

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE UN MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO DEL
TRÁFICO VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD.**

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela**

Por los Bachilleres:

BORJAS C., Leonardo E.

SALAZAR D., Luis A.

**Para optar al título de
Ingeniero Mecánico.**

Caracas, 2.007.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE UN MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO DEL TRAFICO VEHICULAR EN VIAS DE ALTA DENSIDAD.

Tutor: Prof. Jorge E. Barillas P.

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres:
BORJAS C., Leonardo E.
SALAZAR D., Luis A.
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico.**

Caracas, 2.007.

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Luis A. Salazar D. y Leonardo E. Borjas C. titulado:

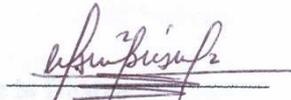
ESTUDIO DE UN MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO DEL TRAFICO VEHICULAR EN VIAS DE ALTA DENSIDAD.

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



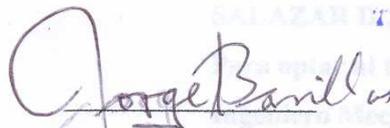
Prof. Carmen Rosa Hernández.

Jurado.



Prof. Manuel Martínez.

Jurado.



Prof. Jorge Barillas

Tutor Académico.



AGRADECIMIENTOS

A **Dios Creador**, por haberme dado la fuerza para cumplir todos los objetivos que me he propuesto en esta vida y los que cumpliré posteriormente.

A mis padres **Martha y Fernando, y César** mi Hermano, por preocuparse y darme todo su apoyo para el éxito de mis objetivos, y ofrecerme toda su confianza. Familia siempre presentes a través de todas las dificultades de mi vida. Ellos representan el amor del más alto sacrificio.

A la **Universidad Central de Venezuela**, así como a los profesores que dejaron en mi, grandes enseñanzas y experiencias que constituyeron en mi formación académica un gran aporte.

Al **Profesor Jorge Barillas**, por ser la persona que me ha brindado todas sus enseñanzas para obtener ese conocimiento adicional que siempre es útil para mi aprendizaje tanto como persona, como profesionalmente, y ejecutar con éxito este Trabajo Especial de Grado.

A mi novia **Lakshmi**, por estar 100% junto mi , tanto en las buenas como en las malas, apoyándose incondicionalmente, por ponerse en mis zapatos en muchas oportunidades y por ser la persona mas especial en mi vida y la que me incentiva a seguir luchando y seguir cumpliendo todas mis metas.

A mis amigos: **Anna Zia, Rafael Pannacci, Leizar Guzman, Johonny Urdaneta, José Gamboa**, quienes ofrecieron su tiempo, confianza, apoyo, buen humor en la elaboración de este trabajo.

En fin, a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a la finalización de esta meta. A todos GRACIAS.

Leonardo Borjas.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios Todopoderoso**, Padre Celestial y Misericordioso que ilumino mi camino en las dificultades, para así poder lograr mis metas, gracias padre que haz estado a mi lado protegiéndome y dándome la fortaleza para superar todas las adversidades.

A mis padres **Ines y Luis** que me apoyaron en todo momento, me ofrecieron sus consejos, me brindaron su ayuda, sus enseñanzas y conocimientos, indicándome el camino a seguir. Este, mi sueño, mi éxito, realmente es suyo, se los debo a ustedes, gracias por haber tenido fe en mí. Les estaré eternamente agradecido, los amo.

A mis hermanas **Evelyn y Yumarvic** que siempre creyeron en mi y me alentaron cuando creí que los objetivos eran inalcanzables. A **Johan** por brindarme su ayuda incondicional. Los quiero.

A mi novia **Maykely**, quien con sus habilidades y experiencia ofreció lo mejor de si para garantizar el éxito tanto de mi carrera de pregrado como de este Trabajo. Te amo.

A la **Universidad Central de Venezuela** y a todos los profesores que la integran, quienes me proporcionaron las herramientas para mejorar y ampliar mi formación académica. Al **Programa Samuel Robinsón** por abrirme las puertas de esta casa de estudio.

Al **Profesor Jorge Barillas** por ayudarme y orientarme en la realización de este Trabajo Especial de Grado.

A mis amigos y amigas: **Marcelo González, Miguel Martínez, Yenitza González, Gabriela Conde, Gabriel Mota**, por todos los momentos de buen humor y por su apoyo ilimitado.

Luis Salazar.

DEDICATORIA

***PARA LAS ALMAS
QUE CONSTRUYEN
SU PROPIO DESTINO***

LB

DEDICATORIA

A mi familia,
todos mis amigos
y a los estudiantes de la
Universidad Central de Venezuela.

LS

Borjas, Leonardo y Salazar, Luis.

**ESTUDIO DE UN MODELO DE GENERACIÓN DE RUIDO DEL TRÁFICO
VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD.**

**Tutor: Prof. Jorge E. Barillas P. Tesis, Caracas.
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
2.007**

Ruido, propulsión, rodadura, tráfico vehicular, medidas, contaminación acústica.

En este Trabajo Especial de Grado se realizó el estudio de un modelo de generación de ruido generado por el tráfico vehicular en vías de alta densidad, así como las medidas para el control de ruido, a partir del análisis y validación de diversos modelos físico-matemáticos desarrollados por varios investigadores. El ruido que se origina básicamente por el contacto del caucho con el pavimento (rolling noise) y por los mecanismos relacionados con la propulsión (propulsion noise).

Con respecto al control de ruido, se basa principalmente en barreras anti-ruido, las cuales son muros constituidos por elementos de pared relativamente delgada, verticales o inclinados, que ofrecen gran resistencia a la transmisión del sonido. Esta barrera es un obstáculo para el sonido, que interrumpe el camino entre el foco emisor y el receptor.

Con el modelo de generación de ruido obtenido se compiló un programa en computadora que facilita la toma de decisiones en el diseño, operación y mantenimiento de carreteras y autopistas.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos _____	iv
Dedicatorias _____	viii
Resumen _____	x
Índice General _____	xi
Índice de Figuras _____	xvii
Índice de Tablas _____	xix
Listado de Abreviaturas _____	xx
Listado de Unidades _____	xxi
INTRODUCCION _____	1
CAPÍTULO I _____	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA _____	3
1.1 ANTECEDENTES. _____	4
1.1.1 GENERALIDADES SOBRE EL RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODANTE. _____	4
1.1.1.1 Automóviles. _____	6
1.1.1.2 Camiones y Buses. _____	7
1.1.1.3. Motocicletas. _____	8
1.1.2 EL RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODANTE EN VENEZUELA. _____	8
1.1.2.1 Conclusiones. _____	9
1.1.2.2 Recomendaciones. _____	9
1.1.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODANTE, DESDE SUS INICIOS HASTA NUESTROS DÍAS. _____	10
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. _____	16
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES. _____	17
1.3.1 OBJETIVO GENERAL. _____	17
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. _____	18
1.3.3 ALCANCES. _____	18
CAPÍTULO II _____	20
FUNDAMENTOS TEÓRICOS _____	20
2.1 FÍSICA DEL SONIDO _____	21
2.1.1 VELOCIDAD DEL SONIDO. _____	22
2.1.2 FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA. _____	24
2.1.3 ESPECTRO, TEORÍA DE FOURIER. _____	27
2.1.4 NIVEL DE POTENCIA SONORA E INTENSIDAD DEL SONIDO. _____	29
2.1.5 NIVELES DE PRESIÓN SONORA, DECIBELES (dB). _____	31

2.1.6 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DE POTENCIA SONORA, NIVEL DE INTENSIDAD DE UNA ONDA SONORA Y NIVEL DE PRESIÓN SONORA.	32
2.1.7 RAÍZ MEDIA CUADRÁTICA (r.m.s), ENERGÍA RELATIVA.	33
2.1.8 ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA.	35
2.1.9 BANDA DE OCTAVA Y TERCIO DE OCTAVA, ESPECTRO DE FRECUENCIA.	36
2.1.10 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DE PRESIÓN SONORA, ENERGÍA RELATIVA, PRESIÓN RELATIVA, Y PRESIÓN SONORA.	39
2.1.11 CURVAS DE PONDERACIÓN.	40
2.1.12 AJUSTES DE A-PONDERADO PARA LAS FRECUENCIAS CENTRALES DE BANDAS DE 1/3 OCTAVA.	42
2.1.13 EXPANSIÓN GEOMÉTRICA DE FUENTES PUNTUALES Y LINEALES.	43
2.1.14 FUENTES LINEALES COHERENTES E INCOHERENTES.	44
a.- Fuentes coherentes.	44
b.- Fuentes Incoherentes.	45
2.2 PROPIEDADES DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO.	46
2.2.1 RAYOS Y ONDAS.	46
2.2.2 RELEXIÓN.	47
a.- Resonancia.	49
b.- Eco.	49
c.- Reverberación.	49
2.2.3 REFRACCIÓN.	50
2.2.4 DIFRACCIÓN.	51
2.2.5 ABSORCIÓN.	52
2.2.6 ATENUACIONES EN EXTERIORES.	53
2.2.6.1 Absorción Atmosférica.	53
2.2.6.2 Efectos del viento y los gradientes de temperatura.	53
2.2.6.3 Atenuación de la Vegetación.	55
2.2.6.4 Atenuación del Suelo.	56
2.3 RUIDO	60
2.3.1 DEFINICIÓN DE RUIDO.	60
2.3.2 TIPOS DE RUIDO.	61
a.- Ruido Continuo o Estacionario.	61
b.- Ruido Fluctuante.	62
c.- Ruido de Impacto.	62
2.3.3 PRINCIPALES FUENTES DEL RUIDO EN AMBIENTES AL AIRE LIBRE.	63
2.3.4 EFECTOS DEL RUIDO EN EL HOMBRE.	64
2.3.4.1. Efectos Auditivos.	65
a. Dolor en el oído.	65

b. Pérdida de la audición. _____	65
c. Enmascaramiento. _____	65
d. Inteligibilidad de la palabra. _____	66
e. Respuesta Reflejo. _____	66
2.3.4.2 Efectos No Auditivos. _____	67
a. Efectos sobre la voz. _____	67
b. Efectos en la Vista. _____	67
c. Fatiga Corporal. _____	67
d. Resonancias en el Organismo. _____	67
d. Efectos psicológicos. _____	68
CAPÍTULO III _____	69
FUENTES DE RUIDO EN EL TRÁFICO DE AUTOPISTAS _____	69
3.1 GENERALIDADES _____	70
3.2 MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO DE RODADURA. ____	73
3.2.1 MECANISMOS VIBRATORIOS. _____	75
3.2.1.1 Impacto En La Banda De Rodadura Del Neumático (300-1500 Hz). 75	75
3.2.1.2 Impacto En La Textura (800-1250 Hz). _____	75
a.-Micro-textura. _____	76
b.-Macro-textura. _____	76
c.-Mega-textura. _____	76
3.2.1.3 Pisar / Resbalar (Fricción). _____	77
3.2.1.5 Pisar / Adherir (Por Encima De 2 Khz). _____	77
3.2.2 MECANISMOS AERODINÁMICOS EN EL NEUMATICO. ____	78
3.2.2.1 Turbulencia Del Aire (300 Hz). _____	79
3.2.2.2 Bombeo Del Aire (> 1000 Hz). _____	79
3.2.2.3 Resonancia Tubular (900-2000 Hz). _____	80
3.2.2.4 RESONANCIAS DE HELMHOLTZ (1 -2.5 Khz). _____	81
3.2.3 MECANISMOS DE AMPLIFICACIÓN / REDUCCIÓN. _____	82
3.2.3.1 Efecto Bocina. _____	83
3.2.3.2 Resonancias Cinturón/Carcasa (600-1300 Hz). _____	83
3.2.3.3 Resonancia Toroidal De La Cavidad (230-280 Hz). _____	85
3.2.3.4 Tipos de Vías Reductoras de Ruido _____	85
a.- Mezclas Drenantes o Porosas (P.A). _____	86
b.- Mezclas Bituminosas (S.M.A). _____	87
c.- Micro-Aglomerados. _____	88
3.3 MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO DE PROPULSIÓN. ____	89
3.3.1 RUIDO DEL MOTOR. _____	90
3.3.1.1 Ruido Mecánico. _____	90
a.- Ruido por el Golpeteo del Émbolo. _____	91
b.- Ruido en la Sincronización. _____	91
c.- Otras Fuentes de Ruido. _____	91

3.3.1.2 Ruido Por Combustión.	91
3.3.1.3 Efectos De Las Variables Del Motor En La Emisión Del Ruido.	92
a.-Efecto de la velocidad del motor en la emisión del ruido.	92
b.-Efecto del tamaño del motor en la emisión del ruido.	92
3.3.2 RUIDO EN EL TUBO DE ESCAPE.	93
3.3.3 RUIDO DEL VENTILADOR.	94
3.3.4 RUIDO DE LA TRANSMISIÓN.	95
3.3.5 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE RUIDO Y SUS SOLUCIONES EN MOTOCICLETAS.	95
3.4 MECANISMOS DE GENERACIÓN DEL RUIDO AERODINÁMICO.	97
CAPÍTULO IV	99
BARRERAS ANTI-RUIDO EN AUTOPISTAS	99
4.1 GENERALIDADES.	100
4.2 BARRERAS ANTI-RUIDO	100
4.2.1 FUNDAMENTO ACÚSTICO.	102
4.3 AISLAMIENTO ACÚSTICO.	103
4.3.1 TEORÍA DEL AISLAMIENTO.	103
4.3.2 AISLAMIENTO DE UNA PARED SIMPLE HOMOGÉNEA: LEY DE MASAS	104
4.4 EFECTIVIDAD ACÚSTICA.	108
4.4.1 PÉRDIDA DE INSERCIÓN.	108
4.4.1.1 Método De Lam Usando La Curva De Maekawa/Kurze	109
4.4.2 PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN.	111
4.5 PERFILES DE BARRERAS ANTI-RUIDO.	112
4.5.1 DISEÑO DE BARRERAS DE PERFIL “T”.	112
4.5.2 DISEÑO DE BARRERAS CON EL TOPE MELLADO.	113
4.5.3 DISEÑO DE BARRERAS CON EL TOPE CILÍNDRICO.	113
4.5.4 DISEÑO DE BARRERA CON EL TOPE EN FORMA DE HONGO	114
4.5.5 DISEÑO DE BARRERA CON EL TOPE LÍMITE MÚLTIPLE.	114
4.5.6 DISEÑO DE BARRERAS DE CONTROL ACTIVO EN EL TOPE.	115
4.6 MATERIALES DE BARRERAS.	115
4.6.1 CONCRETO.	116
4.6.2 METAL.	117
4.6.3 LADRILLO Y BLOQUE DE ALBAÑILERÍA.	118
4.6.4 MATERIALES COMPUESTOS.	119
CAPÍTULO V	120
MODELO MATEMÁTICO PARA LA GENERACIÓN PROPAGACIÓN Y CONTROL DE RUIDO	120
DEL TRÁFICO VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD	120

5.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO	121
EN EXTERIORES.	121
5.1.1 DIRECTIVIDAD.	121
5.1.1.1 Índice de directividad en espacios esféricos.	122
5.1.1.2 Índice de Directividad en espacios Hemisféricos.	122
5.1.2 DIVERGENCIA DE ONDAS.	123
5.1.3 RUIDO DEL TRÁFICO VEHICULAR.	125
5.2 MODELOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO DE TRÁFICO RODADO EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD.	126
5.2.1 MODELO CORTN (Calculation Of Road Traffic Noise)	126
5.2.1.1 División del esquema del camino en segmentos.	129
5.2.1.2 La predicción de niveles de ruido básicos.	129
5.2.1.3 Corrección para la velocidad promedio del tráfico, el porcentaje de vehículos pesados y el gradiente de la vía.	129
5.2.1.4 Superficie del Camino.	131
5.2.1.5 Corrección de la distancia.	132
5.2.1.6 La Propagación sin Obstrucción	132
5.2.1.7 Corrección por la cubierta del suelo.	132
5.2.1.8 Propagación Obstruida.	134
5.2.1.9 Tamaño del Segmento	134
5.2.1.10 Combinando las Contribuciones de segmentos.	134
5.2.1.11 Múltiples caminos incluyendo empalmes.	135
5.2.2 MODELO FHWA.	138
5.2.2.1 Niveles medios de emisión de referencia (media energética).	139
5.2.2.2 Corrección por intensidad de tráfico.	139
5.2.2.3 Ajuste por distancia.	140
5.2.2.4 Corrección por segmento finito de carretera.	141
5.2.2.5 Corrección por rampa	143
5.2.2.6 Apantallamiento mediante edificios.	143
5.2.2.7 Apantallamiento mediante un área arbolada.	144
5.2.2.8 Atenuación de barreras	144
5.2.2.9 Niveles sonoros totales.	145
5.2.2.10 Pérdida por inserción	145
5.2.3 MODELO HARMONOISE.	146
5.2.3.1 La modelación de la fuente.	146
5.2.3.2 Niveles de emisión de referencia.	146
5.2.3.3 Influencia de la superficie del Camino.	150
5.2.3.4 Influencia de la directividad.	150
5.2.3.5 Influencia de la divergencia geométrica.	152
5.2.3.6 Atenuaciones en el modelo Harmonoise.	153
5.2.4 MODELO HOLANDÉS, SCM (Standard Calculation Method).	153
5.3 MODELO SIMPLIFICADO DE GENERACIÓN DE RUIDO	156

DEL TRÁFICO VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD. _____	156
5.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO SIMPLIFICADO. _____	164
5.3.2 ALGORÍTMO DEL MODELO SIMPLIFICADO. _____	170
5.3.3 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN USADO. _____	172
5.3.4 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA. _____	173
5.3.5 VALIDACIÓN. _____	186
CONCLUSIONES _____	194
RECOMENDACIONES _____	196
BIBLIOGRAFÍA. _____	198
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. _____	198
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS _____	201
ANEXOS _____	203
A.1 CATEGORIZACIÓN DE LOS VEHICULOS _____	203
A.2 COEFICIENTES POR FRECUENCIAS PARA EL RUIDO POR RODADURA _____	206
A.3 COEFICIENTES POR FRECUENCIAS PARA EL RUIDO A PROPULSIÓN _____	207
A.4 INFLUENCIA DEL TIPO DE PAVIMENTO EN EL NIVEL DE PRESIÓN SONORA, POR 1/3 DE OCTAVA PARA CADA CATEGORÍA DE VEHÍCULO _____	208
A.5 ALTURAS EFECTIVAS _____	209
A.6 NOMOGRAMA DE BARRERAS _____	210
A.7 MATRIZ DE EVALUACION DEL TIPO DE TOPE DE BARRERA _____	211
A.8 REGISTRO DE DATOS RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO _____	212
A.9 NORMAS SOBRE EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN GENERADA POR RUIDO. _____	214
A.10 LISTADO DEL PROGRAMA _____	215

