB}$
*) $h$ is the mean height of the source and receiver. $d$ is the distance between the source and receiver.		
NOTE — These estimates have been made from situations where there are no effects due to reflection or attenuation due to screening.		

El *error inicial total* ( $e_{iT}$ ) por fuente sonora de prueba se obtiene calculando la media aritmética de  $e_i$  sobre el total de posiciones de micrófono. Posteriormente, se genera un histograma de 10 clases para  $e_{iT}$ . La *primera selección* de fuentes sonoras se realiza considerando las fuentes agrupadas en la primera clase, las cuales presentan  $e_{iT}$  mínimo. En

la Tabla 8 indica la cota de error ( $Ce_iT$ , parámetro de decisión) para las 10 plantas de proceso.

**Tabla 8.** Primera selección de fuentes sonoras de prueba.

<b>Fuente Sonora</b>	<b><math>Ce_iT</math> [dB]</b>
CCR	2.52
CHT	3.06
Coker	3.27
Etileno	2.86
HDT	3.27
Hydrocracking	2.92
Zona de Proceso	3.28
Zona Suministros	2.69

La *segunda selección* utiliza un histograma de 5 clases para analizar los datos de la *primera selección*. Finalmente se consideran las fuentes agrupadas en la primera clase del nuevo histograma. En este grupo se encuentran las fuentes que presentan el menor error de predicción en relación a los datos medidos experimentalmente. La Tabla 9 presenta la *cota de error final*  $Ce_fT$ .

**Tabla 9.** Segunda selección de fuentes sonoras de prueba.

<b>Fuente Sonora</b>	<b><math>Ce_fT</math> [dB]</b>
CCR	2.17
CHT	2.69
Coker	2.90
Etileno	2.40
HDT	2.90
Hydrocracking	2.60
Zona de Proceso	2.96
Zona Suministros	2.28

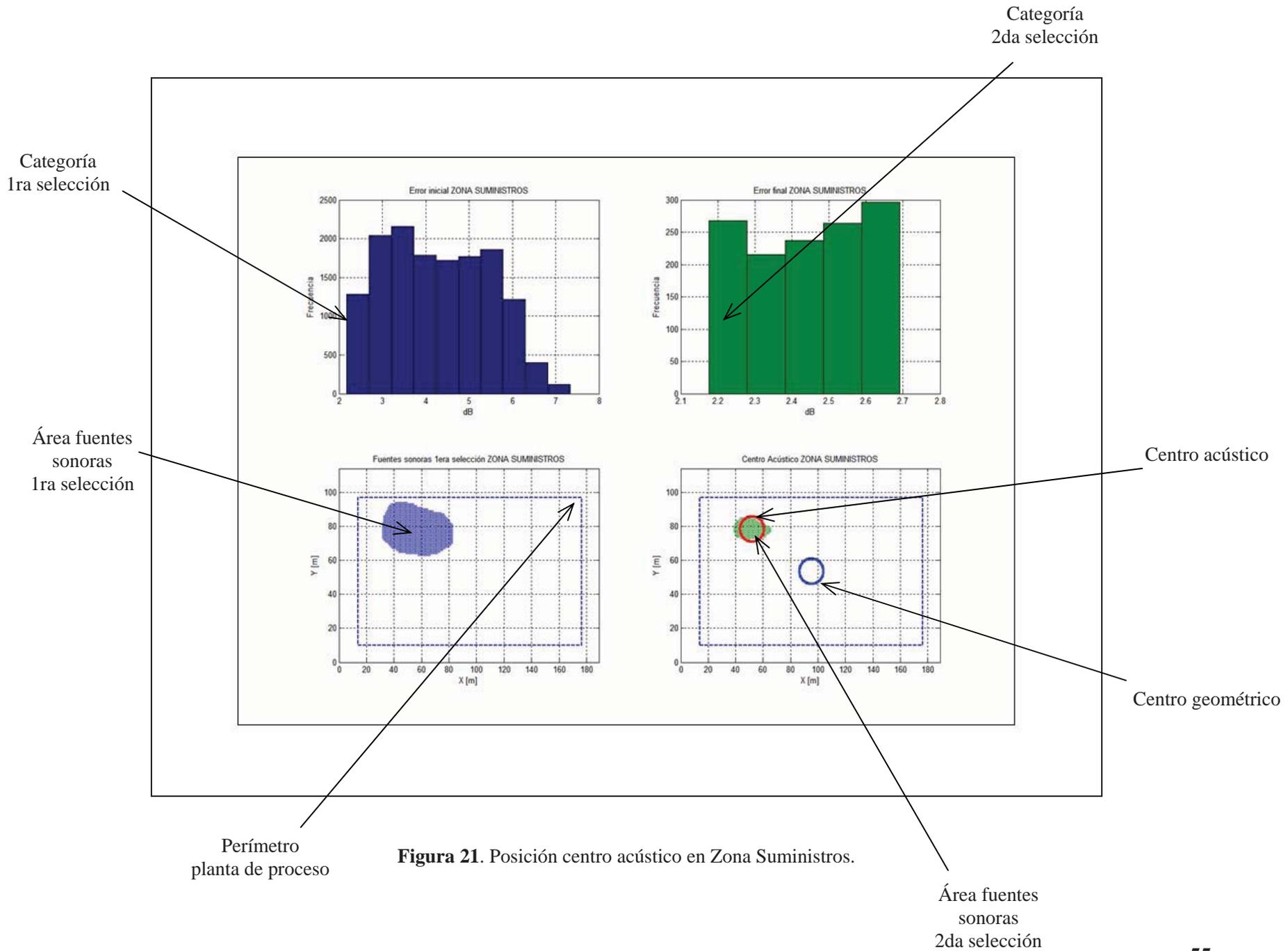
### 4.3.3. Resultados.

Los resultados del algoritmo de posición se presentan en la Tabla 10. Se ha establecido un *delta espacial* ( $\Delta e$ ) entre el centro geométrico ( $CG$ ) y el centro acústico ( $CA$ ) (punto medio del área de las fuentes sonoras de prueba de segunda selección), de manera de facilitar la ubicación de las fuentes sonoras en el plano general de la Refinería Bío–Bío (CN-12379-J). Así también se indica la distancia ( $D$ ) entre  $CG$  y  $CA$ .

**Tabla 10.** Posición centro acústico plantas de proceso.

Fuente Sonora	$CG$		$CA$		$\Delta e$		$D$ [m]
	$x$ [m]	$y$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]	
CCR	61.89	48.49	59.76	55.66	-2.13	7.17	7.48
CHT	39.96	22.38	50.24	18.99	10.28	-3.39	10.82
Coker	51.25	70.00	43.50	76.50	-7.75	6.50	10.11
Etileno	84.99	62.78	70.75	74.57	-14.24	11.79	<b>18.49</b>
HDT	68.50	26.00	67.50	30.25	-1.00	4.25	4.37
Hydrocracking	86.85	61.00	94.50	66.00	7.65	5.00	9.14
Zona de Proceso	115.62	58.25	166.10	54.50	50.48	-3.75	<b>50.62</b>
Zona Suministros	95.15	53.50	52.00	78.50	-43.15	25.00	<b>49.87</b>

Como ejemplo, en la figura 21 se observan las categorías de selección en los histogramas, el perímetro de planta, el área de las fuentes sonoras de prueba según los criterios de selección y los centros geométricos y acústico para la Zona Suministros, en un plano cartesiano cuyo origen corresponde al vértice superior izquierdo del contorno de medición (referencia para cada plot plant de Enap).



**Figura 21.** Posición centro acústico en Zona Suministros.

#### 4.3.4. Conclusiones.

- Se observan focalizaciones importantes en las emisiones sonoras en las plantas Etileno, Zona de Proceso y Zona Suministros.
- Para las plantas de proceso restantes, el centro acústico se encuentra próximo al centro geométrico ( $D \leq 11$  m).
- Mediante la implementación de 2 etapas para el criterio de selección, se obtuvo una cota de error aceptable de acuerdo a los requerimientos de ISO9613-2.
- A partir de un método de ingeniería, se obtuvo una buena modelación del centro acústico de las plantas de proceso, información de utilidad para la etapa de predicción.

#### 4.4. Sistema de Monitoreo Continuo de Ruido.

Los instrumentos que componen el SMCR consisten en tres sonómetros analizadores Larson Davis System 824 [21], los cuales, al ser destinados a permanecer como estaciones fijas, están equipados con un preamplificador modelo 2100, micrófono modelo 2541, cable extensión de micrófono EXA010, cable de salida AC/DC CBL042 y cable serial de interfase CBL002 [3, 26].

La ubicación de los puntos de monitoreo fue designada por la empresa canadiense *HFP Acoustical Consultants* [23], de acuerdo al modelo de predicción CONCAWE y mediante el software de modelación acústica SoundPLAN®, quedando establecido que el monitor maestranza se encuentra ubicado en el techo del taller de equipos estáticos; el monitor 4 sur está ubicado en la intersección de las calles 4 Sur y 1 Oriente, y el monitor 7 sur en la intersección de las calles 7 Sur y 1 Oriente (ver figura 22).



**Figura 22.** Monitores de ruido Maestranza, 4 Sur y 7 Sur [3].

Las posiciones de las estaciones fijas de monitoreo continuo de ruido están de acuerdo a lo establecido en el D.S. N° 146/97 de MINSEGPRES *Norma de Emisión de*

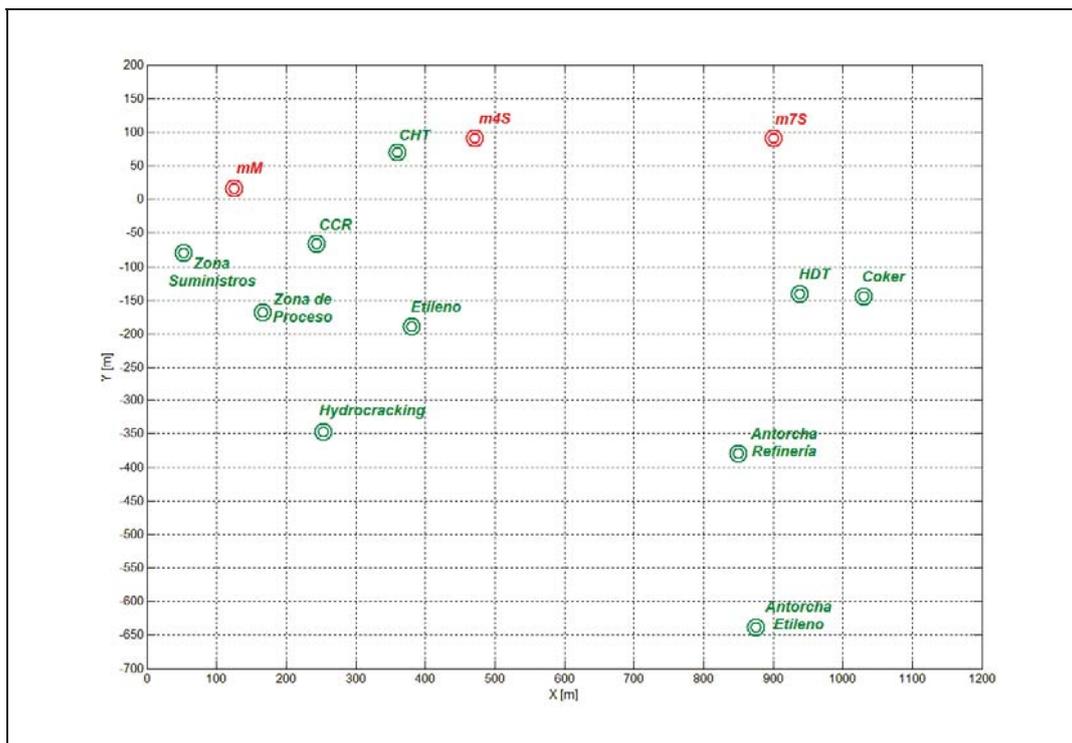
*Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas* [17], para la condición de medición en exteriores, con excepción a lo establecido para la altura con respecto al suelo, la cual es superior a lo establecido en el decreto. La elevación de micrófono para cada monitor corresponde a 3 m desde la base. Para evitar la influencia de la Avenida Ribera Norte, los tres monitores están aislados contra el ruido del flujo vehicular mediante barreras acústicas [3].

#### 4.5. Algoritmo de predicción.

Con la posición para el centro acústico de las plantas de proceso se ubicó las fuentes puntuales en el plano general de la Refinería Bío-Bío. La figura 23 corresponde a la grilla de cálculo del algoritmo de predicción, donde el eje horizontal tiene un largo de 1.2 km y el vertical 900 m. las fuentes sonoras se indican en verde y los monitores de ruido en rojo. El suelo se considera como un plano horizontal con características de suelo duro ( $G = 0$ ), esto último relacionado con la gran cantidad de superficie de ripio o concreto observada; caso crítico. Las distancias entre fuentes sonoras y monitores de ruido son presentados en la tabla 11.