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Onda de Presión	24
Fig. 2.2 Frecuencia y Longitud de Onda	26
Fig. 2.3 Ejemplo de síntesis de Fourier de ondas ideales: Onda cuadrada.....	28
Fig. 2.4 Ejemplo de síntesis de Fourier de ondas ideales: Diente de Sierra.	29
Fig. 2.5 Presión Pico Vs. Presión Sonora r.m.s.....	34
Fig. 2.6 Típico Espectro de Frecuencia de Banda de Octava.....	
Fig. 2.7 Típico Espectro de Frecuencia de Banda 1/3 Octava	59
Presión Relativa, Presión Sonora	40
Fig. 2.8 Curva de Ponderación Espectral.....	41
Fig. 2.9 Fuente Puntual	43
Fig. 2.10 Fuente Lineal.....	44
Fig. 2.11 Ondas producidas fuentes Coherentes.....	45
Fig. 2.12 Ondas Producidas por fuentes incoherentes	46
Fig. 2.13 Reflexión de ondas esféricas sobre una superficie plana	48
Fig. 2.14 Comparación de la transmisión de partículas (a) y ondas (b).	51
Fig. 2.15 Ilustración comparativa de la refracción del sonido debido a los gradientes de temperatura.	54
Fig. 2.16 Efectos refractivos del viento en la propagación del sonido.	55
Fig. 2.17 Geometría para el estudio de la reflexión del sonido desde una superficie (suelo) con impedancia acústica finita.	57
Fig. 2.18 Curvas isofónicas para los umbrales de dolor y de audición.....	61
Fig. 2.19 Representación gráfica de los niveles sonoros de un ruido estacionario (a), fluctuante (b) e impulsivo o de impacto (c)	62
Fig. 2.20 Representación gráfica de los espectros de frecuencia de un ruido blanco (a), ruido rosa (b).....	63
Fig. 2.21 Fuentes del ruido emitido a la atmósfera en áreas urbanas.....	64
Fig. 3.1 Las fuentes de ruido más importantes de un vehículo terrestre.....	72
Fig. 3.2 Descripción de parámetros medidos de textura superficiales	76
Fig. 3.3 Izquierda: Cuando la deformación del bloque de la banda de rodadura es muy larga, los bloques se deslizan hacia atrás. Derecha: Coeficiente de fricción vs Velocidad de deslizamiento.	77
Fig. 3.4 Adhesión entre el bloque de la banda de rodadura y el pavimento a la salida de la zona contacto.....	78
Fig. 3.5 Bombeo de Aire en la entrada y salida de la zona de contacto.	79
Fig. 3.6 Amplificación del sonido causado por una formación tubular.....	80
Fig. 3.7 Izquierda: Esquema Masa – Resorte / Derecha: Esquema del resonador ideal	81
Fig. 3.8 Amplificación de Sonido causado por resonador de Helmholtz.....	82
Fig. 3.9 Efecto Bocina creado por el neumático y el pavimento.....	83
Fig. 3.10 Vibraciones de la Carcasa / Cinturón del Neumático alrededor de la banda de rodadura y en la pared lateral de la zona de contacto.	84
Fig. 3.11 Resonancia Toroidal de la Cavidad.....	85
Fig. 3.12 A) Esqueleto de piedras de un asfalto poroso de una capa, B) Esqueleto de piedras de un asfalto poroso de doble capa,	87
Fig. 3.13 Corte de un SMA de 10 mm	87
Fig. 3.14 Excitación del Ruido del Vehículo por el Motor.....	89
Fig. 3.15 Motor de un Vehículo de Pasajeros.....	90
Fig. 3.16 Silenciador de Escape con Material de Absorción.....	94
Fig. 3.17 Identificación de Fuentes de Ruido.....	96

Fig. 3.18 Sistema Gradual de configuración general para la simulación del flujo de aire de un tipo de vehículo	98
Fig. 4.1 Trayectoria de ondas incidentes en una Barrera Anti-ruido	101
Fig. 4.2 Zona de Sombra.....	102
Fig. 4.3 Ley de Masas. Partición Simple	105
Fig. 4.4 Onda Sonora de Flexión. Fenómeno de Coincidencia	106
Fig. 4.5 Aislamiento de una pared simple.....	107
Fig. 4.6 Definición de símbolos usados para determinar el número de Fresnel, N	110
Fig. 4.7 Barrera anti-ruido de Concreto.....	116
Fig. 4.8 Barrera Anti-ruido de Metal.....	117
Fig. 4.9 Barrera Anti-ruido de Ladrillo	118
Fig. 4.10 Barrera Anti-ruido de Material Compuesto	119
Fig. 5.1 Niveles de sonido con ponderación A medidos cerca de una carretera con a) baja densidad de tránsito b) alta densidad de tránsito.	126
Fig. 5.2 Una ilustración de la distancia de inclinación más corta entre un punto de la recepción y una línea efectiva de la fuente que representan una circulación	127
Fig. 5.3 Diagrama de Flujo del método CRTN	128
Fig. 5.4 Relación entre θ y el tramo de carretera.	136
Fig. 5.5 Variables de importancia en la propagación obstruida, modelo CORTN.....	137
Fig. 5.6 Ángulos para determinar el tramo de carretera a estudiar.....	142
Fig. 5.7 Nivel de presión sonora en función de la velocidad para cada clase de vehículo.....	148
Fig. 5.8 Ruido de Rodadura y propulsión a 100 Km/h.....	150
Fig. 5.9 Geometría propuesta para el modelo Harmonoise, enfoque inicial.....	151
Fig. 5.10 Segmentación de la carretera según el modelo Harmonoise.....	152
Fig. 5.11 Angulo que define el tramo de carretera a considerar, Modelo Holandés.....	154
Fig. 5.12 Representación del tráfico vehicular como fuente lineal.....	157
Fig. 5.13 Contribución de las diferentes sub-fuentes de ruido en tráfico vehicular en una autopista.....	158
Fig. 5.14 Plantilla de prestación.....	174
Fig. 5.15 Plantilla para introducir datos iniciales.....	175
Fig. 5.16 Plantilla para introducir datos iniciales con imagen de ayuda.....	176
Fig. 5.17 Plantilla para introducir datos del tráfico carril uno.....	177
Fig. 5.18 Plantilla para introducir datos del tráfico carril uno, con imagen de ayuda.....	178
Fig. 5.19 Plantilla para introducir datos del tráfico carril dos.....	179
Fig. 5.20 Plantilla para introducir datos del tráfico carril dos.....	180
Fig. 5.21 Plantilla de resultados del carril uno.....	181
Fig. 5.22 Gráfico de resultados del carril uno.....	181
Fig. 5.23 Plantilla de resultados del tráfico carril dos.....	182
Fig. 5.24 Gráfico de resultados del carril dos.....	182
Fig. 5.25 Plantilla de resultados finales.....	184
Fig. 5.26 Plantilla de control de ruido.....	185
Fig. 5.27 Nivel de presión sonora por metro de longitud de fuente.....	188
Fig. 5.28 Resultado modelo Holandés	189
Fig. 5.29 Resultado modelo Holandés con el flujo de motocicletas.....	190
Fig. 5.30 Método del nomograma para predecir la generación de ruido en autopista	190
Fig. 5.31 Datos de frecuencia de banda 1/3 octava del modelo diseñado	191
Fig. 5.32 Modelo Propuesto. Atenuación de la barrera	192
Fig. 5.33 Método del nomograma para predecir el control de ruido en autopista.....	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Longitud de Onda de Varias Frecuencias	27
Tabla 2.2 Suma de Niveles de Presión Sonora.	36
Tabla 2.3 No. de Bandas Normalizadas, Frecuencia Centro, Banda de 1/3 Octava y 1 Octava, y Rango de Banda de Octava	37
Tabla 2.4 Relación entre Nivel de Presión Sonora, Energía Relativa, Presión Relativa, Presión Sonora	40
Tabla 2.5 Ajustes de A-ponderado para las frecuencias centrales de bandas de 1/3 octava.	42
Tabla 2.6 Atenuación del ruido en una octava de banda debido a la propagación a través de un follaje denso.	56
Tabla 2.7 Valores de la resistividad al flujo superficial de varios tipos de suelo	59
Tabla 3.1 Contribución de fuentes de ruido en función de la velocidad.	71
Tabla 3.2 Mecanismos de generación de ruido neumático/vía y fenómenos relacionados	74
Tabla 5.1 Clasificación de caminos y la velocidad de tráfico recomendada	130
Tabla 5.2 En la selección del valor de I	133
Tabla 5.3 Directrices para la elección de las tasa de propagación del sonido.	141
Tabla 5.4 Clasificación de los vehículos según el modelo Harmonoise.	147
Tabla 5.5 Número de emisión α en función de la frecuencia y la categoría de vehículo.	155
Tabla 5.6 Número de emisión β en función de la frecuencia y la categoría de vehículo.	155
Tabla 5.7 Valores en dB de Corrección por el efecto del tipo de Pavimento.	159
Tabla 5.8 Comparación de los resultados Obtenidos por mediciones de campo, el PERTRAF y el Modelo CoRTN	186
Tabla 5.9 Nivel de presión sonora por metro de longitud de fuente	188

LISTADO DE ABREVIATURAS

CORTN	Calculation Of Road Traffic Noise
DAC	Dense Asphalt Concrete
FHWA	Federal Highway Administration
ISO	International Standard Organization
MCI	Motor de Combustión Interna
NPS	Nivel de presión Sonora
OMS	Organización Mundial de la Salud
PA	Porous Asphalt
PAD	Pérdida Auditiva Promedio
PTS	Permanent Threshold Shift
TTS	Temporal Treshold Shift
SMA	Split Mastic Asphalt

LISTADO DE UNIDADES

°C	Grado Celsius
°F	Grado Fahrenheit
dB	Decibel
dBA	Decibel en ponderación A
Hz	Hertz
J	Joule
Kg	Kilogramo.
K	Kelvin
Km	Kilómetro
Lb	Libra
m	Metro
mm	Milímetro
mph	Millas por hora
Pa	Pascal
RPS	Revoluciones por segundo
s, seg	Segundo
w	Vatio

INTRODUCCIÓN

A diferencia de la visión, nuestro sistema auditivo está siempre abierto al mundo, lo que implica una recepción continua de estímulos y de informaciones sonoras de las que no podemos sustraernos. Gran parte de nuestra experiencia está relacionada con el sonido, que constituye un estímulo importante y necesario, a la vez que es canal de comunicación con el medio que nos rodea. Según su procedencia, sus características e incluso, según nuestras circunstancias en el momento en que los percibimos, los sonidos pueden resultarnos suaves y agradables o estrepitosos y agresivos, siendo ésta la diferencia fundamental entre "sonido" y "ruido".

En definitiva, el ruido es una apreciación subjetiva del sonido, por ejemplo, lo que una persona puede calificar como música para otra puede ser ruido. Sin embargo, en el momento que un ruido no se adapta a la actividad ambiental y supera cierto nivel sonoro, se convierte en una fuente de problemas que van desde la pérdida del bienestar deseado hasta alteraciones graves en la salud (un sonido superior a 30 dB no permite conciliar el sueño). Por lo tanto, a pesar de que el concepto de ruido es subjetivo, cuando los valores de presión sonora superan ciertos niveles, la molestia causada afecta a grupos considerables de individuos.

Actualmente, tanto en Venezuela como en el ámbito internacional, está demostrado que el ruido es uno de los principales problemas de contaminación ambiental que afecta a la población, tanto en el medio urbano como en el interurbano, ya que proviene de muy diversas fuentes y no es sencillo controlar la cantidad de sonido que se envía a la atmósfera. De acuerdo a estudios realizados en algunos países europeos, de la energía sonora total emitida, el 80% corresponde a vehículos de transporte terrestre, el 10% a la industria, el 4% a ferrocarriles y el 6% restante a distintas fuentes (aeropuertos, construcción, entre otros), por lo cual la tendencia

mundial en el control y la evaluación del impacto ambiental apunta a la infraestructura vial, incorporando estudios dentro de los planes de ordenamiento territorial y la disponibilidad de herramientas ambientales que permitan desarrollar los planes, programas y proyectos preventivos correctivos o de seguimiento con el fin de identificar las fuentes generadoras potenciales que futuros proyectos urbanos generarían en el medio ambiente. Por esta razón y debido a que una de las facetas de la ingeniería, específicamente en el área de la mecánica, es el estudio y análisis de las vibraciones, las cuales también reciben el nombre de oscilaciones, el ingeniero mecánico debe aprender entonces a reconocer, modelar, cuantificar y evaluar las causas y los efectos de las vibraciones en diversos mecanismos y maquinarias pertenecientes a los vehículos automotores, siendo una de las consecuencias de las vibraciones mecánicas: el ruido.

Este Trabajo Especial de Grado ofrece un modelo físico-matemático para cuantificar el ruido generado el tráfico vehicular en vías de alta densidad como lo son las autopistas. Este modelo posteriormente se desarrolla en un programa de computación el cual facilita el cálculo y análisis del ruido generado por este tipo de fuente.

Este Trabajo está conformado por cinco capítulos: en el primero se exponen los antecedentes en este tipo de estudio, así como la problemática a resolver. En la segunda sección se presenta una base teórica, con el objetivo de instruir al lector de manera general en lo referente al ruido y los factores que tienen incidencia en la generación y propagación del mismo. Así mismo, en la tercera parte se explica con detalle los mecanismos principales de generación específicos en el ruido del tráfico rodado. Con respecto al control de ruido, en el cuarto capítulo se muestra todo el desarrollo teórico y práctico por medio del uso de barreras acústicas. Y en el quinto capítulo se exponen algunos métodos para la predicción de ruido, el modelo simplificado desarrollado en este Trabajo y el programa basado en el mismo.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES.

1.1.1 GENERALIDADES SOBRE EL RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODANTE.

Se define el ruido acústico ó ruido, como una presión fluctuante que es captada por el oído humano. La habilidad de las personas de percibir las ondas de sonido puede variar extensamente, dependiendo de la edad y experiencia auditiva de la persona; pero como una declaración general, se puede decir, que la extensión de frecuencia de sonidos audibles para seres humanos oscila entre 20 Hz y 20.000 Hz. A 1000 Hz el nivel sonoro mínimo audible es aproximadamente 0,0002 microbars (1 microbar = 10^{-6} atmósferas). El nivel sonoro máximo que puede ser mantenido sin daño para el mecanismo de audición es aproximadamente 200 microbars. Por lo tanto, la proporción entre el sonido mínimo que puede ser escuchado y el más intenso que puede ser tolerado es un factor de 10^6 ; una extensión dinámica muy extraordinaria.

Las amplitudes del sonido se expresan en unidades y escalas logarítmicas, por el alcance sumamente grande de niveles sonoros que son de interés y debido a que el oído tiende a discriminar el volumen y ruido acústico de forma logarítmica antes que de forma lineal, es decir, incrementos iguales en la presión sonora no causan incrementos iguales en el volumen. La medida logarítmica de la presión sonora es llamada el nivel de presión L_p y su unidad lo es el decibel ó decibelio, dB. La fórmula para el nivel de presión sonora ó nivel de presión auditiva es:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad [dB] \quad (1.1)$$

Donde p_{ref} es una presión de referencia elegida a conveniencia, tomando un valor de $0,0002 \text{ dinas/cm}^2$ en tecnologías de control y análisis de ruido. La presión p puede ser cualquier presión de interés (presión atmosférica; presión de carga dinámica o una presión media local) y en casos de valores fluctuante, razonablemente estable, se puede emplear una presión promedio ponderada.

El ruido también puede estudiarse de forma más práctica y directa en función de los espectros (representación gráfica de las variaciones de las amplitudes y niveles de presión acústica) y de los componentes de la frecuencia. El uso de descripciones espectrales del ruido facilita: determinar sus fuentes de origen y generación, parametrizar los niveles de ruido audibles al ser humano y llevar un control estadístico fidedigno de los fenómenos involucrados con la generación y propagación del ruido. Para caracterizar cada espectro, se emplean filtros de ancho de banda, los cuales dejan pasar determinado nivel de presión sonora, eliminando el resto de las presiones. Los anchos de banda de frecuencias se expresan en porcentajes constantes, los más usados y ya considerados normalizados, son los de un octavo de banda (1/8), tres octavos de banda (3/8) y un décimo octavo de banda (1/80). Por lo tanto, todos los datos y gráficos para analizar los mecanismos del ruido pasan por el uso del análisis espectral acústico.

El ruido generado por un automóvil o camión depende de la velocidad, aceleración, pendiente, superficie y carga. Estos factores, mas la composición del tráfico, densidad, distancia, altura y presencia de barreras, interactúan para determinar el nivel de ruido percibido por las personas.

Los ruidos producidos por un vehículo automotor dependen de la velocidad del mismo en la vía, siendo las principales fuentes: el motor, la toma de aire, el

contacto de los neumáticos con el pavimento, el escape y el ventilador; así como los ruidos, provenientes de la transmisión, la configuración aerodinámica y la vibración del vehículo.

Cuatro clases de vehículos son los principales responsables del ruido en el transporte terrestre: automóviles, buses o camiones, motocicletas y vehículos ferroviarios, de los cuales se tratarán las generalidades de los 3 primeros.

1.1.1.1 Automóviles.

Los automóviles modernos, particularmente aquellos modelos de constructoras Norteamericanas, no son tan ruidosos con respecto a la emisión de ruido. La Society of Automotive Engineers (SAE) ha establecido una aceptación estándar de 88 dBA para vehículos de peso menor a 6000lb (SAE, 1968), por lo que dichos automóviles se encuentran fácilmente en este estándar, a excepción de algunos modificados para algún fin.