**Tabla 11.** Distancias entre monitores de ruido y fuentes sonoras.

Fuente Sonora	mM [m]	m4S [m]	m7S [m]
Antorcha Etileno	998.78	838.96	735.73
Antorcha Refinería	827.66	607.63	477.65
CCR	144.06	276.68	676.19
CHT	240.88	113.38	541.80
Coker	918.52	606.07	268.06
Etileno	327.61	294.85	591.40
HDT	828.37	522.03	235.48
Hydrocracking	385.40	489.57	781.95
Zona de Proceso	188.89	400.52	779.46
Zona Suministros	119.62	451.82	865.43



**Figura 23.** Posición fuentes puntuales y monitores de ruido.

La predicción hacia los monitores de ruido se efectúa a través de ISO9613-2 – CONCAWE, considerando las condiciones ambientales de la jornada laboral promedio, periodo de estudio del Proyecto.

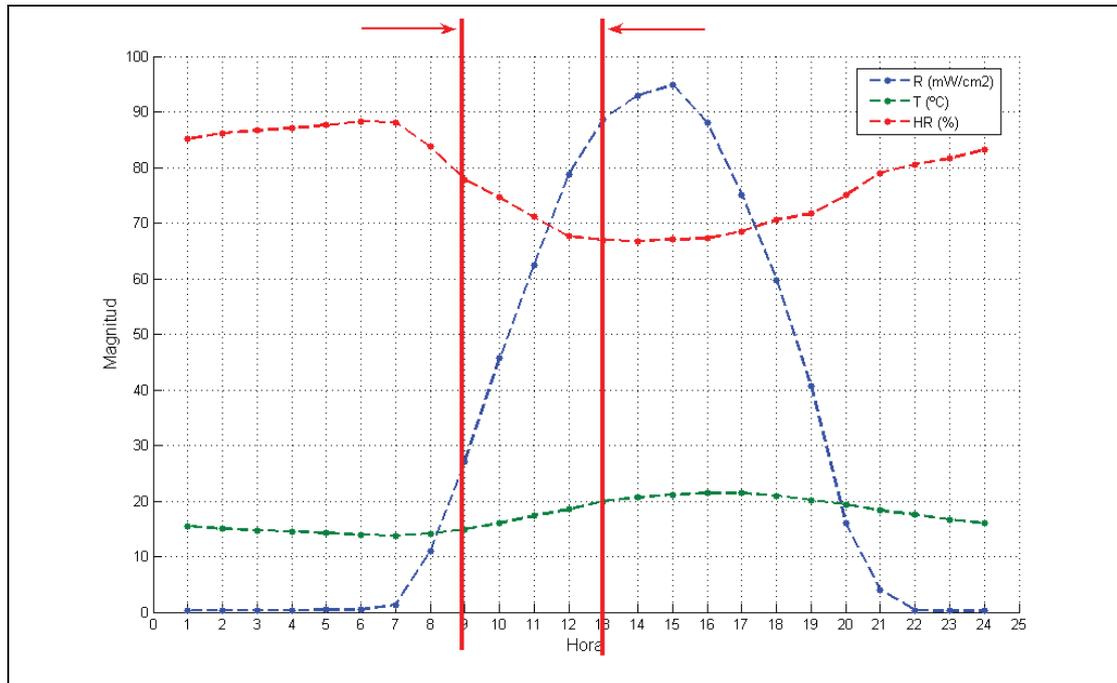
En las secciones 4.2.3. y 4.2.4., se indicó los antecedentes con respecto al intervalo de medición y el comportamiento de las estaciones monitoras de ruido, información de utilidad en lo que sigue. En la figura siguiente se observa el comportamiento de la *temperatura* [°C], *humedad relativa* [%] y *radiación solar* [mW/cm<sup>2</sup>], para la jornada laboral promedio, que son las variables ambientales que determinan la corrección meteorológica del modelo CONCAWE ( $K_4$ ), de manera análoga a la corrección efectuada en la medición de potencia sonora de las antorchas.

Así también, se ha delimitado un intervalo de interés (9:00 – 13:00 hrs.), el cual se considera para todos los cálculos de predicción, y para la correlación con el SMCR. Los

valores promedio para las variables ambientales y el vector viento se indican en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Variables ambientales intervalo específico de jornada laboral.

Temperatura [°C]	19.10
Humedad relativa [%]	68.11
Radiación solar [mW/cm <sup>2</sup> ]	80.68
Velocidad viento [m/seg]	5.21
Dirección viento [°]	252.35



**Figura 24.** Intervalo específico de jornada laboral.

Para obtener la corrección meteorológica se utiliza la *Estabilidad Atmosférica de Pasquill* y la correspondiente *Categoría Meteorológica* [3, 15], de acuerdo a las Tablas 13 y 14, extraídas textualmente del modelo CONCAWE.

**Tabla 13.** Clasificación de las condiciones meteorológicas de acuerdo a Pasquill y Turner [15].

Wind* Speed m/s	Day Time Incoming Solar Radiation mW/cm <sup>2</sup>				1 hour before Sunset or after Sunrise	Night-Time Cloud Cover (octas)		
	> 60	30-60	< 30	Overcast		0-3	4-7	8
	≤ 1.5	A	A-B	B		C	D	F or G**
2.0-2.5	A-B	B	C	C	D	F	E	D
3.0-4.5	B	B-C	C	C	D	E	D	D
5.0-6.0	C	C-D	D	D	D	D	D	D
> 6.0	D	D	D	D	D	D	D	D

\* Wind speed is measured to the nearest 0.5 m/s.  
 \*\* Category G is restricted to night-time with less than 1 octa of cloud and a wind speed of less than 0.5 m/s.

**Tabla 14.** Categorización de las condiciones meteorológicas según Pasquill [15].

Decreasing Attenuation ↓	Meteorological Category	Pasquill Stability Category		
		A, B	C, D, E	F, G
	1	$v < -3.0$		-
2	$-3.0 < v < -0.5$		$v < -3.0$	-
3	$-0.5 < v < +0.5$		$-3.0 < v < -0.5$	$v < -3.0$
4*	$+0.5 < v < +3.0$		$-0.5 < v < +0.5$	$-3.0 < v < -0.5$
5	$v > +3.0$		$+0.5 < v < +3.0$	$-0.5 < v < +0.5$
6	-		$v > +3.0$	$+0.5 < v < +3.0$

\* Category with assumed zero meteorological influence

En relación a estos antecedentes, la categoría meteorológica para el intervalo específico de jornada laboral corresponde a una categoría tipo 6 ( $C_{met6}$ ), por lo que se utilizan las ecuaciones desarrolladas en la sección 4.2.1 (ecs. 4.12 a 4.18).

Por otro lado, las atenuaciones consideradas en el modelo de predicción corresponden a  $A_{div}$ ,  $A_{atm}$ ,  $A_{gr}$ ,  $K_4(C_{met6})$ , y  $A_{site}$  una atenuación debida a la propagación sonora a través de sitios industriales.

**Tabla 15.** Valores en bandas de octava para  $A_{site}$  [14].

<b>Nominal midband frequency, Hz</b>	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
$A_{site}$ , dB/m	0	0,015	0,025	0,025	0,02	0,02	0,015	0,015

Debido a la complejidad de modelación de los apantallamientos existentes principalmente en el área cercana al monitor maestranza, estos no se han considerado en el modelo de predicción. Una hipótesis importante del proyecto consiste en la consideración de atenuación a través de las instalaciones de la Refinería Bío-Bío mediante la simple consideración de  $A_{site}$ .

Las ecuaciones generales que relacionan las variables mencionadas se indican a continuación:

$$L_{fi}(DW) = L_w + D_c - (A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{site} + K_4(C_{met6})) \text{ dB} \quad (4.20)$$

donde,  $L_{fi}(DW)$  es el nivel de presión sonora continuo equivalente en bandas de octava a favor del viento en la posición de cada monitor de ruido,  $D_c = 0$ , fuentes omnidireccionales,

$$L_{AT}(DW) = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^{10} \left[ \sum_{j=1}^7 10^{0.1[L_{fi}(j) + A_f(j)]} \right] \right\} \text{ dB} \quad (4.21)$$

donde,  $L_{AT}(DW)$  es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado “A” total, a favor del viento y en la posición de cada monitor de ruido.

La rutina desarrollada en MATLAB®7 se encuentra en anexo. Los datos de entrada corresponden a:

- $L_W$ : Niveles de potencia sonora fuentes puntuales.
- $cFP$ : Coordenadas fuentes puntuales.
- $cMR$ : Coordenadas monitores de ruido.

Los datos de salida corresponden a:

- $D_{FP\_MR}$ : Distancia entre fuentes puntuales y monitores de ruido.
- $A_{atm}$ : Atenuación atmosférica.
- $A_{gr}$ : Atenuación por efectos del suelo.
- $A_{div}$ : Atenuación por divergencia geométrica.
- $A_{site}$ : Atenuación por propagación en sitios industriales.
- $K4_{Cmet6}$ : Corrección por efectos meteorológicos categoría 6.
- $A$ : Atenuación total.
- $L_{ftA_{FP\_MR}}$ : Nivel de presión sonora ponderado "A" en bandas de octava producto del impacto de cada fuente puntual en los monitores de ruido.
- $L_{AT_T}$ : Nivel de presión sonora ponderado "A" en banda ancha total en los monitores de ruido.

#### 4.5.1. Resultados.

A continuación se indican los niveles sonoros proyectados y las atenuaciones del frente de onda mediante figuras tridimensionales para cada monitor de ruido, de manera análoga a lo efectuado para los resultados de potencia.

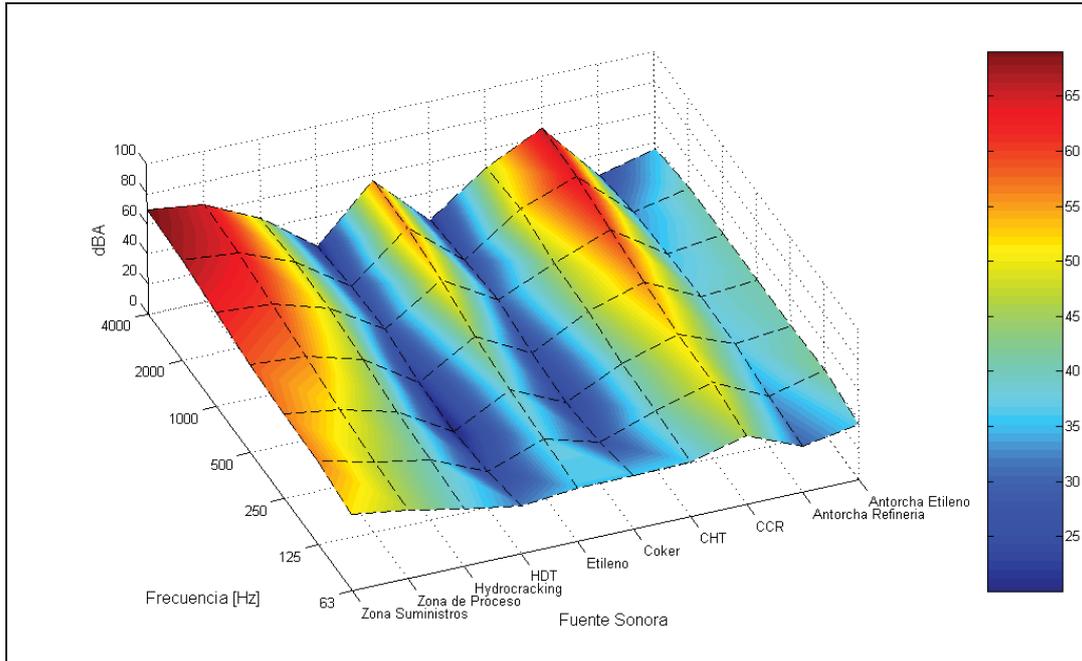
4.5.1.1. Niveles sonoros proyectados.