El ruido que se percibe de un automóvil, al desplazarse a altas velocidades, es principalmente aquel generado por el contacto de los neumáticos y el pavimento, sobre todo cuando las vibraciones que se producen en las piezas mecánicas del mismo, generan ruidos en frecuencias no audibles para el oído humano. El ruido del neumático tiene un espectro continuo sobre el rango audible, y el pavimento áspero tiende a aumentar el ruido en los rangos de la mediana-frecuencia (100 Hz - 1000 Hz) alrededor de 12 dBA.

Otros problemas, tales como el ruido del escape y el ruido generado por las partes del motor, los cuales son los problemas principales de los automóviles

Europeos y japoneses, son manejados con aislamiento acústico o amortiguamiento de la parte responsable del ruido.

Un reporte hecho en las autopistas de California en el año de 1970, a una distancia de 15m (50ft) de la línea central de la carretera, en 9000 vehículos, cada uno con un peso menor a 6000lb, registra 60 dBA cuando la velocidad está por debajo de 55Km/h (35mph) y un nivel equivalente alrededor de 74 dBA a la distancia de 7.5m.

1.1.1.2 Camiones y Buses.

Los vehículos que funcionan con motor diesel pertenecen al problema de ruido en autopistas, debido a que generalmente son camiones y autobuses de grandes dimensiones, los cuales habitualmente circulan por este tipo de vía. La ignición en un motor diesel ocurre a altas presiones al igual que en un motor de gasolina. Esto es particularmente cierto para vehículos de carga pesada en aceleración desde una parada. Además, con camiones pesados en particular, los motores se operan la mayor parte del tiempo a velocidad y potencia máxima.

La reducción del ruido del vehículo diesel resulta un problema complejo; el silenciador efectivo es una medida de control que ha permitido disminuir el ruido de camiones que emiten más de 100 dBA (Ringham, 1973). La reducción adicional, a los límites más bajos especificados por varias regulaciones, tal como el propuesto por la EPA¹ (1974), para camiones medios y camiones pesados es un problema mucho más difícil, implicando un cuidadoso rediseño.

Los autobuses tienen un nivel relativamente alto de ruido, particularmente al acelerar desde una parada. Inicialmente el nivel del ruido es 88 dBA, subiendo a 94

¹ Environmental Protection Agency.

dBa alrededor de 0,80 segundos después del comienzo y luego, manteniéndose constante en aproximadamente 83 dBA.

1.1.1.3. Motocicletas.

La motocicleta es una particular fuente de ruido, donde ni siquiera los ocupantes del vehículo pueden estar protegidos. El ruido puede ser tan alto como 120 dBA inmediatamente detrás del mismo. A pesar de ello, este tipo de vehículo no es contemplado en algunos modelos de predicción debido, a que en muchos países no se permite la circulación de motocicletas en las autopistas.

El ruido generado por los vehículos automotores terrestres puede ser controlado construyendo barreras físicas al ruido y modificando tanto las características del tráfico como la tecnología de los vehículos. Sin embargo asumiendo que, por ejemplo, el ruido del motor sea atenuado, otras fuentes se harían importantes.

1.1.2 EL RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODANTE EN VENEZUELA.

La Primera investigación hecha en Venezuela sobre el ruido procedente de vehículos automotores, con miras al establecimiento de políticas, es el elaborado en 1980 para el Valle de Caracas por la Dirección de Investigación del Ambiente, con el objetivo de servir de apoyo para la implementación del "Reglamento para el Control de Ruidos Molestos y Nocivos", aprobado en noviembre de 1978. A continuación se incluyen sus Conclusiones y Recomendaciones.

1.1.2.1 Conclusiones.

- 1.- El nivel promedio global de ruido para Caracas correspondió a 77.5 dBA durante las horas laborales en base a los datos obtenidos; sobrepasando en un 9% el valor fijado en el Reglamento de Ruidos Nocivos y Molestos.
- 2.- Los niveles de intensidad de sonido mayores de 100 dBA solo representan el 0.2% de los 9.327 datos de ruido determinados en el muestreo, mientras que los valores comprendidos entre 70 dBA a 85 dBA representan casi un 85%.
- 3.- El 80% de los valores de intensidad de ruido obtenidos en la Base Aérea "Generalísimo Francisco de Miranda" oscila entre 81 dBA y 96 dBA, por lo que concluye que la influencia de las operaciones realizadas en la Base es determinante en la magnitud de los datos antes mencionados.
- 4.- En la Avenida Boyacá se determinó el rango promedio de intensidad de ruido en 80 dBA. Se concluye que esta cifra se debe al gran flujo de vehículos automotores que circulan en ambos sentidos de dicha vía, en donde se destacan los vehículos de carga pesada y motocicletas.

1.1.2.2 Recomendaciones.

- 1.- En vista de los resultados de ruido obtenidos de las mediciones y muestreo en el Valle de Caracas y sitios circunvecinos, se recomienda:
 - a.- Aplicación de medidas drásticas para sacar de la circulación a todos aquellos vehículos productores de altas intensidades de ruido.
 - b.- Vigilancia continua y permanente en materia de control. Estos son los dos elementos fundamentales para comenzar una disminución gradual de los niveles de intensidad de ruido antes mencionados.

- 2.- En lo referente a la Base Aérea "Generalísimo Francisco de Miranda" y áreas circunvecinas se hace necesaria la aplicación de medidas especiales para combatir el ruido. Entre estas medidas surge de inmediato la regulación de las operaciones en la misma, limitándolas únicamente para la Fuerza Aérea Venezolana (FAV) y para casos de emergencia.

- 3.- Realizar otros estudios que contemplen lo siguiente:
 - a.- Elaborar planos acústicos de las principales ciudades de Venezuela con el fin de tener una amplia idea de la situación, y actualizar el plano realizado en la Ciudad de Caracas en el año 1966.
 - b.- Efectuar monitoreos de ruido en tráfico rodante y aéreo.
 - c.- Medición de ruido en los edificios públicos y privados.

En dicho estudio se advertía que de continuar la tendencia de crecimiento del parque automotor y de no tomarse medidas para reducir el ruido generado por el mismo, las consecuencias para nuestra sociedad podrían ser perjudiciales en varios aspectos. Luego en 1992 se decreta las normas para el control de ruido de fuentes fijas o móviles, las cuales toman como base normas de otros países. Actualmente en la ciudad capital el municipio de Chacao es el único que realiza mediciones de ruido urbano en general.

1.1.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODANTE, DESDE SUS INICIOS HASTA NUESTROS DÍAS.

En 1977, Gilbert elaboró una ecuación para predecir el nivel L_{10} en calles urbanas, la cual se derivó del análisis de las mediciones hechas en 190 lugares en Edimburgo y otros. La validez de la ecuación se confirmó por medio de un análisis de 134 mediciones hechas en Sheffield y Rotherham. Esta ecuación incluye variables de

tráfico, las cuales son hasta el presente, difíciles de predecir; y una ecuación alternativa que usa variables fácilmente predecibles, que han sido derivadas de los datos de Sheffield y Rotherham. Los errores estándar de los dos métodos de predicción fueron de casi 3 dBA. Se demostró que este error no es significativamente afectado por la instrumentación desplegada, siempre y cuando se alcancen los grados de estandarización industrial, o por el período de muestreo de los niveles medidos, con tal que éstos no sean menores a 15 minutos. Sobre el rango de los datos estudiados, el error estándar no fue afectado significativamente por no linealidades o discontinuidades en las 22 variables numéricas consideradas en el análisis de regresión, ni varió sistemáticamente con cualquiera de las 11 variables descriptivas que se examinaron. Hubo alguna indicación, sin embargo, de que la técnica de análisis de regresión no detectaba interacciones significativas entre variables. Cuando algunas de las variables descartadas como no significativas se agregaron y el análisis de la regresión se repitió, se logró una reducción importante en la predicción del error estándar.

En 1980 Lawrence y Berruid, presentaron una comparación entre algunos métodos de predicción de la atenuación por apantallamiento del ruido de tráfico causado por edificios, y las atenuaciones reales medidas en áreas residenciales típicas. Generalmente, se encontró que el método desarrollado por el Departamento de Ambiente en el Reino Unido da una predicción razonablemente precisa de la atenuación por apantallamiento en situaciones bastante simples. En situaciones más complejas, y particularmente donde una posición de recepción está cercana a una estructura significativamente apantallante, tal como un edificio, la atenuación obtenida no es pronosticada por el método DOE (Department of Environment), de este modo, los niveles de diseño de fachada para el fondo de un edificio son previstos en exceso; como en otras situaciones. Las atenuaciones medidas para eventos individuales bajo condiciones nominales idénticas, mostraron tener grandes

variaciones. Se concluyó que los niveles pronosticados entre una fuente y un receptor tuvo dos componentes básicos, uno la distancia entre ellos, y otro la atenuación que produce el apantallamiento.

Bernard M. Favre, hace un análisis de los distintos métodos predictivos y los divide en tres métodos principales. Los métodos manuales (fórmulas o nomogramas), que llegan a predecir el nivel de ruido a través de una serie de ajustes respecto de un nivel de referencia. Entre los que se pueden mencionar: a) El Método del Reino Unido que desarrolló un procedimiento para predecir L_{10} , que se usó junto a las Regulaciones para Aislamiento de ruido (1975) y para propósitos de evaluación y planeamiento general. Éste procedimiento se revisó, y la revisión retiene la filosofía básica de aproximación, pero extiende el rango de aplicación del método para tomar en cuenta una amplia variación de escenarios de predicción y resultados de estudios recientes. En particular, se hicieron modificaciones significativas a las correcciones de flujo vehicular, tomando en cuenta el flujo reducido, las correcciones por superficie de rodadura y configuraciones de barreras. b) En Estados Unidos la FHWA (Federal Highway Administration – Administración Federal de Autopistas) desarrolló un método de fácil uso para predecir el L_{eq} . El modelo se presentó en un formato lógico paso a paso con apéndices que cubren el respaldo teórico e identifican las suposiciones y limitaciones del método. Algunos de los pasos son el cálculo del nivel de referencia, y la clasificación de los vehículos, ya que el análisis de los niveles de ruido, vía por vía es muy tedioso, especialmente en avenidas o autopistas multivías, por ello se elaboró un término para simplificar el cálculo, además el modelo toma en cuenta el exceso de atenuación por bosques, el apantallamiento dado por edificios tomando en cuenta la discontinuidad, y también da unos factores de conversión de fórmulas y monogramas que se pueden tener en una calculadora programable. c) En Escandinavia también se desarrolló un método de predicción manual conjuntamente con Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suiza. El método daba la posibilidad de

calcular el L_{eq} . Como un segundo método menciona los métodos computacionales que se desarrollaron en los años 60 comenzando desde los primarios métodos de cálculo, pero en la actualidad, se llegó a modelos de mayor sofisticación. Algunos de ellos son programas de síntesis de flujo de tráfico, programas de síntesis de flujo de propagación, y métodos basados en fórmulas.

Por último, se mencionan los modelos a escala, los cuales son útiles, en el caso de que las formulaciones matemáticas concuerden con el esquema de las calles. Son particularmente útiles en esquinas de calles complejas o distribuidores de tránsito en autopistas.

En 1987 Jraiw, presentó un modelo de computadora para predecir el ruido producido por el transporte en áreas urbanas y suburbanas bajo condiciones de flujo de tráfico libre. El modelo utiliza expresiones empíricas desarrolladas de estudios de campo hechos en 204 sitios en Bath (Gran Bretaña). Se tomaron en cuenta el flujo de tráfico, velocidad y composición, porcentaje de vehículos medianos y pesados, la distancia de los alrededores de las fachadas de los edificios, y la distancia de varias esquinas. Un buen nivel de concordancia se logró entre los valores medidos y los pronosticados.

Radwan y Oldman en el año 1987, desarrollaron un modelo de computadora para predecir niveles de ruido generados por tráfico urbano bajo condiciones de flujo interrumpido. El modelo está compuesto por dos subsecciones. La primera predice las características de propagación del sonido en configuraciones típicas de calles y el segundo simula el flujo de tráfico callejero en áreas urbanas. Las dos subsecciones son luego combinadas para obtener un modelo capaz de predecir niveles de ruido de tráfico en condiciones urbanas. El modelo propiamente dicho utiliza el método de trazado de rayos. Las predicciones obtenidas de la aplicación de este modelo se

comparan con aquellas aportadas por la aplicación de modelos predictivos basados en mediciones de campo. El acuerdo entre las predicciones es bueno. Se muestra que el modelo descrito en este documento puede predecir niveles de ruido para situaciones en las cuales los modelos basados en mediciones de campo no pueden manejar.

En 1989, Rao y Dev desarrollaron ecuaciones semiempíricas para predecir niveles de ruido en diferentes zonas de la ciudad de Visakhapatnam² mediante la medición extensiva de niveles de ruido y densidad de tráfico en distintas zonas de la ciudad (65 puntos cubriendo cuatro zonas). Para ese trabajo, primero se eligieron los lugares de medición y se grabaron los L_{eq} por hora. Al mismo tiempo se obtuvo la densidad vehicular contando los vehículos que pasaban por el punto de medición. Se clasificaron las áreas de acuerdo al uso a que estaban dedicadas en, residenciales, residenciales – comerciales e industriales. De un estudio anterior, se obtuvo el número equivalente de vehículos que emitían el mismo nivel de ruido que un solo vehículo, para después tener una densidad de tráfico equivalente. La diferencia entre los valores predichos y experimentales estaba dentro de los ± 5 dBA.

Fossa y Schenone en su trabajo presentado en 1995 hacen mención a que se habían dedicado grandes esfuerzos para desarrollar modelos de predicción para la estimación del L_{eq} y L_{10} como una función de un grupo de parámetros de tráfico restringidos. Es muy importante poder predecir el ruido de tráfico tan precisamente como sea posible, para usar los modelos predictivos como herramientas de planeamiento. Este objetivo puede ser alcanzado usando diferentes estrategias que incluyen restricciones de tráfico, planeamiento de uso de tierra, aislamiento de fuentes y/o viviendas, barreras acústicas, etc. De este modo, los modelos de predicción se deben aplicar a un gran número de casos prácticos tal como la evaluación del efecto del ruido cuando se planea una nueva calle, o cuando una calle

² Ciudad del Estado Andhra Pradesh en la India.

existente es reubicada, ensanchada, o se introduce una intersección señalizada. De hecho, las correlaciones disponibles para el cálculo del L_{eq} son insuficientes para esta tarea, dando sólo información parcial y siendo incapaz de considerar la influencia de algunos parámetros, como los ciclos de semáforos. En dicho trabajo se aplicó una aproximación, evento por evento, para evaluar la historia del ruido en el tiempo en ubicaciones asignadas cerca de las calles, como una función del flujo del tráfico de la distribución de clases de los vehículos y de la configuración de la calle. Se han considerado condiciones de tráfico distintas, incluyendo la presencia de intersecciones señalizadas. La comparación con mediciones disponibles y datos teóricos confirmó la validez del modelo propuesto.

En 1995 Biasi y colaboradores desarrollaron un programa de computadora basado en modelos de predicción, haciendo mención a que sólo recientemente la opinión pública ha tomado conciencia de que los niveles de ruido son componentes importantes de la calidad ambiental. Como una consecuencia de la disponibilidad de tecnología más y más sofisticada para el apropiado análisis de producción y propagación de ruido, el número de ingenieros y científicos que tratan de solucionar este problema esta aumentando continuamente. Además representa una contribución a la investigación involucrada en el desarrollo de códigos de computadora especialmente orientado al análisis del ruido producido por el tráfico urbano.

En 1997, Prasevic y otros publicaron los resultados del modelado en el nivel de ruido de tráfico a través de la tendencia de los datos recolectados en 11 sitios de medición en la ciudad de Nis (Yugoslavia). Se presentaron los modelos que describen el nivel de ruido con sólo una ecuación para todos los sitios, los que tienen dos ecuaciones para dos rangos de nivel y aquellos que tienen una ecuación para cada sitio. Se demostró que, es prácticamente imposible modelar tráfico con una única ecuación, que modelar ruido con ecuaciones separadas por dos rangos de nivel de

ruido, es bastante correcto y fácil de usar, y además, que los modelos con una ecuación por punto de medición, tienen mayor precisión pero son relativamente complejos por la cantidad de ecuaciones, y muestran que el modelo de dos rangos/ecuaciones es más preciso que el de una ecuación. Chakrabarty y otros, midieron el ruido de tráfico en 24 cruces de calles de Calcuta (India) durante el verano de 1997, con la grabación simultánea del número de vehículos que pasaban. Se desarrollaron las ecuaciones de regresión $L_{eq}(h)$ como una función del logaritmo del número equivalente de vehículos livianos y pesados por hora para toda la ciudad y zonas dentro de la ciudad.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La contaminación acústica es considerada por la mayoría de la población de las grandes ciudades como un factor medioambiental muy importante, que incide de forma principal en su calidad de vida. La contaminación ambiental urbana o ruido ambiental es una consecuencia directa no deseada de las propias actividades que se desarrollan en las grandes ciudades. Así mismo, en Venezuela con el impulso del estado, se ha retomado la protección medio-ambiental y la integración de proyectos que impacten positivamente en el entorno de los habitantes, donde se incluyen la disminución de la polución acústica y por ende el ruido generado por el tráfico automotor, siendo éste uno de los principales agentes que influyen en este tipo de contaminación en las grandes zona urbanas.

Uno de los aspectos fundamentales de esta temática, es el nivel de ruido ó presión sonora que se permite en áreas abiertas y zonas urbanas, lugares donde inevitablemente hay tráfico vehicular. El desafío que se pretende abordar es la insuficiencia de estudios del ruido generado por el tráfico vehicular en vías de alta densidad, así como de un modelo matemático ó programa computacional que permita

facilitar el cálculo de la generación, propagación y control de ruido. El estudio del ruido es competencia de los profesionales de la ingeniería mecánica, acústica, ambiental, industrial y civil, donde el ingeniero mecánico es el más capacitado a nivel de análisis dinámico de mecanismos, máquinas y estructuras, sobre todo en vibraciones mecánicas ú oscilaciones.

Por ello se desea, a partir del estudio de los vehículos terrestres como fuente principal de ruido en zonas urbanas, ubicados en vías de alto tráfico automotor o de autopistas, establecer un modelo matemático que permita el estudio de la generación del ruido como consecuencia de las vibraciones mecánicas producidas en el vehículo y la interacción con su entorno. Una vez establecido y validado el modelo, se compilará un programa de computación que facilite al ingeniero mecánico predecir el nivel de ruido que se originará en determinado tipo de vía con alta densidad vehicular.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Establecer un modelo físico-matemático (teórico) que represente la generación de ruido del tráfico vehicular en vías de alta densidad y a su vez implementar el control de ruido. Posteriormente dicho modelo se llevará a un programa de computadora el cual se caracterizará por su fácil uso y por la simplificación de los procedimientos para estimar tanto los niveles de presión sonora producidos por el tráfico vehicular, como los diseños para el control de ruido.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Investigar toda la información disponible y pertinente referente a la generación de ruido del tráfico vehicular, haciendo énfasis en el ruido producido en vías de alta densidad.
- Establecer, a partir de la información obtenida, los criterios y procedimientos más idóneos para crear un modelo matemático que permita estudiar y analizar la generación de ruido en el tráfico vehicular.
- Diseñar un programa de computación que permita al ingeniero mecánico estimar y cuantificar el ruido generado del tráfico vehicular en vías de alta densidad.
- Presentar el modelo y el programa para su evaluación, revisión y corrección, a fin de entregar la versión ó edición definitiva del mismo.
- Contrastar los resultados obtenidos por el programa de computadora desarrollado con grupos de datos experimentales para verificar la precisión del mismo.

1.3.3 ALCANCES.

- a) Revisar los modelos físico-matemáticos que representan el estado del arte en la generación de ruido del tráfico vehicular en vías de alta densidad.
- b) Desarrollar un marco teórico que permita al ingeniero mecánico el estudio y comprensión de la generación de ruido del tráfico vehicular en vías de alta densidad.

- c) Ofrecer un modelo válido que permita al profesional de la Ingeniería Mecánica analizar y cuantificar de manera razonable y aproximada la generación de ruido del tráfico vehicular en vías de alta densidad.

- d) Permitir tanto al estudiante como al profesional de la Ingeniería Mecánica utilizar un programa de computadora que facilite el análisis y estudio de la generación de ruido del tráfico vehicular en vías de alta densidad.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 FÍSICA DEL SONIDO

El sonido es un disturbio vibratorio en la presión y la densidad de un medio gaseoso, líquido o en la tensión elástica de un sólido, creado por un movimiento de fuentes vibrantes que es capaz de ser detectado por los órganos de la audición. Se puede interpretar al sonido como la energía mecánica de un objeto vibratorio transmitido por ondas de presión a través de un medio al oído humano (o animal). El medio principal de propagación de mayor importancia es el aire. En ausencia de cualquier otra declaración calificativa, el sonido será considerado sonido transportado por el aire, a diferencia de, por ejemplo, el sonido transportado por una estructura o por tierra.

La propagación del sonido consta de tres componentes: 1) la fuente de sonido, 2) la trayectoria de sonido, y 3) el receptor del sonido. Estos tres componentes deben estar presentes para que exista el sonido. Sin una fuente para producir sonido, indiscutiblemente no hay sonido. De igual manera, sin un medio para transmitir ondas de presión sonora tampoco existe ningún sonido. Y finalmente, el sonido debe ser recibido, por un órgano auditivo, sensor, u objeto que deba estar presente para percibir, registrar, o estar afectado por el sonido o ruido. En la mayoría de las situaciones, existen muchas fuentes de sonido, diferentes trayectorias y receptores, en lugar de sólo uno de cada uno.

La acústica es la ciencia que trata con la generación, la propagación, recepción, efectos, y control del sonido. El campo es muy amplio, el ruido relacionado al transporte y su disminución, cubren sólo una parte pequeña y especializada de la acústica.

2.1.1 VELOCIDAD DEL SONIDO.

La **velocidad del sonido** es la velocidad de propagación de las ondas sonoras, un tipo de ondas mecánicas longitudinales producido por variaciones de presión del medio. Estas variaciones de presión generan en el cerebro la sensación del sonido. Esto resulta en una serie de ondas de presiones aéreas altas y bajas (en comparación con la presión atmosférica ambiental estable) alternantes en simpatía con las vibraciones. Estas ondas de presión - no el aire mismo - se mueven desde la fuente a la velocidad del sonido, a aproximadamente 343 m/seg (1126 pies/seg) en el aire a 20°C. La velocidad del sonido puede ser calculado a través de la siguiente fórmula:

$$c = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \left(\frac{P}{\rho}\right)} = \sqrt{K \left(\frac{P}{\rho}\right)} \quad [m/seg] \quad (2.1)$$

En dónde:

c = velocidad del sonido a una temperatura dada, en metros por segundo (m/seg)

P = presión del aire en Newton por metro cuadrado (N/m²) o de Pascal (Pa)

ρ = densidad del aire en kilogramos-masa por metro cúbico (kg / m³)

K = proporción de los calores específico del aire bajo presión constante y volumen constante, la cual a 20 °C es igual a 1,401.

Para una temperatura dada y una humedad relativa, la proporción P/ρ tiende a permanecer constante en la atmósfera, porque la densidad del aire se

reducirá o aumentará proporcionalmente con los cambios de presión. Por lo tanto, la velocidad del sonido en nuestra atmósfera es independiente de la presión atmosférica. Sin embargo, cuando la temperatura del aire cambia, ρ cambia, mientras que P no; la velocidad del sonido es por lo tanto dependiente de la temperatura. El hecho de que la velocidad del sonido cambia con la altitud, no tiene nada que ver con el cambio en la presión atmosférica, y es causado solo por el gradiente en la temperatura.

Para aire seco a 0° Celsius, $\rho = 1.2929 \text{ Kg/m}^3$, a una presión aérea estándar de 760 mmHg, la presión en Pa = 101,329 Pa. Usando la ecuación (2.1), la velocidad del sonido para la presión y temperatura estándar, puede ser calculada:

$$c = \sqrt{(1.401)\left(\frac{101329}{1.2929}\right)} = 331.1 \text{ m/seg} \longrightarrow 1087.3 \text{ pies/seg}$$

De este valor base, la diferencia con la temperatura es descrita por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Unidades Métricas (m/seg):} \quad c = 331.4 \sqrt{1 + \frac{T_C}{273.2}} \text{ m/seg} \quad (2.2)$$

$$\text{Unidades Inglesas (pies/seg):} \quad c = 1051.3 \sqrt{1 + \frac{T_F}{459.7}} \text{ pies/seg} \quad (2.3)$$

En donde:

c = Velocidad del sonido en m/seg.

T_C = Temperatura en Grados Celsius.

T_F = Temperatura en Grados Fahrenheit.

Las ecuaciones anteriores muestran que la velocidad del sonido crece y decrece proporcionalmente con la temperatura del aire. Este fenómeno tiene un papel importante en los efectos atmosféricos sobre la propagación de ruido, específicamente a través del proceso de la refracción.

2.1.2 FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA.

Para un tono particular de sonido, las ondas de presión sonora se caracterizan por una onda periódica sinusoidal (recurriendo a los intervalos regulares) como se muestra en la Figura 2.1. La curva superior indica cómo la presión de sonido varía por encima y por debajo de la presión atmosférica ambiental a cierta distancia en algún momento dado. La curva más baja indica cómo la velocidad de partícula varía encima de cero (moléculas que se mueven a la derecha) y bajo cero (moléculas que se mueven a la izquierda). La velocidad de partícula describe el movimiento de las moléculas de aire en respuesta a las ondas de presión. Ésto no se refiere a la velocidad de las ondas, sino a lo que se conoce como la velocidad del sonido. La distancia (λ) entre las crestas de ambas curvas es la longitud de onda del sonido.

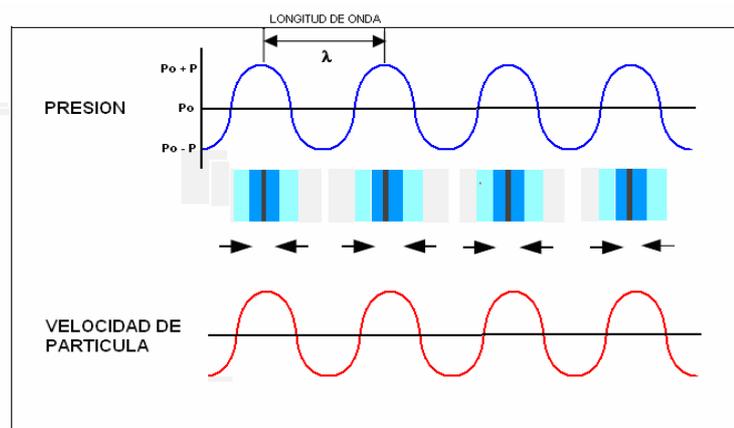


Fig. 2.1 Onda de Presión
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

El número de veces por segundo que la onda pasa desde un período de compresión a través de un período de rarefacción o vacío y empieza otro período de compresión, se refiere a la frecuencia de onda (ver Figura 2.2).

La frecuencia se expresa en ciclos por segundo, o Hertz (Hz.). El rango extremo de las frecuencias percibidas por el oído humano saludable abarca desde 16 a 20 Hz en el rango más bajo y aproximadamente 20000 Hz (o 20 kHz) en el rango más alto. Los sonidos agudos causan las altas frecuencias, los sonidos graves causan las bajas frecuencias. El sonido por debajo de 16 Hz se refiere al infrasonido, mientras que el sonido de alta frecuencia por encima de 20000 Hz es llamado ultrasonido. Tanto el infrasonido como el ultrasonido, no son audibles para los seres humanos. Sin embargo, muchos animales pueden escuchar o intuir las frecuencias que se extienden tanto en uno o ambos rangos de estas regiones. El ultrasonido también tiene varias aplicaciones en procesos industriales y médicos.³

La distancia recorrida por una onda de presión sonora a través de un ciclo completo se conoce como la longitud de onda y la duración de un ciclo es llamado período, siendo éste el inverso de la frecuencia. Por ejemplo, la frecuencia de una serie de ondas con períodos de 1/20 de un segundo es 20 Hz y un período de 1/1000 de un segundo es 1000 Hz, o 1 KHz. Aunque las vibraciones de baja frecuencia que se propagan en el suelo, como los sismos y el balanceo de puentes u otras estructuras son referidos a menudo por período, el término es usado rara vez al expresar las características de sonido aerotransportadas.

La Figura 2.2 muestra que cuando la frecuencia de la onda de presión sonora aumenta, la longitud de onda se acorta, y viceversa. La relación entre la

³ Hendriks “**Technical Noise Supplement**” Octubre 1998

frecuencia y longitud de onda se vincula por la velocidad de sonido como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m](2.4) \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad [Hz](2.5) \quad c = f\lambda \quad [m/seg](2.6)$$

En donde:

λ = Longitud de Onda (m o pies).

c = Velocidad de Sonido (343.3 m/seg, o 1126.5 pies / seg a 20°C, o 68°F).

f = Frecuencia (Hz).

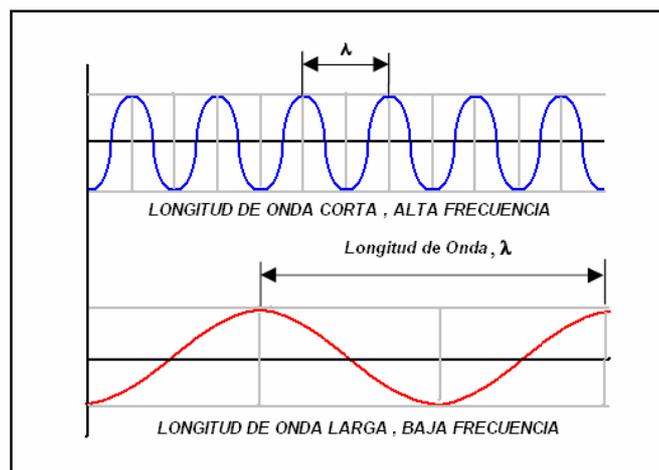


Fig. 2.2 Frecuencia y Longitud de Onda
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

La frecuencia es generada normalmente por procesos mecánicos en las fuentes (la rotación de una rueda, o el movimiento de pistones de un lado a otro, etc.) y por lo tanto no es afectado por la temperatura del aire. Como resultado, la longitud de onda varía inversamente con la velocidad del sonido así como luego varía con la temperatura.

Usando la ecuación (2.4) se puede desarrollar una tabla que indique la frecuencia y la longitud de onda asociada. La Tabla 2.1 indica la relación frecuencia/longitud de onda a una temperatura del aire de 20°C (68°F). Se puede verificar la validez de la Tabla 2.1 multiplicando cada frecuencia por su longitud de onda, y en cada caso debe ser igual a la velocidad del sonido.

Tabla 2.1 Longitud de Onda de Varias Frecuencias

Frecuencia (Hz)	Longitud de Onda a 20°C(68°F) m(ft)
16	21 (70)
31.5	11 (36)
63	5.5 (18)
125	2.7 (9)
250	1.4 (4.5)
500	0.7 (2.3)
1000	0.34 (1.1)
2000	0.17 (0.56)
4000	0.09 (0.56)
8000	0.04 (0.14)
16000	0.02 (0.07)

(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

2.1.3 ESPECTRO, TEORÍA DE FOURIER.

El concepto de **espectro** es de importancia capital en Acústica. Cuando se introduce el concepto de frecuencia, las ondas periódicas tienen asociadas una sola frecuencia. Sin embargo, esto es sólo parte de la verdad, ya que por lo general dichas ondas contienen varias frecuencias a la vez. Esto se debe a un notable teorema matemático denominado Teorema de Fourier (en honor a su descubridor, el matemático y físico francés Joseph Fourier), que afirma que cualquier forma de onda

periódica puede descomponerse en una serie de ondas de una forma particular denominada **onda senoidal** (o **senoide**, o **sinusoide**), cada una de las cuales tiene una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de la onda original (**frecuencia fundamental**). Así, cuando escuchamos un sonido de 100 Hz, realmente estamos escuchando ondas senoidales de frecuencias de 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, etc. Estas ondas senoidales se denominan **armónicos** del sonido original, y en muchos instrumentos musicales (como la guitarra) son claramente audibles.⁴

En las Figura 2.3 y 2.4 se examinan dos ejemplos de análisis de Fourier de formas de onda ideales, una *onda cuadrada* y una *onda diente de sierra*. Una onda cuadrada consiste en dos niveles de amplitud (uno positivo y otro negativo) que se alternan en el tiempo, cada uno de ellos por un tiempo $T/2$. La onda diente de sierra tiene una bajada en forma de rampa y una rápida subida (vertical), que se repite en cada periodo T .

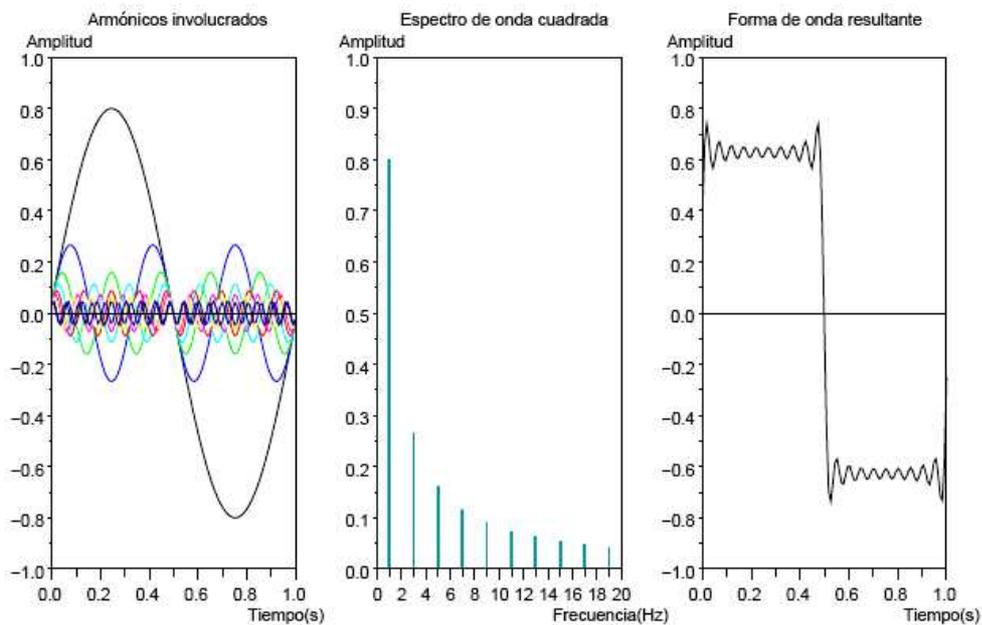


Fig. 2.3 Ejemplo de síntesis de Fourier de ondas ideales: Onda cuadrada. Se utilizan 10 componentes en la síntesis. (Fuente: Acústica Musical, 2006)

⁴ Miyara “La Naturaleza del Sonido”, 1999.

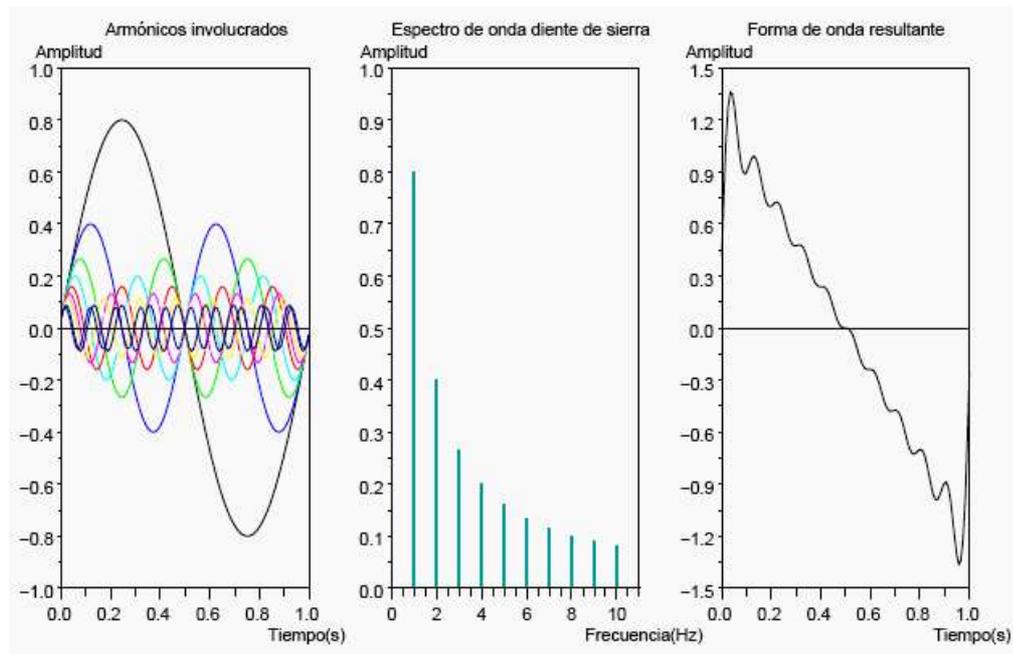


Fig. 2.4 Ejemplo de síntesis de Fourier de ondas ideales: Diente de Sierra. Se utilizan 10 componentes en la síntesis. (Fuente: Acústica Musical, 2006)

2.1.4 NIVEL DE POTENCIA SONORA E INTENSIDAD DEL SONIDO.

El nivel de potencia sonora o nivel de potencia acústica es la medida logarítmica de potencia sonora en comparación a un nivel de referencia especificado y se calcula según la ecuación:

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.7)$$

Donde: L_w = Nivel de Potencia sonora en dB.