**Tabla 16.** Nivel de presión sonora en monitor maestranza.

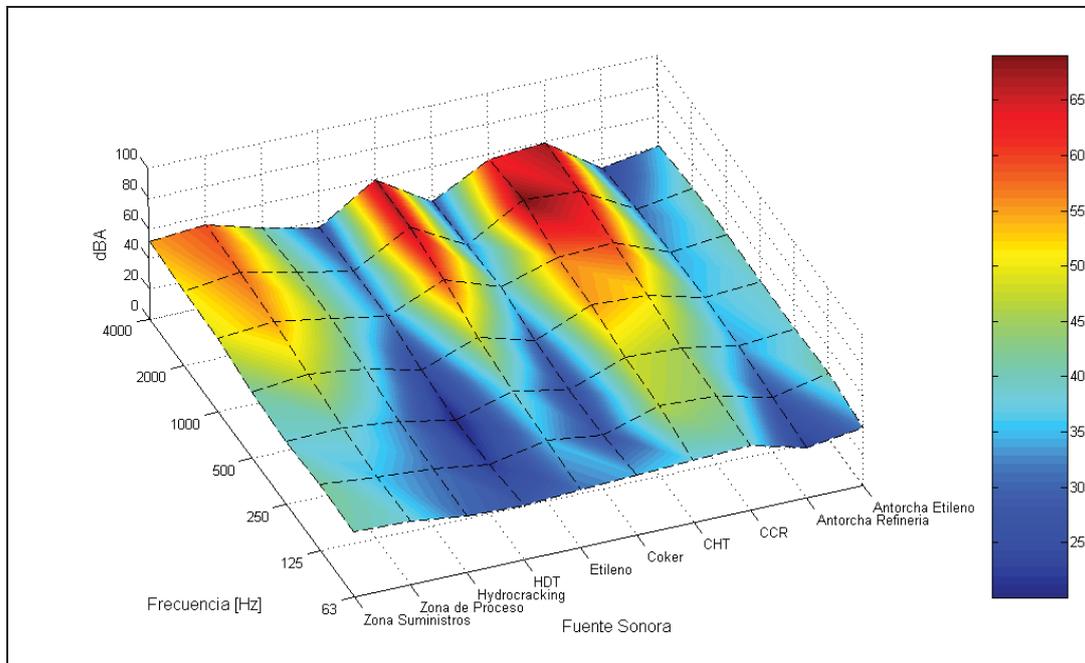
LftA mM [dBA]	Bandas de Frecuencia [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Antorcha Etileno	36,69	42,32	40,70	40,90	40,88	40,42	35,42
Antorcha Refinería	30,18	33,33	36,88	37,92	35,77	33,07	26,53
CCR	45,72	50,07	51,88	55,70	60,01	64,54	66,03
CHT	36,52	39,92	40,45	44,43	45,92	51,47	47,91
Coker	35,86	27,16	23,24	25,12	29,83	25,58	21,32
Etileno	35,83	37,48	39,51	44,54	51,58	55,68	56,01
HDT	31,66	24,09	19,64	21,80	26,77	24,63	20,36
Hydrocracking	38,27	39,85	41,78	45,39	48,70	48,85	47,75
Zona de Proceso	45,92	47,09	50,90	56,06	60,13	63,56	64,83
Zona Suministros	51,38	56,33	56,68	58,63	62,77	67,06	69,37

**Tabla 17.** Nivel de presión sonora en monitor 4 sur.

LftA m4S [dBA]	Bandas de Frecuencia [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Antorcha Etileno	38,27	43,78	42,20	42,63	43,24	43,45	40,47
Antorcha Refinería	32,94	35,85	39,38	40,69	39,58	37,86	33,92
CCR	42,53	45,18	46,22	49,98	54,59	57,50	59,21
CHT	41,65	46,78	47,92	51,95	52,71	60,25	56,23
Coker	39,90	35,56	34,76	37,05	41,61	38,73	36,66
Etileno	38,06	40,11	42,40	47,45	54,52	58,88	59,26
HDT	36,07	32,72	31,27	33,80	38,74	38,00	35,74
Hydrocracking	37,73	37,96	38,96	42,49	45,70	45,25	43,69
Zona de Proceso	42,01	40,52	42,76	47,81	51,79	53,42	54,42
Zona Suministros	43,54	44,20	42,26	44,02	48,57	49,53	51,67



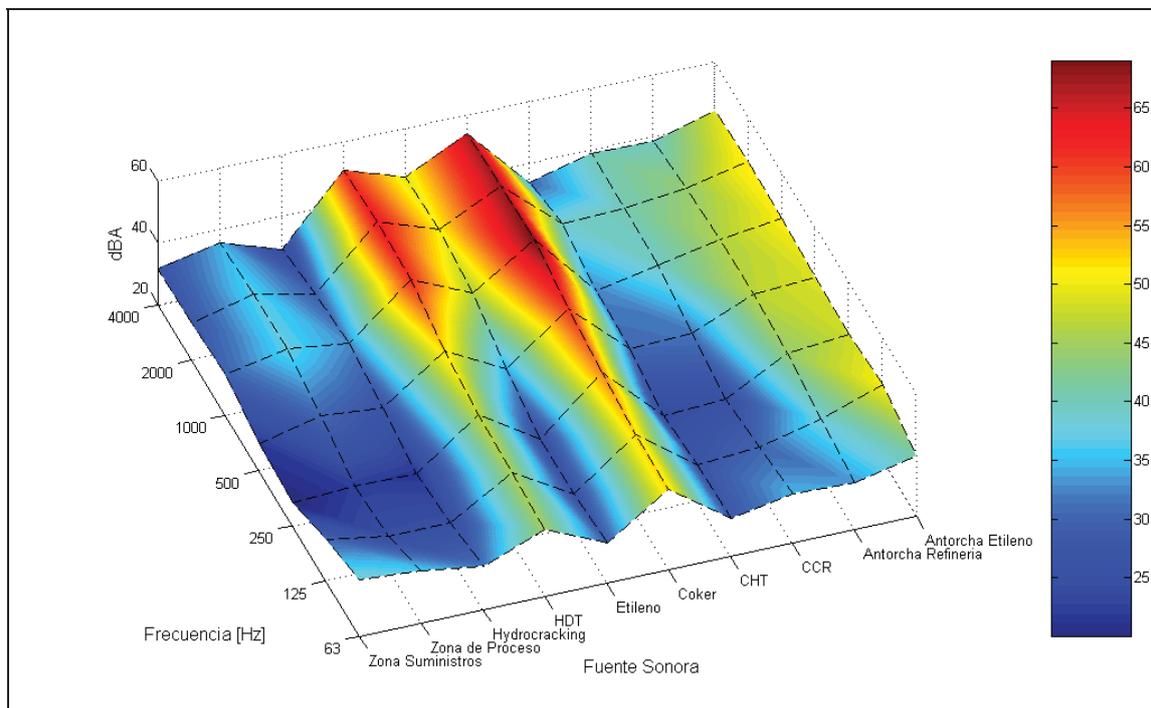
**Figura 25.** Nivel de presión sonora en monitor maestranza.



**Figura 26.** Nivel de presión sonora en monitor 4 sur.

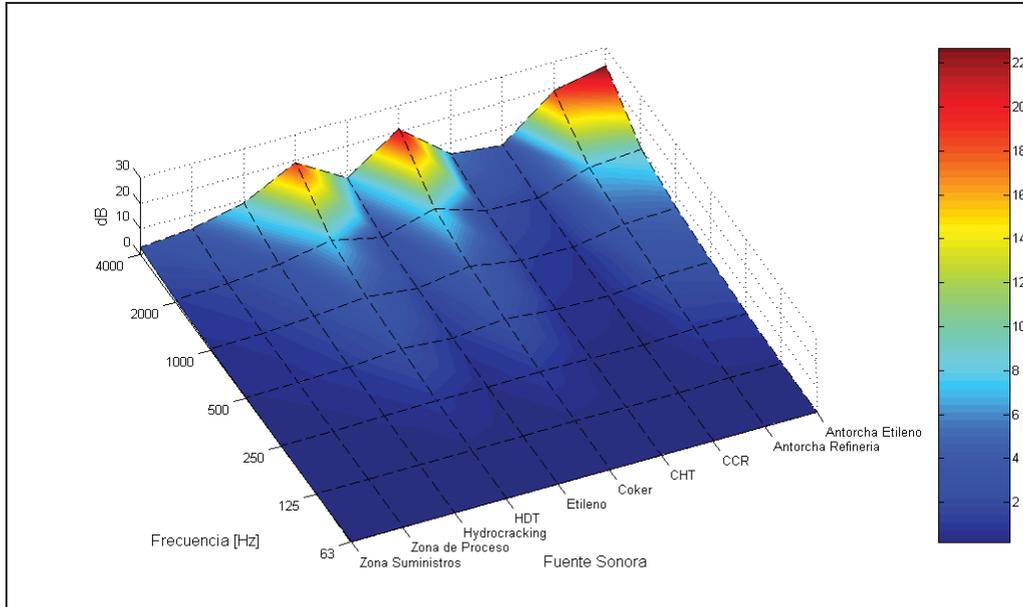
**Tabla 18.** Nivel de presión sonora en monitor 7 sur.

LftA m7S [dBA]	Bandas de Frecuencia [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Antorcha Etileno	39,45	44,86	43,29	43,85	44,93	45,57	43,86
Antorcha Refinería	35,05	37,74	41,19	42,64	42,25	41,18	38,62
CCR	35,80	33,23	30,68	34,09	38,41	39,03	38,90
CHT	32,07	31,62	29,61	33,37	34,58	38,16	33,57
Coker	45,92	45,96	48,12	50,69	55,54	54,69	54,03
Etileno	32,85	31,06	30,73	35,53	42,33	44,95	44,05
HDT	41,69	41,98	42,92	45,65	50,85	52,04	50,71
Hydrocracking	33,89	30,14	28,31	31,49	34,68	32,86	29,45
Zona de Proceso	36,66	30,07	28,71	33,34	37,21	36,98	35,74
Zona Suministros	38,22	33,21	27,25	28,53	33,08	32,11	31,61

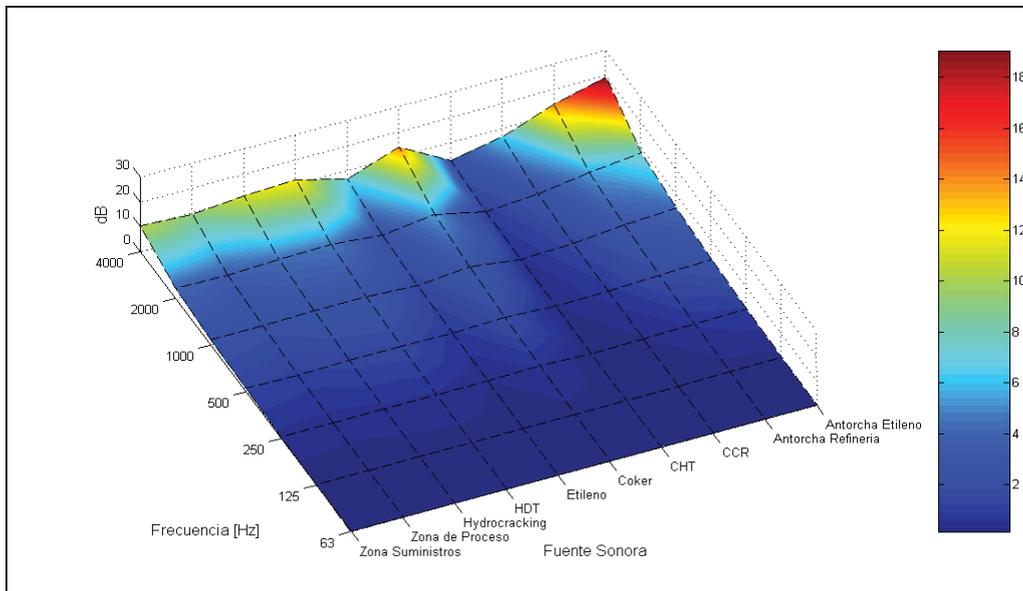


**Figura 27.** Nivel de presión sonora en monitor 7 sur.

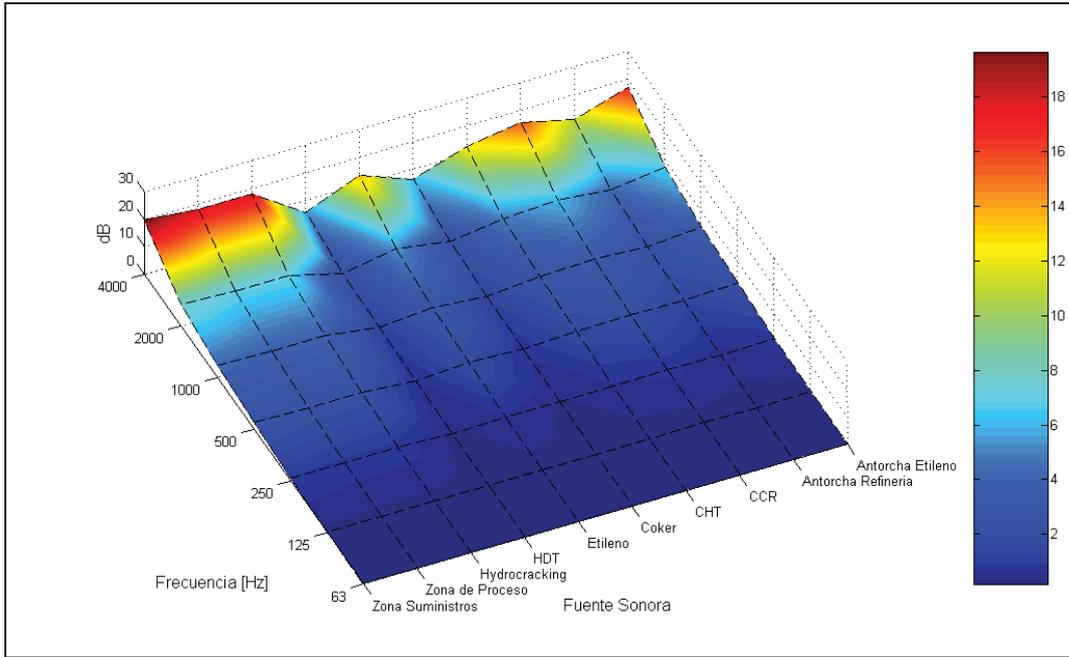
#### 4.5.1.2. Atenuación Atmosférica $A_{am}$ .