W = Potencia Sonora en Watt.

W_0 = Potencia sonora de referencia (10^{-12} Watt).

La intensidad del sonido corresponde al flujo de energía sonora por unidad de área y sus unidades fundamentalmente son watts por metro cuadrado. Dicho de otro modo la intensidad del sonido es una medida de la amplitud de la vibración. La ecuación en el caso de una fuente puntual sería:

$$I(r) = \frac{W}{A} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.8)$$

Donde: A = Área de propagación, $[m^2]$.

En condiciones de campo abierto, la intensidad del sonido también puede definirse como se muestra en la expresión (2.9), donde P es la presión sonora, ρ es la densidad de medio y c la velocidad del sonido.

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad (2.9)$$

El oído humano puede acomodarse a un intervalo de intensidades sonoras bastante grande, desde 10^{-12} w/m^2 aproximadamente (que normalmente se toma como umbral de audición), hasta 1 w/m^2 aproximadamente que produce sensación dolorosa en la mayoría de las personas. Debido a este gran intervalo y a que la sensación fisiológica de fuerza sonora no varía directamente con la intensidad, se utiliza una escala logarítmica para describir el nivel de intensidad (β) de una onda sonora.

$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.10)$$

Donde: I = Intensidad del sonido

I_o = Intensidad de referencia cuyo valor es 10^{-12} W/m^2 .

2.1.5 NIVELES DE PRESIÓN SONORA, DECIBELES (dB).

Al hacer referencia de nuevo a la Figura 2.1, hay que recordar que las ondas de presión sonora cambian constantemente con el tiempo o con la distancia, y dentro de ciertos rangos. Los rangos de estas fluctuaciones de presión (en realidad las desviaciones de la presión del aire ambiental) se denominan amplitud de ondas de presión; mientras que la frecuencia de las ondas sonoras es responsable de la intensidad o el tono de un sonido, la amplitud determina el volumen del sonido. Éste aumenta y disminuye con la amplitud.

Las presiones sonoras pueden ser medidas en unidades de micro Newton por metro cuadrado ($\mu\text{N}/\text{m}^2$) llamado micro Pascales (μPa). 1 μPa es aproximadamente una cienmillonésima parte de la presión atmosférica normal. La presión de un sonido muy fuerte podría ser 200.000.000 μPa o 10.000.000 veces la presión del sonido audible más débil (20 μPa). Al expresar niveles de sonido en términos de μPa sería muy voluminoso, sin embargo, debido a ésta el rango es amplio. Por esta razón, los niveles de presión sonora (NPS o llamado también SPL por sus siglas en inglés) se describen en unidades logarítmicas de proporciones de presiones sonoras verdaderas a una presión de referencia al cuadrado. Estas unidades son llamados belios, nombradas así por Alexander Bell. Para proveer una solución más precisa, un belio es subdividido en 10 decibeles (deci o décimo de un belio), abreviado dB. En su forma más simple, el nivel de presión sonora en decibeles es expresado por el término:

$$\text{Nivel de Presión Sonora (NPS)} = 10 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (2.11)$$

Donde:

P_1 = Presión sonora.

P_0 = Presión de referencia, normalizada como 20 μPa .

La presión de referencia normalizada, P_0 , de 20 μPa , es el umbral absoluto de la audición en adultos jóvenes sanos. Cuando el nivel de presión de sonido verdadero es igual a la presión de referencia, la expresión:

$$10 \cdot \text{Log}_{10}\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2 = 10 \text{Log}_{10}(1) = 0 \quad [\text{dB}]$$

Hay que notar que 0 dB no quiere decir falta de presión de sonido. En vez de esto, es un valor extremo que solamente aquellos con los oídos más sensibles pueden detectar. Por lo tanto, es posible referirse a sonidos menores a 0 decibeles (los decibeles negativos), para las presiones sonoras que son más débiles que el umbral del oído humano. Para la mayoría de las personas, el umbral del oído es mayor a 0 decibeles, probablemente más cerca a 10 decibeles.

2.1.6 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DE POTENCIA SONORA, NIVEL DE INTENSIDAD DE UNA ONDA SONORA Y NIVEL DE PRESIÓN SONORA.

Usando las ecuaciones (2.9), (2.10) y (2.11) se tiene que:

$$\beta = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) \Rightarrow \beta = 10 \cdot \log\left(\frac{P^2}{\rho \cdot c \cdot I_{ref}}\right) \Rightarrow \beta = 10 \cdot \log\frac{P^2}{P_{ref}^2} \cdot \frac{P_{ref}^2}{\rho \cdot c \cdot I_{ref}} \quad [\text{dB}]$$

(2.12)

$$\beta = NPS - C_1 \quad [\text{dB}] \quad (2.13)$$

Donde:

$$C_1 = 10 \cdot \log\left(\frac{I_{ref} \cdot \rho \cdot c}{P_{ref}^2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{\rho \cdot c}{400}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.14)$$

En condiciones estándar (temperatura del aire igual a 22° C y presión atmosférica igual a 760 mmHg), $\rho c = 412 \text{ N}\cdot\text{seg}/\text{m}^3$, siendo entonces $C_1 = 0.13 \text{ dB}$, una cantidad considerada como despreciable. Por esta razón se puede decir que para una propagación libre de ondas en campo abierto:

$$\beta = NPS \quad [\text{dB}] \quad (2.15)$$

Cuando la intensidad del sonido es uniforme en un área S , el poder de sonido y la intensidad están relacionadas por la ecuación (2.16), siendo $w_0 = I_{\text{ref}} S_0$, donde S_0 es el área de referencia (1 m^2), por lo cual se tiene que:

$$L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \Rightarrow L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{I \cdot S}{I_{\text{ref}} \cdot S_0}\right) \Rightarrow L_w = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_{\text{ref}}}\right) + 10 \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.16)$$

$$L_w = \beta + 10 \log S \quad [\text{dB}] \quad (2.17)$$

Tomando la ecuación anterior y asumiendo un área de 1 m^2 se tiene que $L_w = \beta$, considerando que este valor de potencia sonora es expresado por metro cuadrado.

2.1.7 RAÍZ MEDIA CUADRÁTICA (r.m.s), ENERGÍA RELATIVA.

La Figura 2.5 representa una curva sinusoidal de onda de presión, en donde los valores de las ondas de presión fueron cambiando constantemente, incrementando a un valor máximo por encima de la presión atmosférica normal, para luego disminuir a un valor mínimo debajo de la presión atmosférica normal, en un modo repetitivo. Esta curva sinusoidal está relacionada con un sonido de

frecuencia simple, también llamado un tono puro. Cada onda de presión de sonido sucesiva tiene las mismas características que la onda previa. Las características de la amplitud de tal serie de ondas simples pueden ser descritas de varias maneras, las cuales se relacionan unas con otras. Dos de las maneras más comunes para describir la amplitud de las ondas son, en términos del nivel de presión sonora pico (NPS) y la raíz media cuadrática (r.m.s.)⁵.

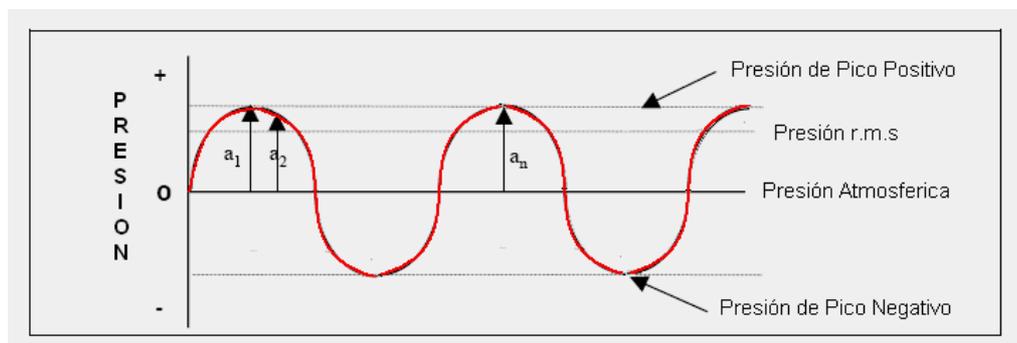


Fig. 2.5 Presión Pico Vs. Presión Sonora r.m.s
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

El valor del r.m.s. de las amplitudes de onda (desviaciones de presión) usa todas las amplitudes instantáneas positivas y negativas. Esto se obtiene al elevar al cuadrado las desviaciones de presión instantáneas positivas y negativas, luego son sumadas dichas desviaciones y esta suma es dividida entre el número de desviaciones de presión.

El resultado es llamado el cuadrado de la media de las desviaciones de presión, y al tomar la raíz cuadrada de este valor de media es denominado el valor de r.m.s (raíz media cuadrática). La Figura 2.5 muestra la relación entre el pico y el r.m.s. para una onda sinusoidal, siendo el r.m.s. 0.707 veces el valor pico.

⁵ r.m.s : Root Mean Square , Raíz Media Cuadrática

En términos de muestras distintas de las desviaciones de la presión la ecuación matemática es:

$$\text{Presión r.m.s} = \sqrt{\left(\sum_1^n (P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2) / n\right)} \quad (2.18)$$

Las presiones sonoras expresadas en el r.m.s son proporcionales al contenido de energía de las ondas, y por lo tanto son las medidas de amplitud más importante y frecuentemente usada.

2.1.8 ADICIÓN Y SUSTRACCIÓN DE NIVELES DE PRESIÓN SONORA.

Debido a que los decibeles son unidades logarítmicas, los niveles de presión sonora no pueden ser sumados ni restados por medios aritméticos ordinarios. Para estimar el nivel de presión sonora total de dos o más fuentes, si es conocido el NPS de cada fuente se usa la ecuación (2.19), la cual se obtiene de la expresión (2.18).

$$\frac{P_T}{P_{ref}} = \left[\sum_{J=1}^N \left(\frac{P_{J_{RMS}}}{P_{ref}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

Empleando la ecuación (2.11):

$$10^{(L_T/20)} = \left[\sum_J 10^{(L_J/10)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Donde P_T es la presión sonora total, P_J es la presión de cada fuente, L_T es el nivel de presión sonora total y L_J es el nivel de presión sonora de cada fuente. La Tabla 2.2 se usa para fines prácticos en el caso de la suma de decibeles, la cual tiene un error despreciable para la mayoría de los casos.

Tabla 2.2 Suma de Niveles de Presión Sonora.

Cuando dos Valores difieren por:	Sumar este monto al valor mas alto
0 o 1 dB	3 dB
2 o 3 dB	2 dB
4 o 9 dB	1 dB
10 dB o mas	0 dB

(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

2.1.9 BANDA DE OCTAVA Y TERCIO DE OCTAVA, ESPECTRO DE FRECUENCIA.

Como fue expuesto anteriormente pocos sonidos son tonos puros (consiste de una simple frecuencia) y para representar las características completas de un sonido apropiadamente, es necesario descomponer el sonido total en sus componentes de frecuencia; es decir, determinar cuánto sonido viene de cada uno de las múltiples frecuencias que hacen el sonido (el nivel de presión sonora). Esta representación de la frecuencia versus el nivel de presión sonora es llamado espectro de frecuencia. Espectros (espectra) constan de 8 a 10 bandas de octava, más o menos cruzando el rango de frecuencia del oído humano (20 – 20.000 Hz). Las bandas de octava son internacionalmente normalizadas e identificadas por sus "Frecuencias Centrales" (medios realmente geométricos).

A causa de que las bandas de octava son algo anchas, son frecuentemente subdivididas en tercios para crear bandas 1/3 octava. Éstos están también normalizados. A conveniencia las bandas 1/3 octava son a veces enumeradas desde la banda No. 1 (1.25 Hz 1/3 de octava de frecuencia central, el cual puede ser escuchado por seres humanos) hasta la banda No 43 (20.000Hz 1/3 de octava de frecuencia central). Dentro del rango extremo de la audición humana hay 30 tercios de octavas de banda a partir del No. 13 (20 Hz 1/3 de octava de frecuencia central),

hasta No. 42 (16.000 Hz 1/3 de octava de frecuencia central). La Tabla 2.3 indica los rangos de la octava normalizada y las bandas 1/3 octava, y N° de banda.

Tabla 2.3 No. de Bandas Normalizadas, Frecuencia Centro, Banda de 1/3 Octava y 1 Octava, y Rango de Banda de Octava

No. de Banda	Frecuencia Centro (Hz)	Rango de Banda 1/3 de Octava (Hz)	Rango de Banda de 1 Octava (Hz)
12	16	14.1 – 17.8	11.2 – 22.4
13	20	17.8 – 22.4	
14	25	22.4 – 28.2	
15	31.5	28.2 – 35.5	22.4 – 44.7
16	40	35.5 – 44.7	
17	50	44.7 – 56.2	
18	63	56.2 – 70.8	44.7 – 89.1
19	80	70.8 – 89.1	
20	100	89.1 – 112	
21	125	112 - 141	89.1 – 178
22	160	141 – 178	
23	200	178 – 224	
24	250	224 - 282	178 – 355
25	315	282 – 355	
26	400	355 – 447	
27	500	447 - 562	355 – 708
28	630	562 – 708	
29	800	708 – 891	
30	1000	891 - 1120	708 – 1410
31	1250	1120 – 1410	
32	1600	1410 – 1780	
33	2000	1780 - 2240	1410 – 2820
34	2500	2240 – 2820	
35	3150	2820 – 3550	
36	4000	3550 - 4470	2820 – 5620
37	5000	4470 – 5620	
38	6300	5620 – 7080	
39	8000	7080 - 8910	5620 – 11200
40	10000	8910 – 11200	
41	12500	11200 – 14100	
42	16000	14100 - 17800	11200 – 22400
43	20000	17800 - 22400	

(Fuente: Cruel & Kjaer Pocker Handbook – Noise. Vibration, Light, Termal Comfort, September 1986).

Las longitudes de onda sirven para determinar la eficacia de barreras de ruido. El ruido de baja frecuencia, con sus longitudes de onda larga, pasa fácilmente alrededor y sobre una barrera de ruido con poca pérdida en la intensidad.

La Figura 2.6 muestra un espectro típico de la frecuencia de la banda octava. Las bandas de octava son representadas con el mismo ancho, aunque cada banda sucesiva debe aumentar por un factor dos cuando se expresa linealmente en términos de incrementos de Hertz, lo cual puede observarse en dicha figura, donde la primera frecuencia central es 31,5 Hz y la segunda es 63 Hz, es decir que esta última tiene doble ancho de banda con respecto a la primera.

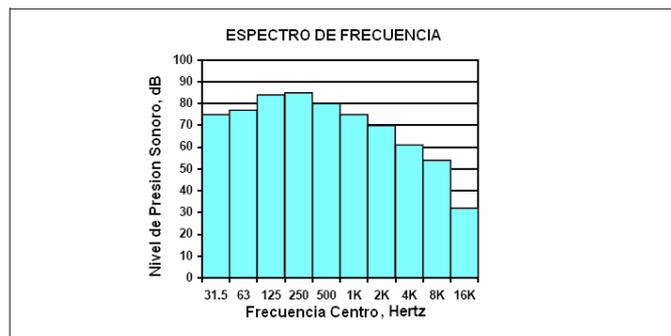


Fig. 2.6 Típico Espectro de Frecuencia de Banda de Octava
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

Con frecuencia, se tiene interés en el nivel del ruido total, o en la suma de todas las bandas de octava.

El mismo tipo de gráficos puede ser compilado de la información de la banda 1/3-octava. Por ejemplo, al tener información de 1/3-octava detallada para el espectro anterior, se podría construir un espectro de la banda de 1/3 octava como el mostrado en la Figura 2.7.

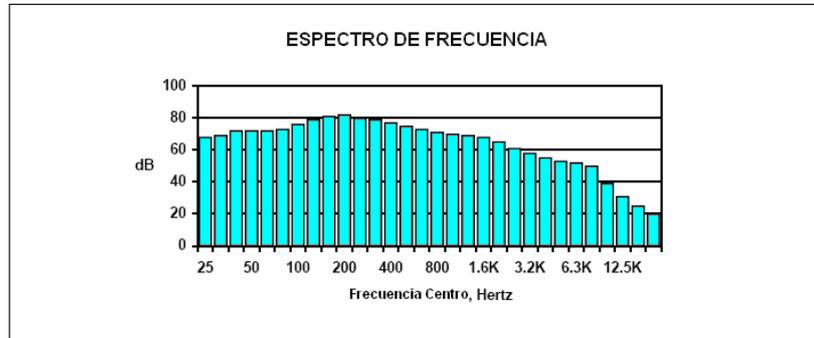


Fig. 2.7 Típico Espectro de Frecuencia de Banda 1/3 Octava
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

Se puede notar que el nivel del ruido total no cambia, y que cada subdivisión de tres bandas de 1/3 octava ascienden a la banda total de octava mostrada en el ejemplo previo.

2.1.10 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DE PRESIÓN SONORA, ENERGÍA RELATIVA, PRESIÓN RELATIVA, Y PRESIÓN SONORA.

La Tabla 2.4 muestra la relación entre el NPS, la energía sonora relativa, presión sonora relativa, y presión. Se puede notar que el NPS, la energía de relativa, la presión relativa se basan en una presión de referencia de $20 \mu\text{Pa}$, y por definición todo referido a 0 dB. Los valores de presión son las desviaciones de presión de r.m.s. verdaderas de la presión atmosférica ambiental local.

Tabla 2.4 Relación entre Nivel de Presión Sonora, Energía Relativa, Presión Relativa, Presión Sonora

Nivel de Presion Sonora, dB $10\text{Log}_{10}(p_1/p_0)^2$	Energía Relativa $(p_1/p_0)^2$	Presión Relativa (p_1/p_0)	Presion Sonora μPa P_1
200	10^{20}	10^{10}	
140	10^{14}	10^7	
134			10^8
130	10^{13}		
120	10^{12}	10^6	
114			10^7
110	10^{11}		
100	10^{10}	10^5	
94			10^6
90	10^9		
80	10^8	10^4	
74			10^5
70	10^7		
60	10^6	10^3	
54			10^4
50	10^5		
40	10^4	10^2	
34			10^3
30	10^3		
20	10^2	10^1	

Nota: $P_0 = 20 \mu\text{Pa} = \text{Presión de Referencia}$

(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

2.1.11 CURVAS DE PONDERACIÓN.

Cuando se realizan mediciones de nivel de presión sonora, usualmente se quiere considerar con qué sonoridad los niveles medidos serán percibidos por el oído humano. Para ello, la medición realizada se debe ponderar de acuerdo a la respuesta que tiene el oído humano en función de la frecuencia. A causa de este requerimiento se crearon curvas de ponderación espectral para la medición del ruido, y luego los medidores de nivel de presión sonora comenzaron a incluirlas. Originalmente fueron definidas las curvas “A”, “B” y “C”, correspondiendo cada una a un rango de niveles

de sonoridad. La curva “A” fue concebida para niveles bajos (del orden de los 40 fonos⁶ lo cual es equivalente a 40 dB en 1000 Hz) la “B” para valores medios (alrededor de 70 fonos) y la “C” para los contornos de sonoridad superiores (aproximadamente 100 fonos).

Estas ponderaciones, además de adecuar cada banda de frecuencia a la respuesta del oído, cumplen la útil función de entregar un número único correspondiente a la suma energética de todas las bandas del sonido medido (cada una de ellas con su respectiva corrección de acuerdo a la ponderación empleada).

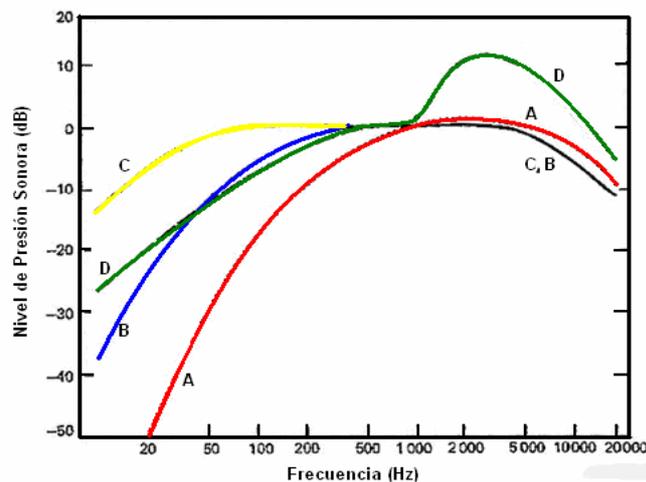


Fig. 2.8 Curva de Ponderación Espectral
(Fuente: Análisis de la Eficiencia de la Ponderación “A” para evaluar efectos de ruido en el ser humano, Chile 2004)

De estas tres antiguas ponderaciones, la que más se utiliza actualmente es la “A”. Es cuestión de revisar cualquier normativa o legislación sobre ruido, ó bien algún instrumento de medición acústica para encontrarse con los *decibeles* “A” (o *dBA*). En la Figura 2.8 se presentan las curvas de ponderación “A”, “B”, “C” y “D”.

⁶ El fono es una unidad acústica usada para medir el nivel total de sonoridad de un ruido. Un tono puro de 1000 c/seg. a un nivel de intensidad de sonido de 1 dB se define como un sonido con nivel de sonoridad de 1 fono.

La curva “D” surgió en forma posterior a las primeras tres. Los dB(D) fueron concebidos para evaluar un evento único de ruido aeronáutico.

2.1.12 AJUSTES DE A-PONDERADO PARA LAS FRECUENCIAS CENTRALES DE BANDAS DE 1/3 OCTAVA.

Los espectros de frecuencia son expresados generalmente en forma lineal, sin ponderar los niveles de presión sonora (dB). Sin embargo, los espectros de frecuencia también pueden ser ponderados. Como lo muestra la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Ajustes de A-ponderado para las frecuencias centrales de bandas de 1/3 octava.

Frecuencia , Hz	“A” , Ponderado, dB	Frecuencia , Hz	“A” Ponderado, dB
16	-56.7	630	-1.9
20	-50.5	800	-0.8
25	-44.7	1000	0
31.5	-39.4	1250	0.6
40	-34.6	1600	+1.0
50	-30.6	2000	+1.2
63	-26.2	2500	+1.3
80	-22.5	3150	+1.2
100	-19.1	4000	+1.0
125	-16.1	5000	+0.5
160	-13.4	6300	-0.1
200	-10.9	8000	-1.1
250	-8.6	10000	-2.5
315	-6.6	12500	-4.3
400	-4.8	16000	-6.6
500	-3.2	20000	-9.3

(Fuente: American National Standards Institute (ANSI S1.4 (1983))

2.1.13 EXPANSIÓN GEOMÉTRICA DE FUENTES PUNTUALES Y LINEALES.

El sonido de una pequeña fuente localizada (aproximadamente una fuente "puntual") se irradia uniformemente hacia afuera al viajar lejos de la fuente, propagándose en forma esférica. El nivel de sonido se atenúa o disminuye en una tasa de 6 dBA por cada distancia duplicada (6dBA/DD). Esta disminución, debido a la expansión geométrica de la energía sobre un área creciente, se refiere a la ley del inverso al cuadrado. La distancia duplicada aumenta cada unidad de área, representado por los cuadrados de los lados "a" en la Figura 2.9 de a^2 a $4a^2$.

Como la misma cantidad de energía pasa por ambos cuadrados, la energía por unidad de área en 2D se reduce 4 veces respecto del ubicado a la distancia D. Así, para una fuente puntual, la energía por unidad de área es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Tomando $10 \log_{10} (1/4)$ resulta en una reducción de 6dBA (para cada distancia duplicada), siendo ésta la tasa de la atenuación de la fuente puntual para la expansión geométrica.

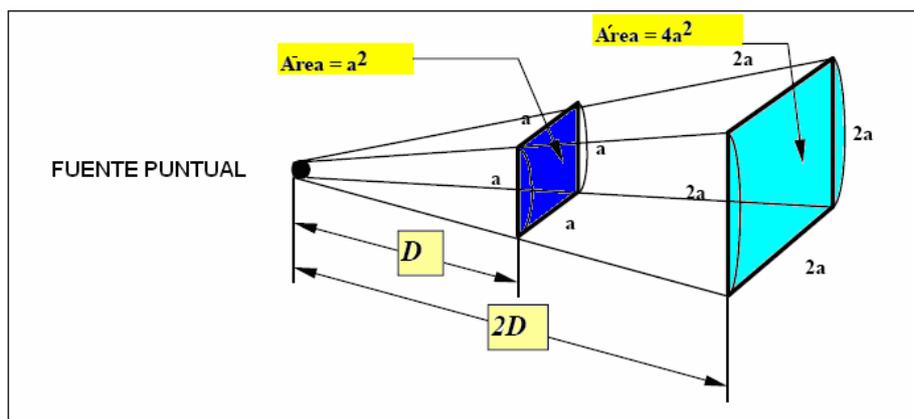


Fig. 2.9 Fuente Puntual
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

Sin embargo, el ruido del tráfico en autopistas no es una fuente puntual simple estacionaria de sonido. En este caso, el flujo de vehículos puede modelarse como una fuente lineal. Esto resulta en una expansión cilíndrica en vez de una expansión esférica, por lo que el área de superficie cambia a la de un cilindro sólo incrementado dos veces por cada doble del radio en vez de cuatro, el cambio en el nivel del sonido es 3 dBA por el doble de la distancia.

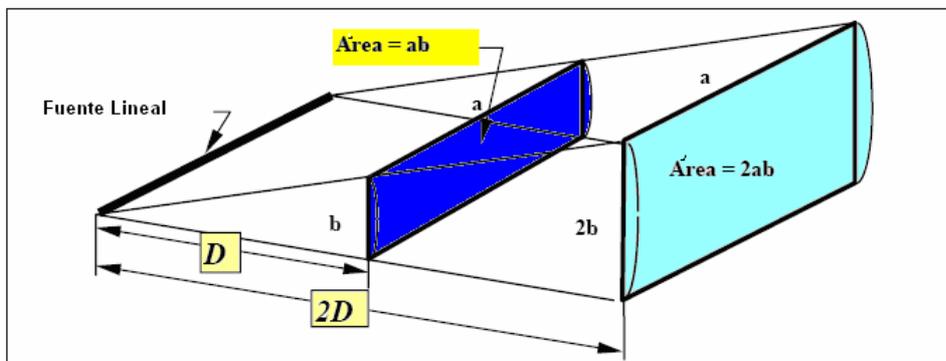


Fig. 2.10 Fuente Lineal
(Fuente: Technical Noise Supplement, 1998)

2.1.14 FUENTES LINEALES COHERENTES E INCOHERENTES.

Las fuentes lineales de sonido pueden ser divididas en dos grupos, fuentes lineales coherentes y fuentes lineales incoherentes, a continuación se explica la diferencia entre ambas:

a.- Fuentes coherentes.

Las fuentes coherentes son aquellas que emiten ondas de la misma longitud de onda a igual frecuencia, las cuales están en fase o tienen una diferencia de fase constante, como se aprecia en la Figura 2.11, dicha correlación proporciona la capacidad de predecir el comportamiento entre ondas coherentes. No es común la

existencia natural de este tipo de fuentes, en la mayoría de los casos son provocadas por el hombre para fines científicos. Un ejemplo de dos fuentes coherentes, se da cuando se colocan dos cornetas o altavoces una junto a la otra emitiendo un sonido idéntico al mismo tiempo.

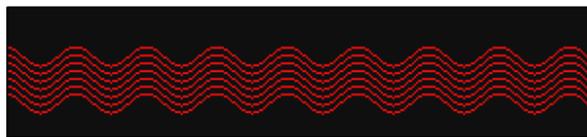


Fig. 2.11 Ondas producidas fuentes Coherentes.
(Fuente: Elaboración propia).

Cuando dos haces de ondas llegan al mismo plano sumarán sus efectos si llegan en fase o contrarrestarán sus efectos si llegan desfasados y su efecto combinado es obtenido sumando algebraicamente los desplazamientos en el punto hacia las fuentes individualmente. Esto es conocido como el principio de superposición, el cual fue descubierto por Thomas Young cerca de 1800. Cuando la diferencia de fase entre ellas es un múltiplo entero de π se detectará sonido y en el caso de ser múltiplo impar de $\pi/2$ no se detectará silencio, esto corresponde a máximos y mínimos de interferencia o también a la llamada interferencia constructiva y destructiva respectivamente.

b.- Fuentes Incoherentes.

Las fuentes incoherentes son aquellas que emiten ondas con distinta longitud de onda a igual frecuencia, sin ninguna relación entre su ángulo de fase, como se aprecia en la Figura 2.12. En este caso no hay una suma automática de la presión sonora, pero las potencias sonoras de ambas fuentes se deben sumar (duplicar la

potencia equivale a +3 dB de presión sonora), lo cual es válido cuando un punto es alcanzado por muchas fuentes o por sus reflexiones.

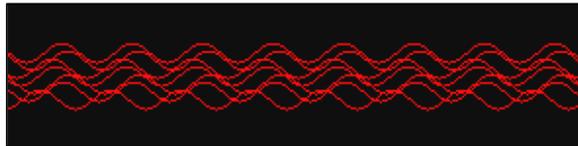


Fig. 2.12 Ondas Producidas por fuentes incoherentes
(Fuente: Elaboración propia).

La potencia o intensidad del sonido (energía) puede ser sumada, pero los niveles resultantes del sonido que son logarítmicos no pueden ser obtenidos mediante la suma. El nivel de presión sonora tiene que ser convertido en intensidad del sonido (W/m^2), o en presión de sonido (N/m^2), para después volver a convertirlo en nivel de presión sonora, todo lo cual requiere una gran labor de cálculo.

En el caso de la modelación de ruido del tráfico vehicular, cada vehículo es representado por un número de fuentes incoherentes puntuales. Cada fuente puntual se mueve junto con el vehículo formando una fuente lineal incoherente. Por lo tanto, un flujo de vehículos en el camino es modelado por un número de fuentes lineales incoherentes en diversas alturas y posiciones.

2.2 PROPIEDADES DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO.

2.2.1 RAYOS Y ONDAS.

Las ondas planas de extensión espacial infinita no existen en la naturaleza. Lo más cercano a una onda plana que se puede producir en un laboratorio, es la onda que viaja a lo largo de un tubo de paredes rígidas cuando la frecuencia es lo suficientemente baja, para que la longitud de onda sea mucho mayor que las dimensiones de la sección transversal del tubo. Aún en este caso, la influencia de la

viscosidad de las paredes introducirá desviaciones pequeñas pero medibles. En el mundo real, en vez de ondas planas se encuentran haces de sonido cuyas direcciones y áreas de sección transversal pueden cambiar conforme los haces atraviesan el medio. En tales circunstancias, es conveniente pensar en *rayos* en vez de *ondas*. Se puede definir un rayo como una línea que es, en todos lados, perpendicular a las superficies de fase constante. Su conveniencia reside en el sentimiento intuitivo, justificado matemáticamente bajo ciertas condiciones, de que la energía se transporta a lo largo de un rayo.

2.2.2 REFLEXIÓN.

La reflexión se da cuando una onda retorna al propio medio de propagación tras incidir sobre una superficie. Cuando una forma de energía, como la luz o el sonido, se transmite por un medio y llega a un medio diferente, lo normal es que parte de la energía penetre en el segundo medio y parte sea reflejada. Los ángulos que forman los rayos incidente y reflejado con la normal se denominan respectivamente ángulo de incidencia y ángulo de reflexión. En acústica, esta propiedad de las ondas es sobradamente conocida y aprovechada, no sólo para aislar, sino también para dirigir el sonido hacia el auditorio mediante placas reflectoras (reflectores y tornavoces).

Las superficies rugosas reflejan en muchas direcciones, y en este caso se habla de reflexión difusa, no obstante, la reflexión regular se da cuando la dirección de la onda reflejada está claramente determinada y cumple dos condiciones:

- El rayo incidente y el rayo reflejado forman el mismo ángulo con la normal, esto es una línea perpendicular a la superficie reflectante en el punto de incidencia.
- El rayo reflejado está en el mismo plano que el rayo incidente y la normal.

La Figura 2.13 ilustra la reflexión de ondas de una fuente sonora en una superficie rígida plana. Los frentes de onda esféricos chocan contra la pared y los frentes de onda reflejados retornan hacia la fuente. Los frentes de onda reflejados actúan como si fueran generados por una fuente localizada a la misma distancia detrás de la superficie que la fuente verdadera; éste es un caso simple con una sola superficie reflectante⁷.

Como ya se ha dicho la reflexión depende del tipo de superficie (lisa o rugosa), pero también de la forma de las mismas, es decir, que el modo en se reflejan las ondas en una superficie convexa no es igual a lo que sucedería si el área fuera cóncava.

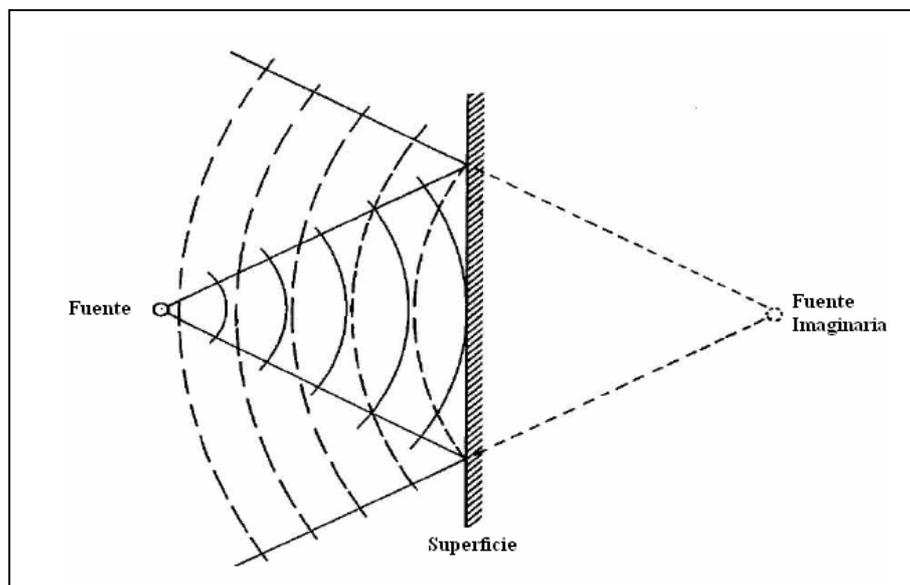


Fig. 2.13 Reflexión de ondas esféricas sobre una superficie plana
(Fuente: F. Alton Everest, "Master Handbook of Acoustics". 2001)

⁷ F. Alton Everest, "Master Handbook of Acoustics", McGraw-Hill, 2001.

Los fenómenos relacionados con la reflexión del sonido son la resonancia, el eco y la reverberación, los cuales son expuestos a continuación.

a.- Resonancia.

Es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar, es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuya frecuencia de vibración coincide con la frecuencia natural⁸ de dicho cuerpo. En estas circunstancias el cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras un estímulo periódico relativamente pequeño.

b.- Eco.