**Figura 28.** Atenuación atmosférica entre fuentes sonoras y monitor maestranza.

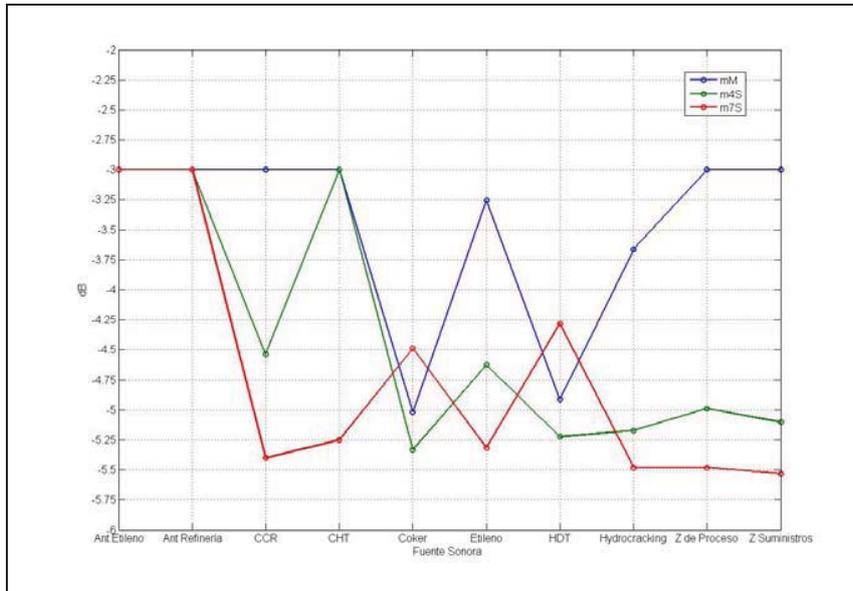


**Figura 29.** Atenuación atmosférica entre fuentes sonoras y monitor 4 sur.



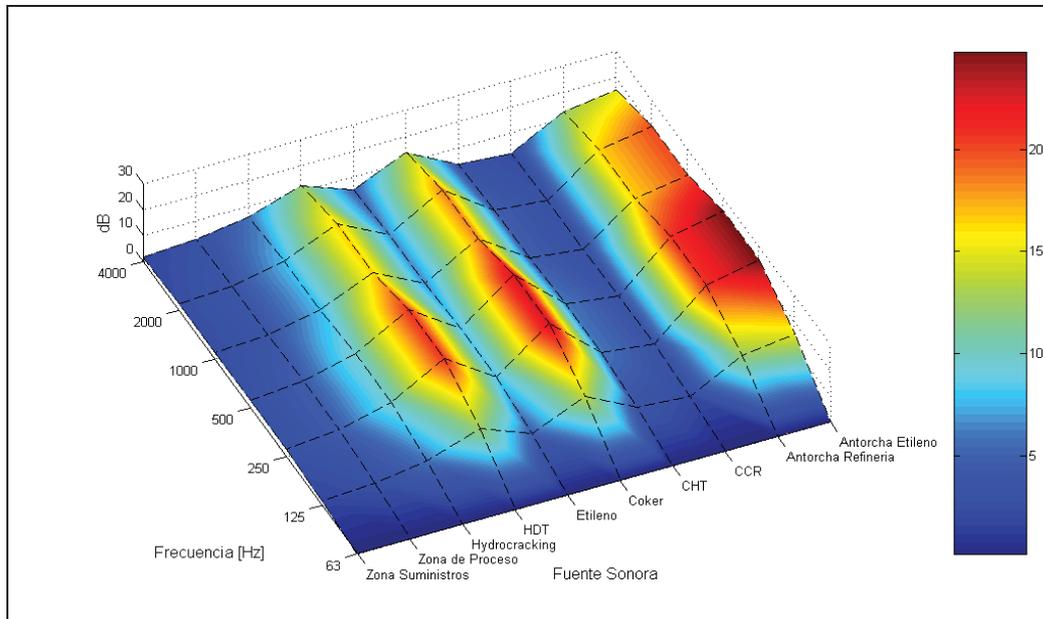
**Figura 30.** Atenuación atmosférica entre fuentes sonoras y monitor 7 sur.

4.5.1.3. Atenuación por efectos del suelo  $A_{gr}$ .

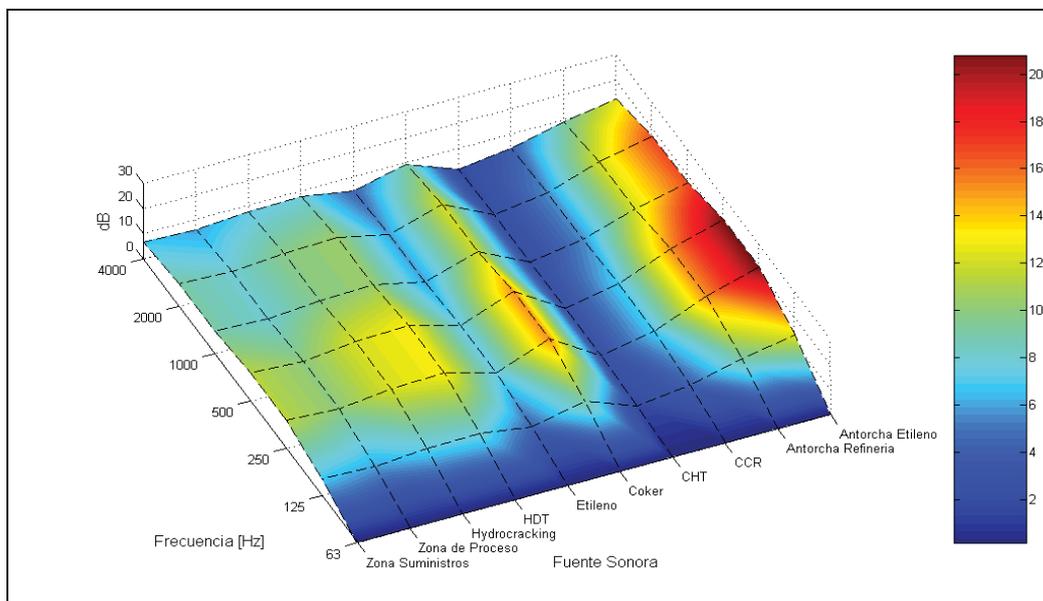


**Figura 31.** Comparación atenuación por efectos del suelo.

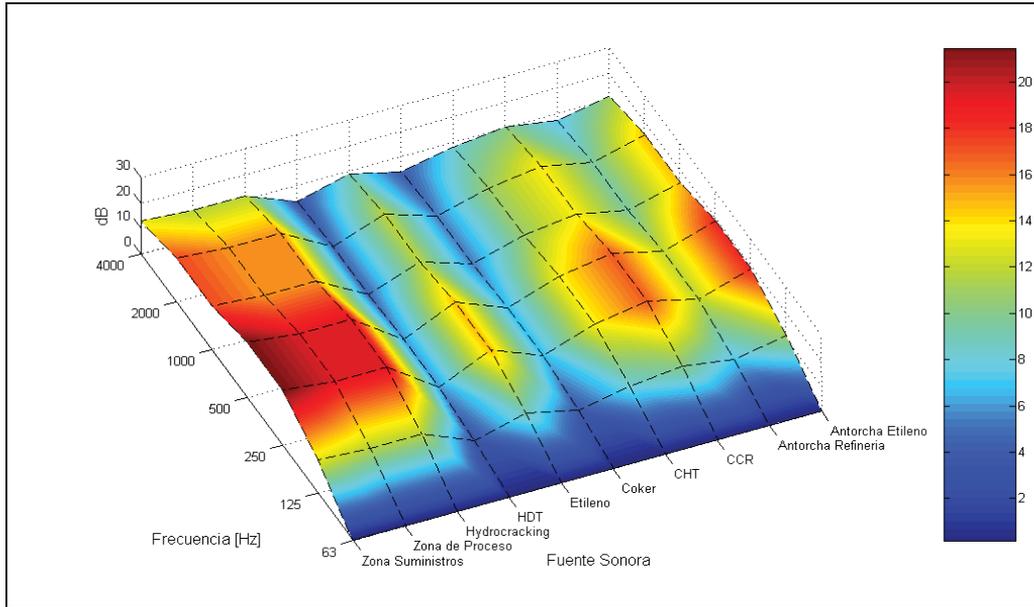
#### 4.5.1.4. Atenuación por propagación en sitios industriales $A_{site}$ .