El oído puede distinguir separadamente sensaciones que estén por encima del tiempo de persistencia acústica⁹, que es 0,1 segundos para sonidos musicales y 0,07 segundos para sonidos secos (palabra). Por tanto, si el oído capta un sonido directo y, después de los tiempos de persistencia especificados, capta el sonido reflejado, se apreciará el efecto del eco. Tanto el retraso como el nivel sonoro del sonido reflejado dependen de las características físicas del recinto y sus superficies.

c.- Reverberación.

Cuando el tiempo de persistencia acústica es menor a 0,1 segundos para sonidos musicales y 0,07 segundos para sonidos secos (palabra) el sistema de audición humano no es capaz de separar ambas señales y las toma como una misma pero con una duración superior a la real; siendo esto lo que normalmente se conoce como reverberación. La reverberación del sonido en un recinto, se mide según su tiempo de reverberación en segundos y varía según la frecuencia de análisis que se utilice. Esto es debido a que los diferentes materiales que componen las superficies del recinto no se comportan por igual en todo el espectro sonoro, y por tanto los

⁸ La frecuencia natural es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando, después que se quita la fuerza de excitación.

⁹ Tiempo de retraso entre el sonido directo y el reflejado.

coeficientes de absorción de cada superficie de un mismo material varían según la frecuencia.

2.2.3 REFRACCIÓN.

Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro, lo cual sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad que experimenta la onda. El índice de refracción es precisamente la relación entre la velocidad de la onda en un medio de referencia (el vacío para las ondas electromagnéticas) y su velocidad en el medio de que se trate. Este fenómeno tiene importantes efectos sobre las ondas sonoras que se propagan por la atmósfera. En este sentido hace falta mencionar la disipación de energía que experimenta una onda cuando se propaga por la atmósfera debido a la refracción con la tierra. Si no hubieran pérdidas, un ruido con una potencia de 450.000 w, teniendo en cuenta que el mínimo de la intensidad sonora audible es de 10^{-16} W/cm², y que consideramos que el frente de onda que se propaga es una superficie esférica, se escucharía a una distancia de:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{450000W}{(4 \cdot \pi \cdot r^2)/2} \Rightarrow r = 2,6 \times 10^5 \text{ [Km]}$$

Esta estimación de la audición del sonido es infinitamente superior al que existe en realidad sobre la Tierra, pues un ruido de esta potencia deja de ser audible a una distancia de pocos kilómetros (3 o 4 kilómetros en condiciones favorables).

2.2.4 DIFRACCIÓN.

La propagación de las ondas cuando pasan por una apertura estrecha es muy diferente a la que experimentaría un grupo de partículas. La Figura 2.14 muestra la diferencia de trayectorias entre las ondas y las partículas cuando pasan a través de una apertura estrecha.

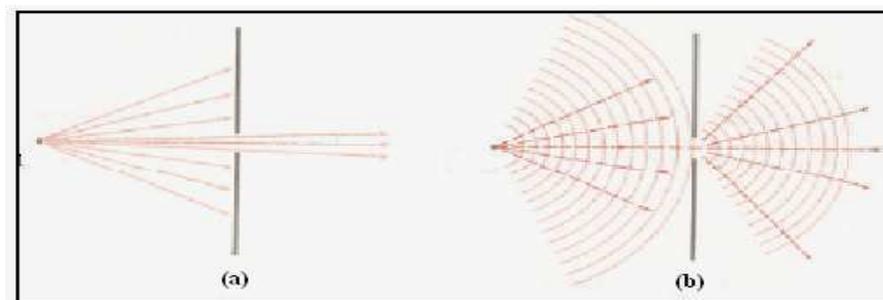


Fig. 2.14 Comparación de la transmisión de partículas (a) y ondas (b).

(Fuente: Joaquim Ruiz Fluvià, 2005)

El dibujo en la parte (a) señala la dirección únicamente de las partículas que inciden directamente sobre la apertura y así consiguen pasar la barrera. Las que impactan sobre el obstáculo sólido de la barrera, por el contrario, son reflejadas. Este fenómeno es muy diferente si en lugar de pequeños objetos sólidos se proyectan ondas (b), pues éstas inciden sobre los bordes del orificio y parece que se doblan, desviándose de su dirección inicial. Este fenómeno es denominado difracción, es decir, que éste se presenta cuando hay dispersión y curvado aparente de las ondas al encontrarse con un obstáculo.

El cálculo del diagrama de ondas de difracción es complicado, pero se puede conseguir una buena aproximación empleando un método geométrico descubierto por Huygens, pero debido a inconsistencias en este método Kirchhoff¹⁰, en el siglo XIX, postula la siguiente teoría la cual está vigente hasta hoy en día:

¹⁰ Físico alemán cuyas principales contribuciones científicas estuvieron en el campo de los circuitos eléctricos, la teoría de placas, la óptica, la espectroscopia y la emisión de radiación de cuerpo negro.

“Si el obstáculo o apertura es grande en comparación a la longitud de onda, no se observa ninguna desviación en el frente de onda y la propagación se da en línea recta o de manera similar a como lo haría un grupo de partículas”.¹¹

Un resultado importante que se obtiene del cálculo del diafragma de difracción de las ondas planas que inciden sobre una apertura circular pequeña es que a gran distancia de la apertura, casi toda la intensidad de la onda se confina en un cono de semiángulo Φ y diámetro D que está relacionado con la longitud de onda por:

$$\text{sen}\Phi \approx \frac{\lambda}{D} \quad (2.21)$$

Así, si la longitud de la onda es pequeña, en comparación a D , se confinan en la dirección que tienen delante. Por esta razón, las ondas con longitudes de onda corta y altas frecuencias que proceden de un altavoz tienden a concentrarse en la dirección que tienen delante, más que las ondas de baja frecuencia, que se expanden en todas direcciones.

2.2.5 ABSORCIÓN.

Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio. Todos los medios absorben un porcentaje de energía que se propaga, ninguno es completamente opaco, es decir, que ningún medio es capaz de reflejar toda la energía recibida.

En relación con la absorción ha de tenerse en cuenta:

¹¹ Joaquim Ruiz Fluvià. “Desenvolupament de Mètodes de Predicció de Soroll i Anàlisi de l’Impacte Acústic Produït Pel Trànsit Viari i el Ferrocarril en la Ciutat de Girona”. Universidad de Girona, 2005.

- El coeficiente de absorción que indica la cantidad de sonido que absorbe una superficie en relación con la energía sonora incidente, normalmente, se expresa en Sabines (unidad de coeficiente de absorción), dentro de una escala de 0 a 1.
- La frecuencia crítica, se define como la frecuencia a partir de la cual una pared rígida empieza a absorber parte de la energía de las ondas incidentes. Esta frecuencia crítica, así mismo, dependerá del espesor del obstáculo. A mayor espesor, la frecuencia incidente tendrá menor capacidad de penetración.

2.2.6 ATENUACIONES EN EXTERIORES.

2.2.6.1 Absorción Atmosférica.

La absorción atmosférica depende fundamentalmente de la humedad relativa, la temperatura y la frecuencia de la onda sonora. Una pequeña parte de la onda sonora se pierde en el aire debido a varios procesos físicos. Uno de los más importantes es el debido a la conducción de la vibración por el medio en forma de calor, provocado por la conversión del movimiento molecular coherente de la onda en movimiento molecular incoherente que se dispersa por el aire. La viscosidad del medio, también tiene influencia en la transmisión del sonido. La combinación de estos dos factores provoca la atenuación clásica del sonido.

2.2.6.2 Efectos del viento y los gradientes de temperatura.

La atmósfera no es un medio uniforme para la propagación del sonido. Es todo un sistema asombrosamente dinámico, que muchas veces no permite predicciones meteorológicas acertadas. En condiciones atmosféricas inestables la

temperatura del aire disminuye con la altura, debido al calentamiento de la tierra durante el día, creando un gradiente de la temperatura.

En ausencia de gradientes térmicos, un rayo de sonido se puede propagar rectilíneo. El concepto del rayo de sonido es provechoso en la consideración de la dirección de la propagación. Los rayos del sonido son siempre perpendiculares a los frentes de onda sonoros.

En la Figura 2.15 se puede ver, que en el caso de refracción superior o ascendente, surge una zona de sombra, en la cual las ondas sonoras producidas por la fuente no llegan.

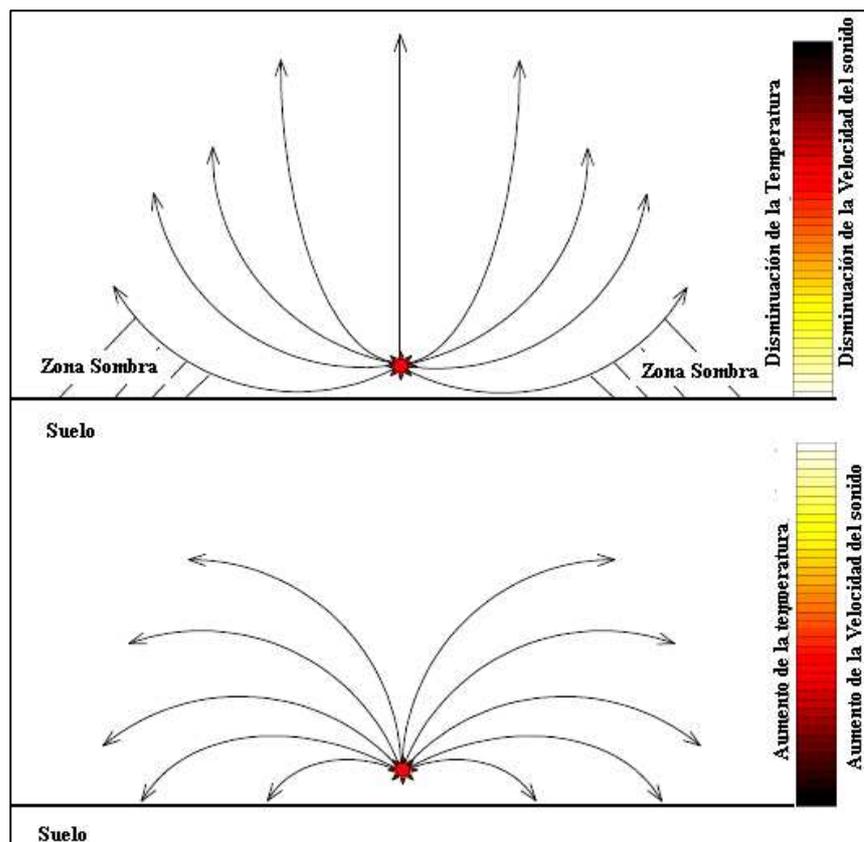


Fig. 2.15 Ilustración comparativa de la refracción del sonido debido a los gradientes de temperatura. (Fuente: F. Alton Everest, 2001)

Típicamente la velocidad del viento se incrementa con la elevación del terreno. El resultado es que cuando el sonido se propaga por encima del viento su dirección se refleja hacia arriba, y cuando se propaga por debajo del viento su dirección se inclina hacia abajo. La cantidad de refracción dependerá de la proporción de cambio de la velocidad del viento con respecto al cambio de altitud. El viento puede ayudar en la propagación sonora, haciéndola más rápida si va en el mismo sentido del viento ó haciéndola más lenta si va en sentido opuesto al viento. Esto se observa en la Figura 2.16.

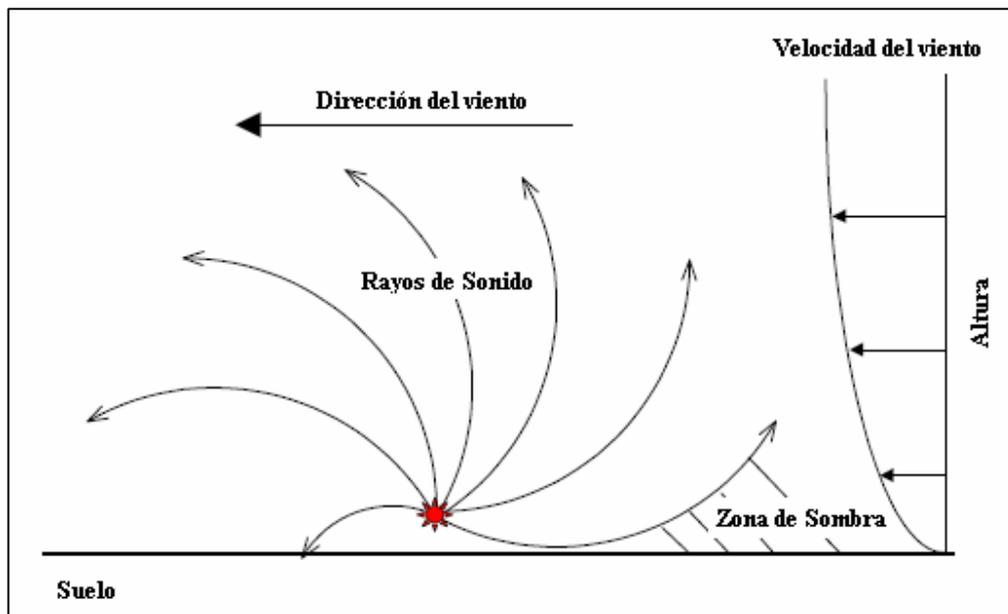


Fig. 2.16 Efectos refractivos del viento en la propagación del sonido.
(Fuente: Environmental Control Noise , 2000)

2.2.6.3 Atenuación de la Vegetación.

Cuando una onda sonora encuentra un obstáculo, parte de la onda es desviada de su curso original. En este caso, cuando una onda plana alcanza un cuerpo que se encuentra en su trayectoria, además de la onda plana inicial, aparece la onda dispersada, que se propaga desde el obstáculo, en todas las direcciones,

distorsionando e interfiriendo con la onda plana incidente. Si el obstáculo es muy grande comparado con la longitud de onda (como sucede normalmente para las ondas de luz y muy raramente para las ondas sonoras) la onda se propaga sin bordear el objeto produciendo detrás de él una zona de sombra acústica. Los valores aproximados de la atenuación del sonido y el ruido por vegetación y follaje denso se encuentran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Atenuación del ruido en una octava de banda debido a la propagación a través de un follaje denso.

Distancia de propagación d_f (metros)	Frecuencia en octava de banda (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$10 \leq d_f \leq 20$	Atenuación, dB 0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$	Atenuación, dB/m 0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12
$d_f \geq 200$	Atenuación, dB 4	6	8	10	12	16	18	24

(Fuente: Norma ISO 9613-2:1996, 2.000)

2.2.6.4 Atenuación del Suelo.

La superficie sobre la cual se propaga el sonido puede ser considerada generalmente como perfectamente rígida ó totalmente reflectiva, con las posibles excepciones de agua en movimiento (ríos, quebradas, cataratas, cascadas), agua en reposo (lagos, lagunas, estanques, embalses, hielo) en los estudios de ruido y sonido exterior. Las superficies de tierra con ó sin vegetación tienden a absorber energía a partir de ondas acústicas incidentes, reduciendo la propagación del sonido. La predicción suficientemente precisa de los efectos del terreno ó suelo en la atenuación sonora requiere de un conocimiento completo de todas las propiedades absorbentes y reflectoras (impedancia acústica) de la superficie del suelo.

El estudio de la propagación y atenuación del sonido, por efecto de una superficie con impedancia finita, de suelo ó terreno se deriva por analogía de la teoría ondulatoria electromagnética. La geometría propuesta para esta situación se ilustra en la Figura. 2.17.

El sonido en el aire se transmite por efecto de refracción en distintas ondas a diversos ángulos hacia la superficie del terreno.

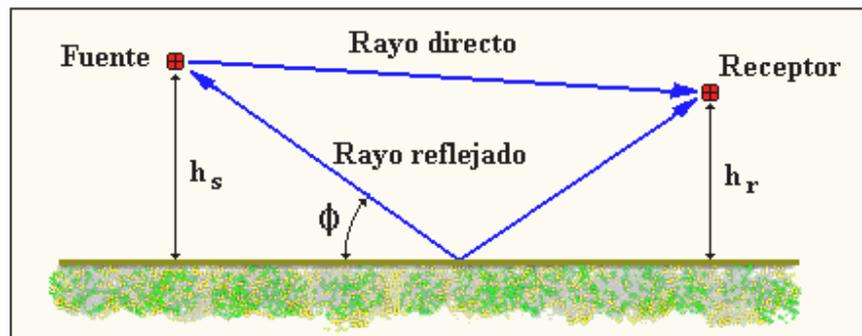


Fig. 2.17 Geometría para el estudio de la reflexión del sonido desde una superficie (suelo) con impedancia acústica finita.
(Fuente: John Lamancusa, 2.000)

La porción reflejada de la onda sonora incidente deja la superficie con el mismo ángulo de incidencia (ángulo que forma la onda sonora incidente con el terreno), con su amplitud y fase modificada por la impedancia de la superficie. La onda sonora reflejada se propaga al receptor, junto con la onda sonora directa proveniente desde la fuente de sonido. Dependiendo de sus amplitudes y fases relativas, ambas ondas pueden generar ó no interferencia.

Usando la teoría de ondas electromagnéticas, la ecuación que gobierna la amplitud p de la presión sonora en el receptor, asumiendo un medio de propagación uniforme (sin refracción), sobre el nivel del terreno es ¹²:

^[12] Embleton, Piercy, Sutherland; “Review of noise propagation in the atmosphere”, JASA 61(6), 1.977, pág. 1403-1418.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{1}{r_d} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r_d} + \frac{R_p}{r_r} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r_r} + (1 - R_p) \cdot \frac{F}{r_r} \cdot e^{-i \cdot k \cdot r_r} \quad (2.22)$$

R_p es el coeficiente de reflexión para la onda sonora plana y se estima como:

$$R_p = \frac{\operatorname{sen}\left(\varphi e - \frac{Z_{\text{aire}}}{Z_{\text{terreno}}}\right)}{\operatorname{sen}\left(\varphi e + \frac{Z_{\text{aire}}}{Z_{\text{terreno}}}\right)} \quad (2.23)$$

Z_{terreno} es la impedancia compleja del suelo, expresada en N-seg/m³ (rayls) y se calcula (de acuerdo con Delany y Bazley^[13]) de la siguiente forma:

$$Z_{\text{terreno}} = \left(1 + 9,08 \cdot \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} \right) + i \cdot \left(11,9 \cdot \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73} \right) \quad [\text{N-seg/m}^3] \quad (2.24)$$

Donde:

p = Presión sonora en el receptor, Pa.

p_0 = Presión sonora a un metro de la fuente en ausencia del efecto causado por el terreno, Pa.

r_d = Longitud en la dirección de la onda sonora directa, metros.

r_r = Longitud en la dirección de la onda sonora reflejada, metros.

f = Frecuencia, Hz.

k = Número de onda ó inverso de longitud de onda en metros⁻¹ = $2 \cdot \pi \cdot f / c$

F = Factor de amplitud de onda superficial sobre terreno (ver nota al pie [5], para el procedimiento de cálculo de este factor).