**Figura 32.** Atenuación por propagación por sitios industriales hacia monitor maestraza.

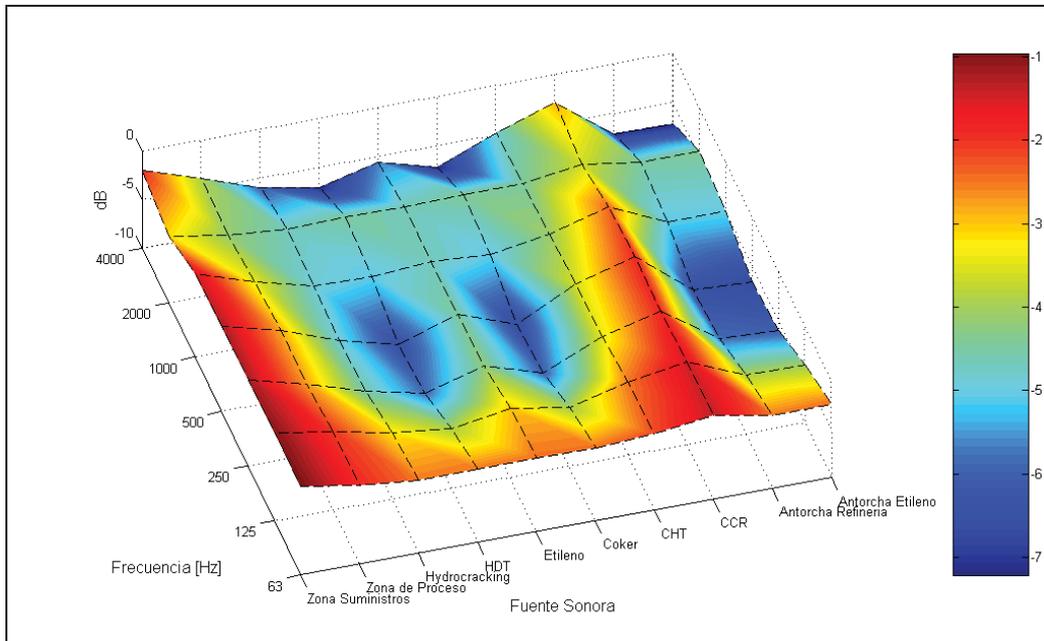


**Figura 33.** Atenuación por propagación por sitios industriales hacia monitor 4 sur.

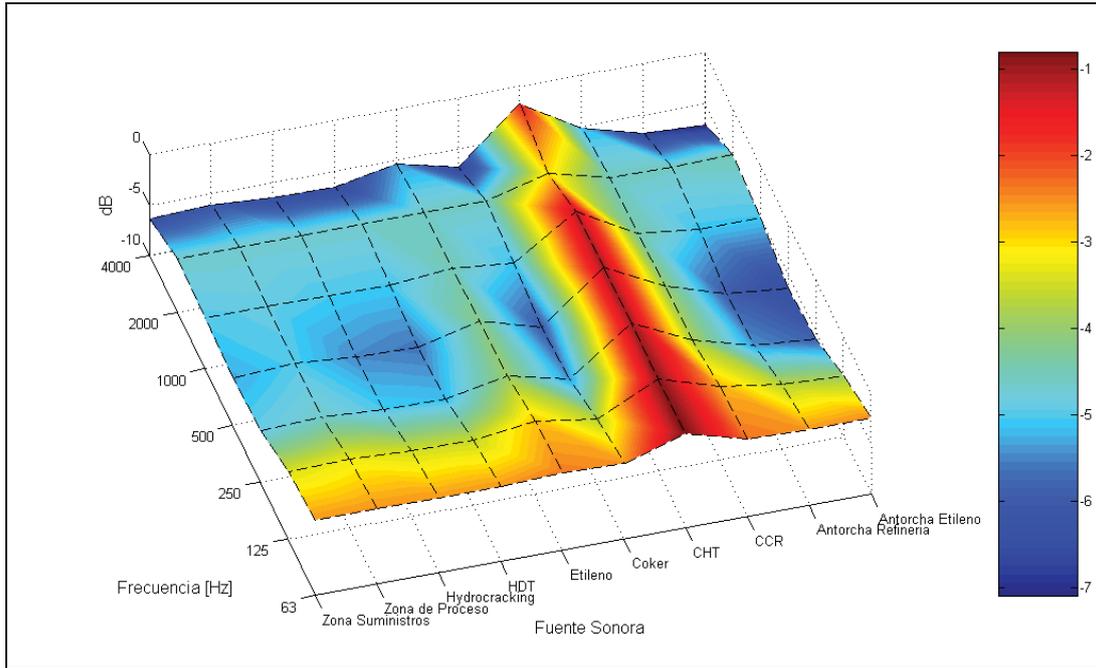


**Figura 34.** Atenuación por propagación por sitios industriales hacia monitor 7 sur.

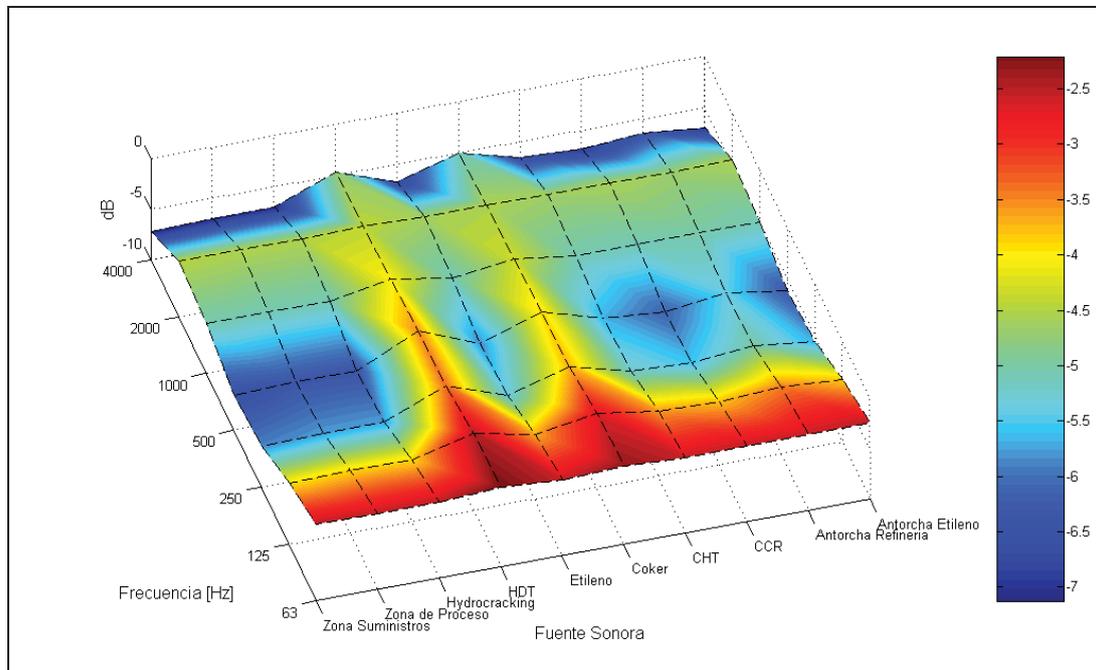
4.5.1.5. Corrección meteorológica  $K_4(C_{met6})$ .



**Figura 35.** Corrección meteorológica entre fuentes sonoras y monitor maestranza.

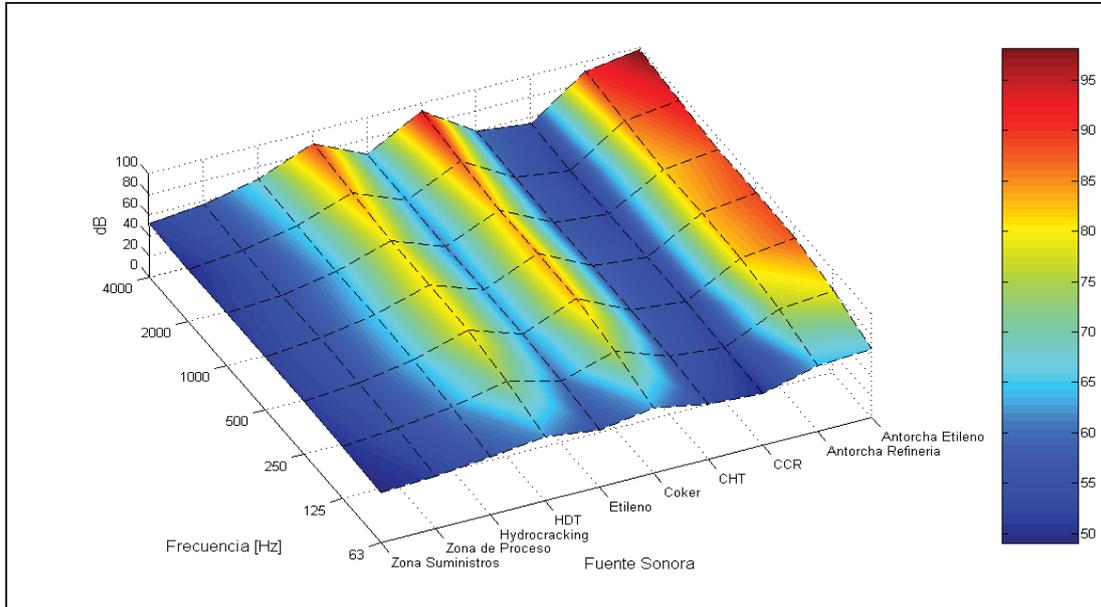


**Figura 36.** Corrección meteorológica entre fuentes sonoras y monitor 4 sur.

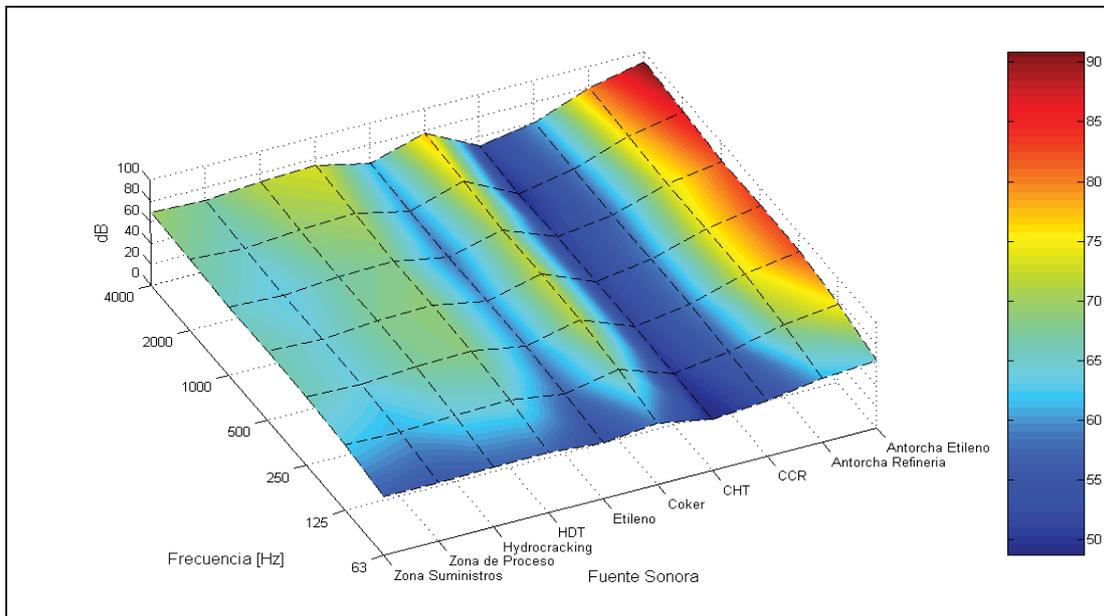


**Figura 37.** Corrección meteorológica entre fuentes sonoras y monitor 7 sur.

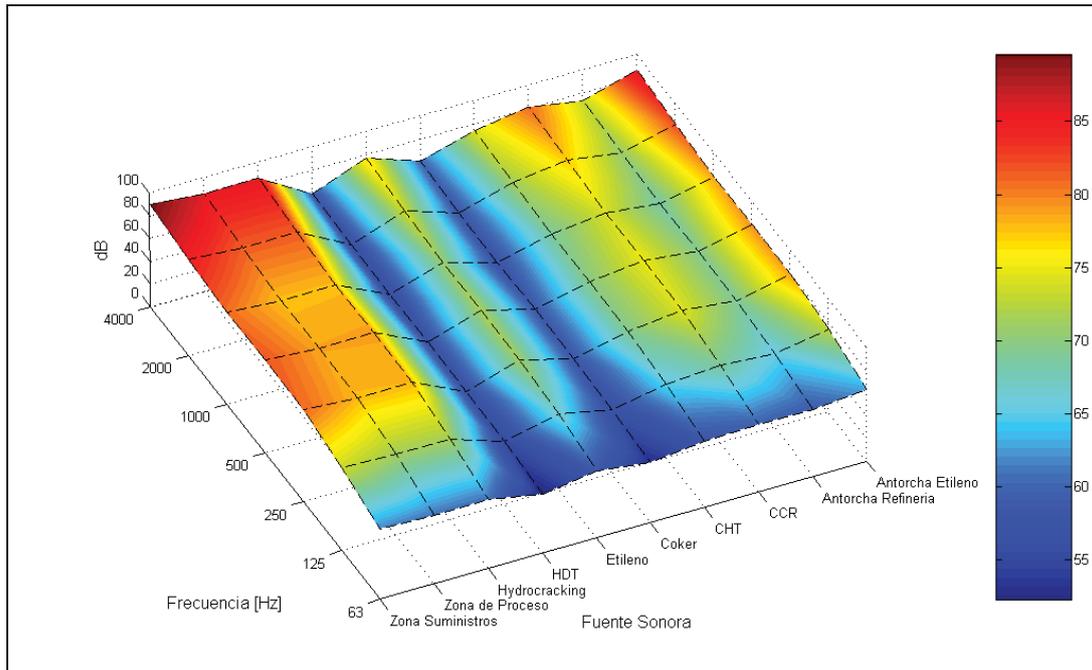
#### 4.5.1.6. Atenuación total.



**Figura 38.** Atenuación total entre fuentes sonoras y monitor maestranza.



**Figura 39.** Atenuación total entre fuentes sonoras y monitor 4 sur.



**Figura 40.** Atenuación total entre fuentes sonoras y monitor 7 sur.

#### 4.5.2. Conclusiones.

##### 4.5.2.1. Monitor maestranza.

- Los principales efectos de atenuación de la atmósfera se concentran para HDT, Coker, y las Antorchas Refinería y Etileno, fuentes sonoras ubicadas a más de 800 m del monitor de ruido.
- En relación a la atenuación por efectos del suelo, la consideración de suelo duro genera curvas idénticas de atenuación en el espectro de cada una de las fuentes sonoras. Así también, producto de las distancias y de la relación de alturas entre fuentes y monitor, los mayores efectos de atenuación se presentan para las Antorchas, CCR, CHT, y las Zonas de Proceso y Suministros.

- En cuanto a la atenuación por propagación en sitios industriales, los mayores efectos se presentan para HDT, Coker y las Antorchas.
- Con respecto a la corrección meteorológica, se observa un comportamiento similar entre HDT - Coker, CHT - Zona de Proceso, y CCR - Zona Suministros. La similitud se relaciona con distancias similares hacia el monitor de ruido. Por otro lado, existe un buen comportamiento de atenuación en el rango 63 – 250 Hz.
- Los mayores efectos de atenuación total se presentan para las plantas de proceso HDT, Coker, y las Antorchas Refinería y Etileno. La atenuación es mínima para las fuentes restantes.
- Finalmente, se concluye que el comportamiento acústico del monitor maestranza se encuentra altamente influenciado por las emisiones sonoras de la Zona de Proceso, Zona Suministros, CCR e Etileno.

#### 4.5.2.2. Monitor 4 Sur.

- Los principales efectos de atenuación atmosférica se concentran para las Antorchas.
- En relación a la atenuación por efectos del suelo, la consideración de suelo duro genera curvas idénticas de atenuación en el espectro de cada una de las fuentes sonoras. Los mayores efectos de atenuación se presentan para las Antorchas y CHT.
- En cuanto a la atenuación por propagación en sitios industriales, los mayores efectos se presentan para las Antorchas. Así también, la atenuación para la Zona de Proceso, Zona Suministros, Hydrocracking, HDT y Coker presenta un comportamiento similar en torno a los 10 dB para el rango 250 – 4000 Hz. La atenuación para CHT y CCR es mínima (fuentes cercanas).

- Con respecto a la corrección meteorológica, la atenuación es máxima para CHT. El resto de fuentes sonoras presenta un comportamiento similar. Así también, existe un buen comportamiento en la atenuación de frecuencias bajas.
- Los mayores efectos de atenuación total se presentan para las Antorchas. La atenuación es mínima para CHT y CCR.
- Finalmente, se concluye que el comportamiento acústico del monitor 4 sur se encuentra altamente influenciado por las emisiones sonoras de CHT, CCR e Etileno.

#### 4.5.2.3. Monitor 7 Sur.

- Los principales efectos de atenuación atmosférica se concentran para la Zona de Proceso y Zona Suministros.
- Al igual que en los casos anteriores la consideración de suelo duro para la atenuación por efectos del suelo genera curvas idénticas de atenuación en el espectro de cada una de las fuentes sonoras. El mayor efecto de atenuación se presenta para las Antorchas.
- En cuanto a la atenuación por propagación en sitios industriales, los mayores efectos se presentan para la Zona de Proceso, Zona Suministros, CCR y Antorcha Etileno. Así también, la atenuación para Etileno, CHT, y Antorcha Refinería presenta un comportamiento similar en torno a las 10 dB para el rango 250 – 4000 Hz. La atenuación para HDT y Coker es mínima (fuentes cercanas).
- Con respecto a la corrección meteorológica, la atenuación es máxima para HDT y Coker. El resto de fuentes sonoras presenta un comportamiento similar. Existe un buen comportamiento en la atenuación de frecuencias bajas.

- Los mayores efectos de atenuación total se presentan para la Zona de Proceso, Zona Suministros, Antorcha Etileno, y CCR. La atenuación total es mínima para HDT y Coker.
- Finalmente, se concluye que el comportamiento acústico del monitor 7 sur se encuentra altamente influenciado por las emisiones sonoras de HDT y Coker.

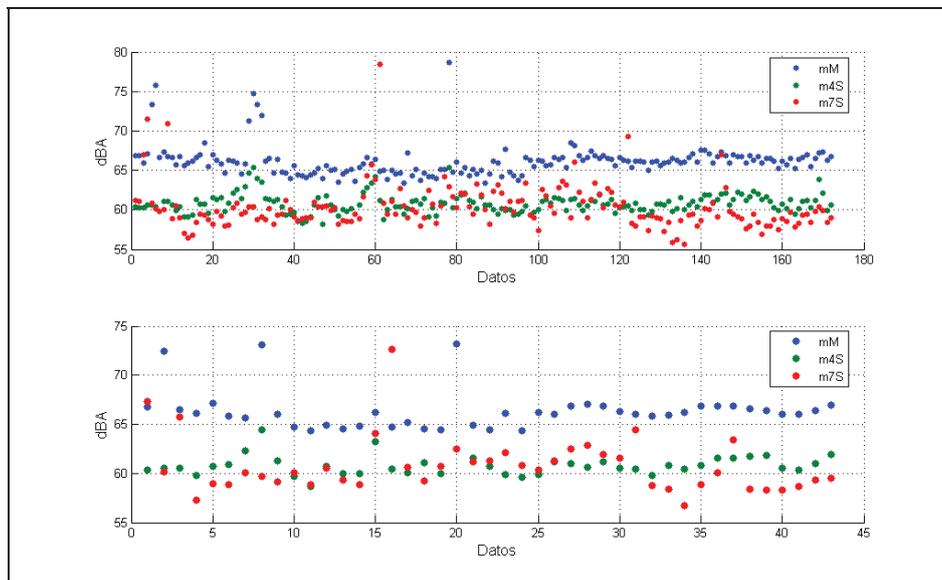
## 5. CORRELACIÓN.

La Tabla 19 presenta el nivel de presión sonora en banda ancha para cada monitor de ruido (dato comparativo).

**Tabla 19.** Proyección de nivel de presión sonora total.

LAT [dBA]	Monitor maestranza	Monitor 4 sur	Monitor 7 sur
	75.38	68.65	63.20

En la figura siguiente se observa el comportamiento de los monitores de ruido durante el intervalo específico de jornada laboral, 9:00 – 13:00 hrs. El plot superior corresponde a 4 lecturas de  $L_{eqA \text{ hora}}$  y el inferior a un  $L_{eqA \text{ Intervalo}}$  para cada uno de los 43 días del periodo de estudio.



**Figura 41.** Diagrama de dispersión lectura monitores de ruido.

Para ambos casos, se calcula la diferencia entre la proyección y el monitoreo de ruido de acuerdo a la ecuación (5.1).

$$Error = |L_{AT} - L_k| \quad \text{dBA} \quad (5.1)$$

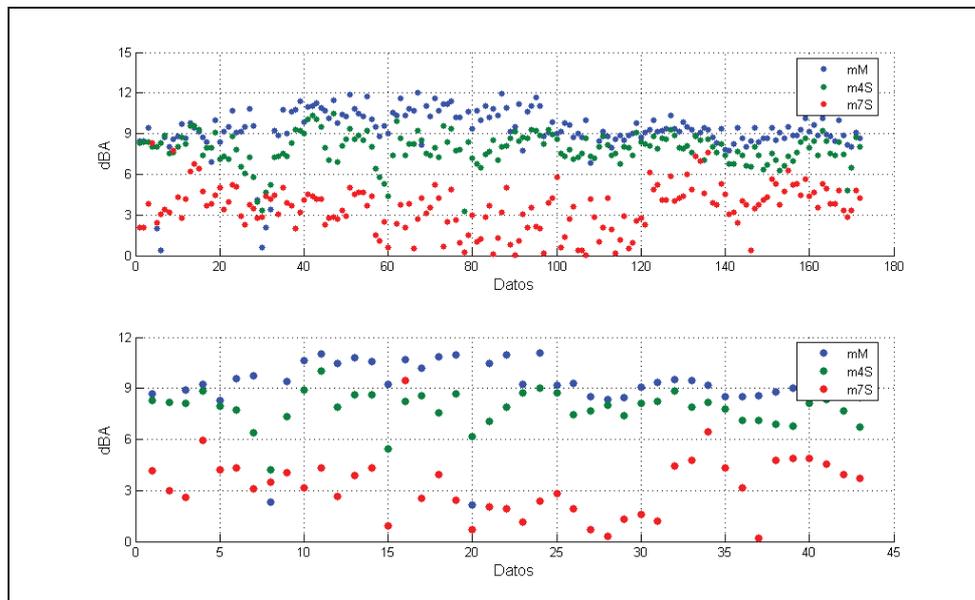
donde,  $L_k$  es el nivel equivalente en el k-ésimo monitor de ruido.

### 5.1. Resultados.

Los resultados se presentan en la Tabla 20 mediante descriptores estadísticos. En la figura 42 se observa la dispersión del error para las dos situaciones indicadas anteriormente.

**Tabla 20.** Error modelo de predicción.

Descriptor	mM [dBA]	m4S [dBA]	m7S [dBA]
Media aritmética	9,26	7,86	3,56
Mediana	9,33	8,00	3,72
Desviación estándar	1,80	1,19	1,90



**Figura 42.** Diagrama de dispersión error proyección - monitoreo.

## 6. CONCLUSIONES FINALES.

- El modelo de predicción no presenta resultados satisfactorios. Para todos los monitores de ruido, el error proyección – monitoreo de ruido excede la cota de  $\pm 3$  dB indicada como limitación del método ISO9613-2; criterio de correlación óptima.
- Las fallas del método de predicción se relacionan con la no consideración de los apantallamientos entre plantas de proceso. La consideración de atenuación por propagación por sitios industriales presentada en ISO9613-2 no es suficiente para estimar la atenuación del frente de onda a través de las instalaciones de proceso de la Refinería Bío-Bío. Sin embargo, existe un resultado considerable para el monitor 7 sur; monitor menos susceptible a la consideración de apantallamientos.
- Así también, a la luz de los resultados, el intervalo específico de jornada laboral seleccionado no es adecuado para los cálculos de predicción, situación corroborada por el comportamiento de los monitores de ruido. Una evaluación futura del modelo debe considerar el intervalo 00:00 – 7:00 hrs., intervalo donde las fuentes sonoras externas a la evaluación se minimizan y el comportamiento de las plantas de proceso es estable, obteniéndose menos oscilaciones en la lectura de los monitores de ruido.
- Finalmente, la metodología presentada en esta tesis de titulación es una buena aproximación para cuantificar el impacto acústico de las plantas de proceso en el sistema de monitoreo continuo de ruido de la Refinería Bío-Bío. Se indican directrices para implementar las mejoras respectivas, situación que requerirá la utilización de un software de predicción sonora para efectos de modelamiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA.

[1] Suárez, E. (2005). *Curso de Acústica Ambiental*. Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile.

[2] Sommerhoff, G. (2001). *Medición y Análisis de la Respuesta al Ruido Comunitario en la Ciudad de Valdivia utilizando Variables Sico fisiológicas, Sociológicas y de Valoración Económica*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España.

[3] Guzmán, F. (2006). *Implementación de una Red de Monitoreo Continuo de Ruido en Enap Refinerías Bío-Bío*. Tesis Escuela de Ingeniería Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.

[4] Comisión de las Comunidades Europeas. (1996). *Libro Verde de la Comisión Europea - Política Futura de Lucha Contra el Ruido*. Bruselas.

[5] Brüel & Kjaer (2000). *Environmental Noise Booklet*. Brüel & Kjaer Library, [www.bksv.com](http://www.bksv.com).

[6] Collados, E. (2000). *Costo Social del Ruido Urbano en Santiago de Chile*. Congresos Nacionales de Acústica – 31ª Tecniacústica. Madrid, España. 2000.

[7] Conama (2000). *Medición de Índices de Contaminación Acústica en Tres Zonas Urbanas del País, Comunas de Iquique, Valparaíso y Temuco*. VII Seminario Contaminación Acústica y Control de Ruido Ambiental - Mapas de Ruido. Santiago, Chile. 2006.

[8] Pérez, M. A. (1997). *Desarrollo y Aplicación de una Metodología Simple para la Determinación de Índices de Contaminación Acústica en una Zona Urbana, caso Comuna*

*de Talcahuano*. Tesis Escuela Ingeniería Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.

[9] Conama (2005). *Caracterización Acústica de la Ciudad de Castro*. Convenio Ilustre Municipalidad de Castro y Comisión Nacional del Medio Ambiente. Chile.

[10] Gerges, S.N.Y.; Arenas, J.P. (2004). *Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones*. NR Editora, Florianópolis.

[11] Möser, M.; J.L. Barros (2004). *Ingeniería Acústica, Teoría y Aplicaciones*. Valdivia.

[12] Falch, E. (1997). *Guía Ambiental: Manejo de Problemas de Ruido en la Industria Minera*. Por Encargo del Ministerio de Energía y Minas. Perú.

[13] International Organization for Standardization (1993). *International Standard ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere*. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics. [www.iso.org](http://www.iso.org).

[14] International Organization for Standardization. (1996). *International Standard ISO 9613-2:1996, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 2: General Method of Calculation*. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics. [www.iso.org](http://www.iso.org).

[15] Conservation of Clear Air and Water in Europe (CONCAWE) (1981). *The Propagation of Noise from Petroleum and Petrochemical Complexes to Neighbouring Communities*. Report N° 4/81. [www.concawe.org](http://www.concawe.org)

[16] International Organization for Standardization. (1994). *International Standard ISO 8297:1994, Acoustics – Description of Sound Power Levels of Multisource Industrial Plants for Evaluation of Sound Pressure Levels in the Environment – Engineering Method*. Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics. [www.iso.org](http://www.iso.org).

- [17] Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES) (1997). *Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas*. Decreto Supremo N° 146 del 24 de Diciembre de 1997. Chile.
- [18] Alton, F. (2001). *The Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill, New York.
- [19] Riquelme, G. (2007). *Estudio del Ruido de Tráfico Vehicular de la Avenida Ribera Norte Sector Industrial Talcahuano mediante Modelos de Propagación*. Tesis Escuela de Ingeniería Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia. Chile.
- [20] Beranek, L. (1996). *Acoustics*. Acoustical Society of America, New York.
- [21] Larson Davis Inc. (2003). *System 824 - Reference Manual*, [www.larsondavis.com](http://www.larsondavis.com).
- [22] MATLAB® 7 (2004). *Release 14 (R14)*, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).
- [23] HFP Acoustical Consultants (2008), [www.hfpacoustical.com](http://www.hfpacoustical.com).
- [24] Petrox S.A. (2007). *La Gestión de la Refinación del Petróleo*. Dirección de Proyectos y Medio Ambiente.
- [25] Gary, J. (2002). *Petroleum Refining, Technology and Economics*, Marcel Dekker Inc., New York.
- [26] SIM LTDA. (2003). *Instalación Monitores de Ruido en Refinería, Ingeniería de Detalles Instrumental*.

## 8. ANEXOS.

### 8.1. Generación CCR.

```
function[Aatm,Agr,Adiv,A,DSPi,CS,Lft,LftBA,LpiBA,Sx,Sy,CG]=generacion(Pi,cM,cP,Lpi,Lw,a,dx,dy,hS,LCCR);

%Joaquín Stevens Castro
%Tesisista.
%Ingeniería Civil Acústica
%Universidad Austral de Chile
%Departamento de Calidad y Medio Ambiente
%Enap S.A., Refinería Bío-Bío.

%Fecha: 4 de noviembre 2008.
%-----

%GENERACIÓN_CCR.
%*****

%ENTRADAS.
%-----
% L: Dimensiones Planta de Proceso.
% Pi: Coordenadas i-ésima Posición de Micrófono.
% cM: Vértices Contorno de Medición.
% cP: Vértices Plantas de Proceso.
% Lpi: Nivel de Presión Sonora i-ésima Posición de Micrófono en Bandas de Frecuencia.
% a: Coeficiente de Atenuación Atmosférica.
% Lw: Nivel de Potencia Sonora Planta de Proceso.
% dx: Delta X Grilla de Fuentes Sonoras.
% dy: Delta Y Grilla de Fuentes Sonoras.
% hS: Altura Fuentes Sonoras.
%-----
```

```

%SALIDAS.
%-----
% Aatm: Atenuación Atmosférica.
% Agr: Atenuación por Efectos del Suelo.
% Adiv: Atenuación por Divergencia Geométrica.
% A: Atenuación Total.
% CS: Coordenadas Fuentes Puntuales.
% Lft: Predicción de Nivel de Presión Sonora en i-ésima Posición de Micrófono en Bandas de Frecuencia
% por cada fuente de prueba.
% LftBA: Predicción de Nivel de Presión Sonora en i-ésima Posición de Micrófono en Banda Ancha por cada
% fuente de prueba.
% LpiBA: Nivel de Presión Sonora i-ésima Posición de Micrófono en Banda Ancha.
% CG: Centro geométrico CCR.
%-----

%1.Coordenadas Fuentes Puntuales (SC1), Potencia Fuentes Puntuales (LW), Distancia Fuentes Puntuales a
%Puntos de Medición (DSPi).
%-----

lpx=abs(cP(1,1)-cP(3,1));
lpy=abs(cP(1,2)-cP(2,2));

[Sx,Sy]=meshgrid(0:dx:lpx,0:dy:lpy);

Ss=size(Sx);
MSs=Ss(1)*Ss(2);
SPi=size(Pi);
CPi= repmat(Pi,[1 1 MSs]);

Lwl=reshape(Lw,[1 1 9]);
LW= repmat(Lwl,Ss(1),Ss(2));

Sz=hS*ones(1,Ss(1),Ss(2));

Sxl=reshape(Sx,MSs,1);
Syl=reshape(Sy,MSs,1);
Szl=reshape(Sz,MSs,1);

```

```

Sx2=reshape(Sx1,[1 1 MSs]);
Sy2=reshape(Sy1,[1 1 MSs]);
Sz2=reshape(Sz1,[1 1 MSs]);

CS=cat(2,Sx2,Sy2,Sz2);
CS=repmat(CS,[SPi(1) 1 1]);

Op=repmat(cP(1,1:3),[SPi(1) 1 MSs]);

CS=CS+Op;

DifC=(CS-CPi).^2;
SumC=sum(DifC,2);

DSPi=sqrt(SumC);

DSPi=reshape(DSPi,SPi(1),MSs);

%1.-----
%2.Atenuación Atmosférica (Aatm).
%-----

SDSPi=size(DSPi);

a1=reshape(a,[1 1 9]);
a2=repmat(a1,SDSPi(1),SDSPi(2));

DSPi1=repmat(DSPi,[1 1 9]);

Aatm=a2.*DSPi1;

%2.-----
%3.Atenuación por Divergencia Geométrica (Adiv).
%-----

```

```

Adiv=20*log10(DSPi)+11;

Adiv= repmat(Adiv,[1 1 9]);

%3.-----

%4. Atenuación por Efectos del Suelo (Agr).
%-----

G=[0 0 0];
G=reshape(G,[1 1 3]);
G=repmat(G,[SDSPi(1) SDSPi(2) 1]);

h=[hS 0 cM(1,3)];
h=reshape(h,[1 1 3]);
h=repmat(h,[SDSPi(1) SDSPi(2) 1]);

DSPi2=repmat(DSPi,[1 1 3]);

ap=1.5+3.0.*exp(-0.12*(h-5).^2).*(1-exp(-DSPi2./50))+5.7.*exp(-0.09*h.^2).*(1-exp(-2.8*10.^(-6*DSPi2.^2)));
bp=1.5+8.6.*exp(-0.09*h.^2).*(1-exp(-DSPi2./50));
cp=1.5+14.*exp(-0.46*h.^2).*(1-exp(-DSPi2./50));
dp=1.5+5.*exp(-0.9*h.^2).*(1-exp(-DSPi2./50));

q=1-30*[h(:,:,1)+h(:,:,3)]./(DSPi2(:,:,2));
F=find(q<=0);
q(F)=0;

As=zeros([SDSPi(1),SDSPi(2),9]);
Am=zeros([SDSPi(1),SDSPi(2),9]);
Ar=zeros([SDSPi(1),SDSPi(2),9]);

As(:,:,1)=-1.5;
As(:,:,2)=-1.5;
As(:,:,3)=-1.5 + G(:,:,1).*ap(:,:,1);
As(:,:,4)=-1.5 + G(:,:,1).*bp(:,:,1);

```

```

As(:,:,5)=-1.5 + G(:,:,1).*cp(:,:,1);
As(:,:,6)=-1.5 + G(:,:,1).*dp(:,:,1);
As(:,:,7)=-1.5.*(1 - G(:,:,1));
As(:,:,8)=-1.5.*(1 - G(:,:,1));
As(:,:,9)=-1.5.*(1 - G(:,:,1));

```

```

Am(:,:,1)=-3.*q;
Am(:,:,2)=-3.*q;
Am(:,:,3)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,4)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,5)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,6)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,7)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,8)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,9)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));

```

```

Ar(:,:,1)=-1.5;
Ar(:,:,2)=-1.5;
Ar(:,:,3)=-1.5 + G(:,:,3).*ap(:,:,3);
Ar(:,:,4)=-1.5 + G(:,:,3).*bp(:,:,3);
Ar(:,:,5)=-1.5 + G(:,:,3).*cp(:,:,3);
Ar(:,:,6)=-1.5 + G(:,:,3).*dp(:,:,3);
Ar(:,:,7)=-1.5.*(1 - G(:,:,3));
Ar(:,:,8)=-1.5.*(1 - G(:,:,3));
Ar(:,:,9)=-1.5.*(1 - G(:,:,3));

```

```

Agr=As+Am+Ar;

```

```

%4.-----

```

```

%5.Equivalent Continuous Downwind Octave-Band Sound Pressure Level at a Receiver Location (Lft),
%Atenuación Total (A).

```

```

%-----

```

```

A=Adiv + Aatm + Agr;

```

```

LWl=repmat(Lw1,SPi(1),MSs);

```

```

Lft=LW1-A;

%5.-----

%6.Delimitación del Ancho de Banda de Trabajo (63 - 4000 Hz) y Nivel en Banda Ancha (LpmBA, LftBA).
%-----

Lpi1=Lpi(:,2:8);
Lft1=Lft(:,2:8);

LpiBA=10*log10(sum(10.^(0.1*Lpi1),2));
LftBA=10*log10(sum(10.^(0.1*Lft1),3));

sLftBA=size(LftBA);

CS1=CS(1,:);
sCS1=size(CS1);

CS2=reshape(CS1,[3 sCS1(3) 1]);
CS2=CS2';

CS=CS2;

%6.-----

%7.Centro Geométrico (CG)
%-----

CG=LCCR/2+cP(1,1:2)

%7.-----
%*****

```

## 8.2. Análisis de error CCR.

```
function[eiT,CeiT1,eiT1,CS1,LftBA1,CefT,CS2,efT1,LftBA2,CA]=analisiserror(CS,LftBA,LpiBA);

%Joaquín Stevens Castro
%Tesisista.
%Ingeniería Civil Acústica
%Universidad Austral de Chile
%Departamento de Calidad y Medio Ambiente
%Enap S.A., Refinería Bío-Bío.

%Fecha: 4 de noviembre 2008.
%-----

%ANÁLISIS DE ERROR_CCR.
%*****

%ENTRADAS.
%-----
%   CS: Coordenadas fuentes de prueba.
% LftBA: Predicción de nivel de presión sonora en i-ésima posición de micrófono en banda ancha por cada
%       fuente de prueba.
% LpiBA: Nivel de presión sonora en i-ésima posición de micrófono en banda ancha.
%-----

%SALIDAS.
%-----
%   eiT: Error inicial total.
% CeiT1: Cota de error inicial total (error mínimo).
%   eiT1: eiT fuentes sonoras de prueba lera selección.
%   CS1: Coordenadas fuentes sonoras de prueba lera selección.
% LftBA1: LftBA fuentes sonoras de prueba lera selección.
%   CefT: Cota de error final total.
%   CS2: Coordenadas fuentes sonoras de prueba 2da selección.
%   efT1: Error final fuentes sonoras de prueba 2da selección.
% LftBA2: LftBA fuentes sonoras de prueba 2da selección.
```

```

%      CA: Centro Acústico.
%-----

%1.Fuentes sonoras de prueba 1era selección.
%-----

SLftBA=size(LftBA);
LpiBA_C= repmat(LpiBA,1,SLftBA(2));

ei=abs(LftBA-LpiBA_C);

eiT=mean(ei,1);

[nHist1,cHist1]=hist(eiT,10);
a2Hist1=abs(cHist1(1)-cHist1(2))/2;

CeiT1=cHist1(1)+a2Hist1;

feiT1=find(eiT<CeiT1);

LftBA1=LftBA(:,feiT1);
CS1=CS(feiT1,:);
eiT1=eiT(feiT1);

%1.-----

%2.Fuentes sonoras de prueba 2da selección.
%-----

[nHist2,cHist2]=hist(eiT1,5);
a2Hist2=abs(cHist2(1)-cHist2(2))/2;

LftBA2=LftBA1(:,feiT);
CS2=CS1(feiT,:);

```

```

CefT=cHist2(1)+a2Hist2;

fefT=find(eiT1<CefT);

efT1=eiT1(fefT);

%2.-----

%3.Centro Acústico (CA).
%-----

D=max(CS2)-min(CS2);

CA=min(CS2)+D/2;

%3.-----

%4.Gráficos.
%-----

subplot(2,2,1),hist(eiT,10),title('Error inicial CCR');
subplot(2,2,2),hist(eiT1,5),title('Error final CCR');
subplot(2,2,3),plot(CS1(:,1),CS1(:,2),'ob'),title('Fuentes sonoras lera selección CCR');
subplot(2,2,4),plot(CS2(:,1),CS2(:,2),'ob',CA(1),CA(2),'or'),title('Centro Acústico CCR');

%4.-----
%*****

```

### 8.3. Algoritmo de predicción.

```
function[DFP_MR,Aatm,Agr,Adiv,Asite,K4Cmet6,A,Lft_FP_MR,LftA_FP_MR,LAT_T]=prediccion(Lw,cFP,cMR);

%Joaquín Stevens Castro
%Tesisista.
%Ingeniería Civil Acústica
%Universidad Austral de Chile
%Departamento de Calidad y Medio Ambiente
%Enap Refinerías S.A., Refinería Bío-Bío

%Fecha: 14 de noviembre 2008.
%-----

%ALGORITMO DE PREDICCIÓN.
%*****

%ENTRADAS.
%-----
%           Lw: Nivel de potencia sonora planta de proceso (dB).
%           cFP: Coordenadas fuentes puntuales (m).
%           cMR: Coordenadas monitores de ruido (m).
%-----

%SALIDAS.
%-----
%           DFP_MR: Distancia entre fuentes puntuales y monitores de ruido.
%           Aatm: Atenuación atmosférica.
%           Agr: Atenuación por efectos del suelo.
%           Adiv: Atenuación por divergencia geométrica.
%           Asite: Atenuación por propagación en sitios industriales.
%           K4Cmet6: Atenuación por efectos meteorológicos categoría 6.
%           A: Atenuación total.
%           Lft_FP_MR: Nivel de presión sonora en bandas de octava de cada fuente puntual en los monitores de
%           ruido.
%           LftA_FP_MR: Nivel de presión sonora ponderado "A" en bandas de octava de cada fuente puntual en los
%           monitores de ruido.
```

```

% mM_Adiv: Atenuación por divergencia geométrica monitor maestranza.
% mM_Agr: Atenuación por efectos del suelo monitor maestranza.
% mM_K4Cmet6: Atenuación por efectos meteorológicos categoría 6 monitor maestranza.
% mM_Asite: Atenuación por propagación en sitios industriales monitor maestranza.
% mM_A: Atenuación total monitor maestranza.
% m4S_Aatm: Atenuación atmosférica monitor 4 sur.
% m4S_Adiv: Atenuación por divergencia geométrica monitor 4 sur.
% m4S_Agr: Atenuación por efectos del suelo monitor 4 sur.
% m4S_K4Cmet6: Atenuación por efectos meteorológicos categoría 6 monitor 4 sur.
% m4S_Asite: Atenuación por propagación en sitios industriales monitor 4 sur.
% m4S_A: Atenuación total monitor 4 sur.
% m7S_Aatm: Atenuación atmosférica monitor 7 sur.
% m7S_Adiv: Atenuación por divergencia geométrica monitor 7 sur.
% m7S_Adiv: Atenuación por divergencia geométrica monitor 7 sur.
% m7S_Agr: Atenuación por efectos del suelo monitor 7 sur.
% m4S_K4Cmet6: Atenuación por efectos meteorológicos categoría 6 monitor 7 sur.
% m7S_Asite: Atenuación por propagación en sitios industriales monitor 7 sur.
% m7S_A: Atenuación total monitor 7 sur.
%-----

```

```

%1. Distancia entre fuentes puntuales y monitores de ruido (DFP_MR).
%-----

```

```

ScFP=size(cFP);

```

```

RcFP= repmat(cFP,[1 1 3]);
cFP1=RcFP;

```

```

cMR=cMR';
RcMR=reshape(cMR,[1 3 3]);

```

```

cMR1=RcMR;
cMR2=repmat(cMR1,[ScFP(1) 1 1]);
DExyzFP_MR=abs(cFP1-cMR2);

```

```

DFP_MR = sqrt(sum(DExyzFP_MR.^2,2));

```

```

%1.-----

```

```

%2.Atenuación Atmosférica (Aatm).
%-----

SDFP_MR=size(DFP_MR);

a=[0.0001,0.0003,0.0011,0.0028,0.005,0.009,0.0229];

a1=reshape(a,[1 1 7]);
a2= repmat(a1,[SDFP_MR(1) SDFP_MR(2) 1]);

DFP_MR1=repmat(DFP_MR,[1 1 7]);

Aatm = a2.*DFP_MR1;

%2.-----

%3.Atenuación por Divergencia Geométrica (Adiv).
%-----

Adiv = 20*log10(DFP_MR)+11;

Adiv=repmat(Adiv,[1 1 7]);

%3.-----

%4.Atenuación por Efectos del Suelo (Agr).
%-----

G=[0 0 0];
G=reshape(G,[1 1 3]);
G=repmat(G,[SDFP_MR(1) SDFP_MR(2) 1]);

h=zeros([SDFP_MR 3]);
h(:,:,1)=repmat(cFP(:,3),[1 3]);
h(:,:,3)=repmat(cMR(3,:),[SDFP_MR(1) 1]);

```

```

DFP_MR2= repmat(DFP_MR,[1 1 3]);

ap=1.5+3.0.*exp(-0.12*(h-5).^2).*(1-exp(-DFP_MR2./50))+5.7.*exp(-0.09*h.^2).*(1-exp(-2.8*10.^(-6*DFP_MR2.^2)));
bp=1.5+8.6.*exp(-0.09*h.^2).*(1-exp(-DFP_MR2./50));
cp=1.5+14.*exp(-0.46*h.^2).*(1-exp(-DFP_MR2./50));
dp=1.5+5.*exp(-0.9*h.^2).*(1-exp(-DFP_MR2./50));

q=1-30*[h(:,:,1)+h(:,:,3)]./(DFP_MR2(:,:,2));
F=find(q<=0);
q(F)=0;

As=zeros([SDFP_MR(1),SDFP_MR(2),7]);
Am=zeros([SDFP_MR(1),SDFP_MR(2),7]);
Ar=zeros([SDFP_MR(1),SDFP_MR(2),7]);

As(:,:,1)=-1.5;
As(:,:,2)=-1.5 + G(:,:,1).*ap(:,:,1);
As(:,:,3)=-1.5 + G(:,:,1).*bp(:,:,1);
As(:,:,4)=-1.5 + G(:,:,1).*cp(:,:,1);
As(:,:,5)=-1.5 + G(:,:,1).*dp(:,:,1);
As(:,:,6)=-1.5.*(1 - G(:,:,1));
As(:,:,7)=-1.5.*(1 - G(:,:,1));

Am(:,:,1)=-3.*q;
Am(:,:,2)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,3)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,4)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,5)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,6)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));
Am(:,:,7)=-3.*q.*(1 - G(:,:,2));

Ar(:,:,1)=-1.5;
Ar(:,:,2)=-1.5 + G(:,:,3).*ap(:,:,3);
Ar(:,:,3)=-1.5 + G(:,:,3).*bp(:,:,3);
Ar(:,:,4)=-1.5 + G(:,:,3).*cp(:,:,3);
Ar(:,:,5)=-1.5 + G(:,:,3).*dp(:,:,3);

```

```

Ar(:, :, 6)=-1.5.*(1 - G(:, :, 3));
Ar(:, :, 7)=-1.5.*(1 - G(:, :, 3));

Agr=As+Am+Ar;

%4.-----
%5.Atenuación Por Sitios Industriales (Asite).
%-----

asite=[0,0.015,0.025,0.025,0.02,0.02,0.015];

asite1=reshape(asite,[1 1 7]);
asite2= repmat(asite1,[SDFP_MR(1) SDFP_MR(2)]);

DFP_MR3=repmat(DFP_MR,[1 1 7]);

Asite=asite2.*DFP_MR3;

%5.-----
%6.Atenuación por Efectos Meteorológicos (K4Cmet6).
%-----

Cmet63_6 = 69.3 - 73.2*log10(DFP_MR) + 24.688*(log10(DFP_MR)).^2 - 2.7531*(log10(DFP_MR)).^3;
Cmet125_6 = 29.5 - 25.62*log10(DFP_MR) + 6.286*(log10(DFP_MR)).^2 - 0.4904*(log10(DFP_MR)).^3;
Cmet250_6 = 31.7 - 23.81*log10(DFP_MR) + 4.055*(log10(DFP_MR)).^2 - 0.1043*(log10(DFP_MR)).^3;
Cmet500_6 = 19.8 - 8.8*log10(DFP_MR) - 2.035*(log10(DFP_MR)).^2 + 0.6747*(log10(DFP_MR)).^3;
Cmet1000_6 = 123.4 - 127.6*log10(DFP_MR) + 42.017*(log10(DFP_MR)).^2 - 4.584*(log10(DFP_MR)).^3;
Cmet2000_6 = 82.3 - 90.98*log10(DFP_MR) + 31.444*(log10(DFP_MR)).^2 - 3.584*(log10(DFP_MR)).^3;
Cmet4000_6 = 66.4 - 60.77*log10(DFP_MR) + 16.409*(log10(DFP_MR)).^2 - 1.4457*(log10(DFP_MR)).^3;

K4Cmet6(:, :, 1)=Cmet63_6;
K4Cmet6(:, :, 2)=Cmet125_6;
K4Cmet6(:, :, 3)=Cmet250_6;

```

```

K4Cmet6(:, :, 4)=Cmet500_6;
K4Cmet6(:, :, 5)=Cmet1000_6;
K4Cmet6(:, :, 6)=Cmet2000_6;
K4Cmet6(:, :, 7)=Cmet4000_6;

%6.-----

%7.Atenuación Total (A), Lft_FP_MR, LftA_FP_MR, LAT_T.
%-----

A = Aatm + Adiv + Agr + Asite + K4Cmet6;

Lw1=reshape(Lw,[SDFP_MR(1) 1 7]);
Lw2=repmat(Lw1,[1 SDFP_MR(2) 1]);

dBA=[-26.2,-16.1,-8.9,-3.2,0,1.2,1];

dBA1=reshape(dBA,[1 1 7]);
dBA2=repmat(dBA1,[SDFP_MR(1) SDFP_MR(2) 1]);

Lft_FP_MR = Lw2 - A;

LftA_FP_MR = Lft_FP_MR + dBA2;

S1=sum(10.^(0.1*LftA_FP_MR),3);
S2=sum(S1,1);

LAT_T=10*log10(S2);

%7.-----

%8.Análisis de atenuaciones por monitor de ruido.
%-----

```

```
%8.1.Monitor Maestranza.
```

```
%-----
```

```
mM_Aatm=Aatm(:,1,:);  
mM_Aatm=reshape(mM_Aatm,[10 7 1]);
```

```
mM_Adiv=Adiv(:,1,:);  
mM_Adiv=reshape(mM_Adiv,[10 7 1]);
```

```
mM_Agr=Agr(:,1,:);  
mM_Agr=reshape(mM_Agr,[10 7 1]);
```

```
mM_Asite=Asite(:,1,:);  
mM_Asite=reshape(mM_Asite,[10 7 1]);
```

```
mM_K4Cmet6=K4Cmet6(:,1,:);  
mM_K4Cmet6=reshape(mM_K4Cmet6,[10 7 1]);
```

```
mM_A=A(:,1,:);  
mM_A=reshape(mM_A,[10 7 1]);
```

```
%8.1.-----
```

```
%8.2.Monitor 4 Sur.
```

```
%-----
```

```
m4S_Aatm=Aatm(:,2,:);  
m4S_Aatm=reshape(m4S_Aatm,[10 7 1]);
```

```
m4S_Adiv=Adiv(:,2,:);  
m4S_Adiv=reshape(m4S_Adiv,[10 7 1]);
```

```
m4S_Agr=Agr(:,2,:);  
m4S_Agr=reshape(m4S_Agr,[10 7 1]);
```

```

m4S_Asite=Asite(:,2,:);
m4S_Asite=reshape(m4S_Asite,[10 7 1]);

m4S_K4Cmet6=K4Cmet6(:,2,:);
m4S_K4Cmet6=reshape(m4S_K4Cmet6,[10 7 1]);

m4S_A=A(:,2,:);
m4S_A=reshape(m4S_A,[10 7 1]);

%8.2.-----
%8.3.Monitor 7 Sur.
%-----

m7S_Aatm=Aatm(:,3,:);
m7S_Aatm=reshape(m7S_Aatm,[10 7 1]);

m7S_Adiv=Adiv(:,3,:);
m7S_Adiv=reshape(m7S_Adiv,[10 7 1]);

m7S_Agr=Agr(:,3,:);
m7S_Agr=reshape(m7S_Agr,[10 7 1]);

m7S_Asite=Asite(:,3,:);
m7S_Asite=reshape(m7S_Asite,[10 7 1]);

m7S_K4Cmet6=K4Cmet6(:,3,:);
m7S_K4Cmet6=reshape(m7S_K4Cmet6,[10 7 1]);

m7S_A=A(:,3,:);
m7S_A=reshape(m7S_A,[10 7 1]);

%8.-----
%*****

```