Z_{aire} = Impedancia característica del aire ($\rho \cdot c$) = 415 N-seg/m³ = 415 rayls.

Z_{terreno} = Impedancia compleja del terreno ó suelo, N-seg/m³.

^[13] Bazley, Delaney; “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”, Applied Acoustics, Vol. 03, 1.970, pág. 105-116.

ϕ = Ángulo de la onda sonora incidente y reflejada, radianes.

σ = Resistividad al flujo superficial de las ondas sonoras = dinas-seg/m³ = cgs rayls.

c = Velocidad del sonido, m/seg.

El primer término a la derecha de la igualdad en la ecuación (2.24), es la onda sonora directa, el segundo término describe la onda sonora reflejada, después de que su amplitud y fase han sido modificadas por el coeficiente de reflexión para la onda sonora plana. El tercer término representa la diferencia entre la reflexión de una onda plana y la reflexión en una onda esférica.

La ecuación (2.24) proporciona un método efectivo para predecir la atenuación por exceso debido a la absorción del suelo, siempre y cuando la impedancia superficial sea conocida en función de la frecuencia. El modelo basado en la resistividad al flujo sólo es válido en superficies con porosidad constante. Algunos valores típicos para distintas superficies son mostrados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Valores de la resistividad al flujo superficial de varios tipos de suelo

Descripción de la superficie	Resistividad al flujo (cgs rayls)
Nieve recién caída (seca)	15-30
Nieve pulverizada	25-50
Pino o abeto (en el bosque)	20-80
Gramma, pasto grueso	150-300
Camino de tierra, con piedras pequeñas de hasta 10cm de diámetro (12-25mm)	300-800
Sedimento arenoso (apisonado)	800-2500
Lajas de piedra libres de limo con espesor delgado (12-25 mm)	1500-4000
Tierra compactada (por la lluvia)	4000-8000
Polvo de cantera, fino, apisonado fuertemente por el paso de vehículos	5000-20000
Asfalto, sellado por el polvo y el uso	> 20000

(Fuente: John Lamancusa, 2.000)

2.3 RUIDO

2.3.1 DEFINICIÓN DE RUIDO.

La definición de ruido puede hacerse desde dos enfoques diferentes, por una parte, la sensación que produce en el ser humano nos lleva a la expresión subjetiva del ruido, y por otra, a una definición objetiva que implica al ruido como fenómeno físico.

Entre las definiciones subjetivas del ruido pueden citarse las siguientes:

- Un sonido no deseado.
- Una combinación de sonidos no coordinados que producen una sensación desagradable.
- Un sonido no deseado por los afectados o capaz de perjudicarles psíquica, física, social y económicamente.
- Todo grupo de sonidos que interfieren con al actividad humana.

En definitiva, el ruido es una apreciación subjetiva del sonido. Un mismo sonido puede ser considerado como molesto o agradable, dependiendo de la sensibilidad o actividad de la persona. Por ejemplo, lo que una persona puede calificar como música para otra puede ser ruido.

En la Figura 2.18 se observan los umbrales de audición y dolor para casi toda la gama de frecuencias audibles.

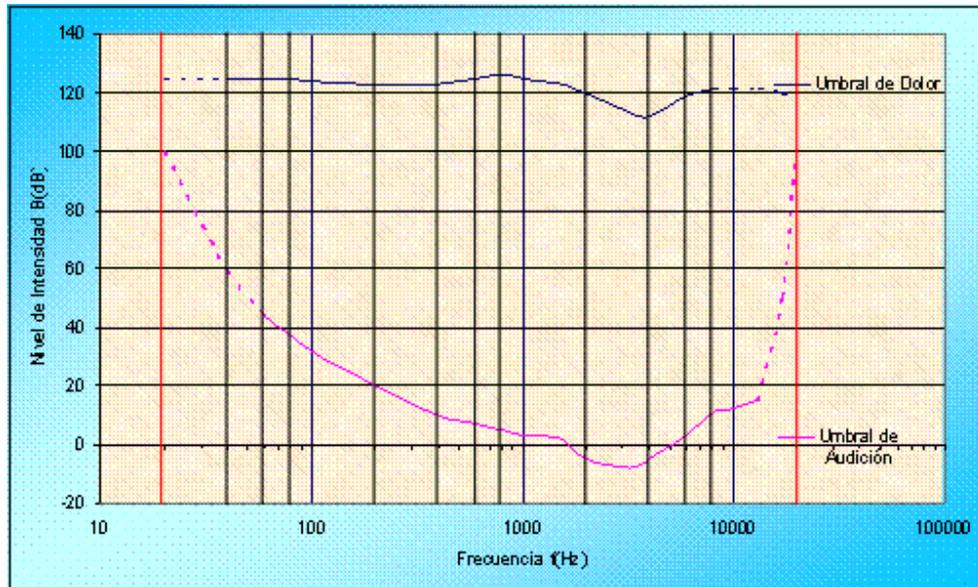


Fig. 2.18 Curvas isofónicas para los umbrales de dolor y de audición
(Fuente: F. Alton Everest, 2001)

En el momento que un ruido no se adapta a la actividad ambiental y supera cierto nivel sonoro, se convierte en una fuente de problemas que van desde la pérdida del bienestar deseado hasta alteraciones graves en la salud (un sonido superior a 30 dB no permite conciliar el sueño). Por lo tanto a pesar de que el concepto de ruido es subjetivo, cuando los valores de presión sonora superan ciertos niveles, la molestia causada afecta a grupos considerables de individuos.

2.3.2 TIPOS DE RUIDO.

Los ruidos se puede clasificar en:

a.- Ruido Continuo o Estacionario.

Un ruido se considera continuo cuando los niveles de presión sonora y el espectro de frecuencia varían en función del tiempo lentamente sobre pequeños márgenes. Este tipo de ruido suele ser originado por máquinas de carga estable, tales

como motores eléctricos, bombas de agua, asimismo suele ser de este tipo el ruido ambiental de fondo.

b.- Ruido Fluctuante.

A este tipo corresponden los ruidos en que tanto los niveles de presión sonora como el espectro de frecuencia varían de forma aleatoria en función con el tiempo sobre un margen más o menos grande. Dependiendo de la repetición del ruido, estos pueden ser periódicos o no. Un ejemplo de ruido fluctuante no periódico es el producido por el tráfico rodado.

c.- Ruido de Impacto.

El ruido de impacto se trata de un incremento brusco y de corta duración del nivel de presión sonora. Ejemplo de este tipo de ruido es el disparo de una pistola, el golpe de un martillo, etc.

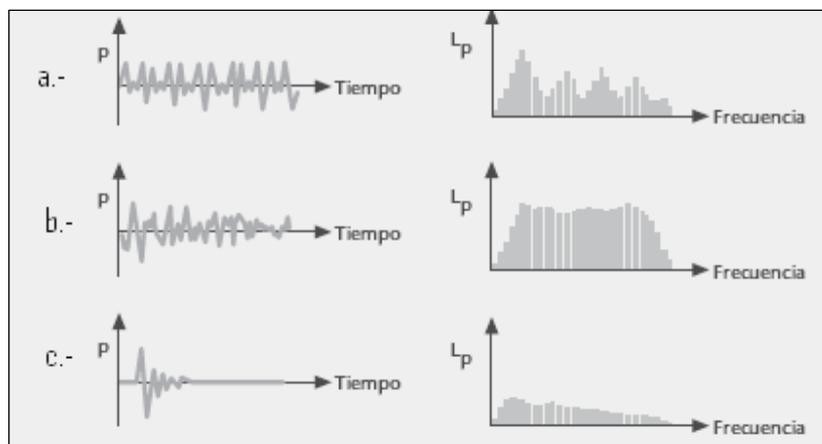


Fig. 2.19 Representación gráfica de los niveles sonoros de un ruido estacionario (a), fluctuante (b) e impulsivo o de impacto (c).

(Fuente: Manual de aislamiento acústico Composa, 2005)

Otra calificación, según la composición del espectro de frecuencia, se divide en **ruido blanco** y **ruido rosa**. El ruido blanco (Figura 2.20a) tiene un espectro constante con la frecuencia (su nombre proviene de la analogía con la luz blanca, que

contiene todos los colores con igual intensidad). En el ruido rosa (Figura 2.20b) hay mayor contenido de bajas frecuencias (el nombre se inspira en la luz rosa, que contiene todos los colores, pero el rojo con mayor intensidad).

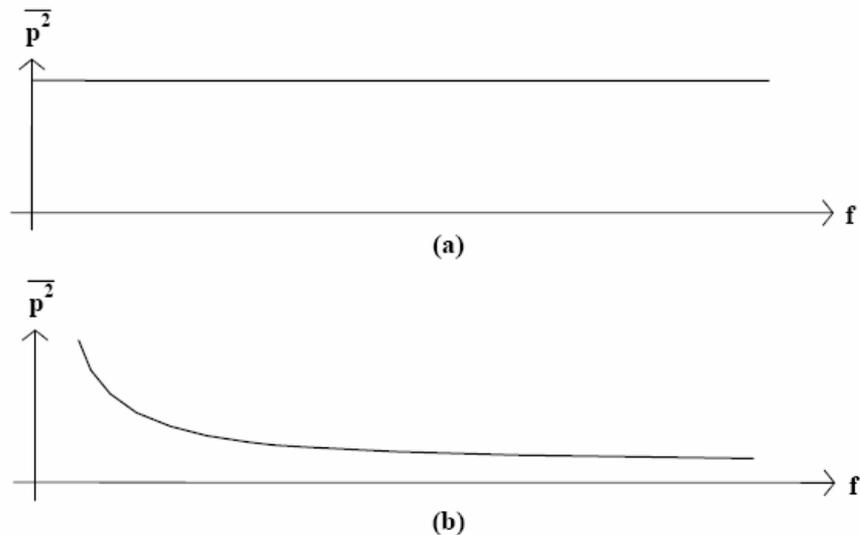


Fig. 2.20 Representación gráfica de los espectros de frecuencia de un ruido blanco (a), ruido rosa (b).
(Fuente: Manual de aislamiento acústico Composa, 2005)

2.3.3 PRINCIPALES FUENTES DEL RUIDO EN AMBIENTES AL AIRE LIBRE.

Según estudios realizados por algunos países, la energía sonora total emitida a la atmósfera, tiene su fuente de origen como se muestra en la Figura 2.21. En primer lugar se encuentra el tráfico rodado conformado por los vehículos ligeros (de pasajeros), camionetas, camiones, etc.

En segundo lugar, está el ruido generado por las actividades industriales, el cual no tiene un impacto relevante en zonas residenciales, las cuales frecuentemente están separadas por una distancia considerable de las industrias. El tercer grupo lo

conforman los ferrocarriles, sector de amplio crecimiento en los últimos años. La fracción con menor incidencia esta constituido por las demás actividades humanas.

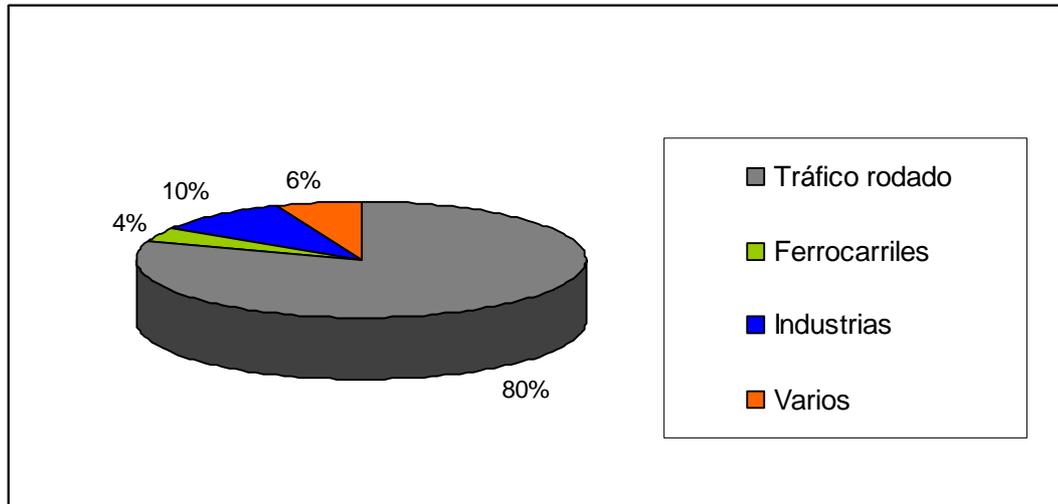


Fig. 2.21 Fuentes del ruido emitido a la atmósfera en áreas urbanas.
(Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2002)

2.3.4 EFECTOS DEL RUIDO EN EL HOMBRE.

La Organización Mundial de la Salud ha hecho a lo largo de su historia, numerosas investigaciones que tienen por objeto conocer los efectos del ruido (ya sea temporal o permanente) sobre los seres humanos, en función del tiempo de exposición y/o del nivel sonoro. Estos efectos pueden ser visibles en el trabajo, descanso, sueño, audición y comunicación, debido al impacto producido en las reacciones psicológicas y fisiológicas del ser humano. En la literatura sobre el tema, es común dividir los efectos del ruido en auditivos y no auditivos, los primeros tienen que ver con los daños que se dan en el órgano auditivo o en el uso de éste; con respecto a los efectos no auditivos, las repercusiones son en otros órganos del cuerpo.

2.3.4.1. Efectos Auditivos.

a. Dolor en el oído.

Cuando la presión acústica en el oído es elevada, se producen sensaciones de incomodidad. Esto suele suceder para niveles comprendidos entre los 80 dB y 100 dB. Cuando los niveles de presión sonora (NPS) son aún superiores, la incomodidad se transforma en dolor.

b. Pérdida de la audición.

La pérdida auditiva es el efecto del ruido que ha sido más investigado. La exposición a ruidos que contienen gran cantidad de energía acústica (en relación a las dosis tolerables) puede ocasionar desplazamientos de los umbrales de audición. Estos desplazamientos son ascendentes, es decir, que luego de que éstos se produzcan, los sonidos requerirán de mayores niveles de presión sonora (NPS) para ser escuchados. El mecanismo por el cual se producen estos desplazamientos es el siguiente:

Durante una exposición sonora, los vasos sanguíneos del oído se contraen. Esta contracción reduce el paso de la sangre y por lo tanto llega menos oxígeno a las células ciliadas de la cóclea (el movimiento de estas células produce impulsos eléctricos que son recibidos por el cerebro). Esta situación provoca un decrecimiento en el proceso metabólico y las células ciliadas se fatigan. La fatiga implica que se requieran mayores niveles de estímulos externos para lograr una reacción. Y eso significa elevar los umbrales.

c. Enmascaramiento.

Se habla de *enmascaramiento* (“masking”) cuando la presencia de un ruido oculta a otro sonido. El ruido *enmascarador* es aquel que impide o reduce la escucha del sonido *enmascarado*. El concepto de enmascaramiento está asociado a la idea del ruido que dificulta o imposibilita la audición de un mensaje que desea escucharse, por

dicho motivo al enmascarante se lo suele tratar de ruido (porque es un sonido no deseado), mientras que al enmascarado nos referimos como sonido. Por ejemplo, una comunicación oral (sonido) se puede ver enmascarada por el paso de un ruido de un avión). También pueden verse enmascarados sonidos que desean escucharse (aun sin contener un mensaje), por ejemplo, el canto de las aves podría ser enmascarado por el motor de un tractor.

d. Inteligibilidad de la palabra.

Si bien cualquier incremento permanente del umbral de audición constituye algún deterioro de la capacidad auditiva, se considera que produce incapacidad, sólo cuando dicho deterioro es suficiente para afectar la comunicación oral. La definición se basa en el hecho de que la inteligibilidad de la palabra es la situación que ofrece mayores exigencias al aparato auditivo. Por ejemplo, es posible que una persona comprenda y disfrute muy bien la música, y en cambio tenga serias dificultades para entender la palabra.

e. Respuesta Reflejo.

La respuesta reflejo consiste de una contracción involuntaria de los músculos de las extremidades y columna como consecuencia de un sonido abrupto e inesperado. Este reflejo prepara al individuo para tomar acción frente a una posible situación de peligro, la cual podría estar siendo alertada por el ruido. La respuesta reflejo también está acompañada de parpadeo o cierre momentáneo de los ojos, lo que cumple la función de protegerlos frente a un posible impacto frontal. Es frecuente que la respuesta reflejo esté seguida por un movimiento de la cabeza en dirección hacia la fuente del ruido, en búsqueda de su identificación.

2.3.4.2 Efectos No Auditivos.

a. Efectos sobre la voz.

El ruido intenso tiene un efecto indirecto sobre la voz, que consiste en que si una persona está hablando, ante un aumento del nivel sonoro ambiental tenderá a “subir” la voz. Subir la voz implica una doble acción: aumentar la potencia sonora emitida y aumentar la frecuencia.

b. Efectos en la Vista.

La exposición sonora de ciertas características provoca la dilatación de las pupilas. Esta dilatación está acompañada de una vasoconstricción sanguínea periférica. El ruido también puede provocar un estrechamiento del campo visual y una disminución de la percepción del color¹⁴.

c. Fatiga Corporal.

La sensación de fatiga puede ser experimentada como causa directa del ruido o bien inducida indirectamente. Existen varios reportes que indican que la fatiga puede ser una consecuencia directa de la exposición al ruido, en especial a aquellos ruidos que contienen longitudes de onda grandes, e incluso infrasonidos. Los trabajadores expuestos cotidianamente a este tipo de ruidos pueden experimentar fatiga crónica. Por otra parte, el deterioro del sueño a causa de eventos sonoros puede ser responsable de la fatiga física como efecto posterior al descanso.

d. Resonancias en el Organismo.

Desde el punto de vista físico, el cuerpo humano puede ser analizado como un sistema mecánico complejo. Las diversas estructuras internas del cuerpo responden

¹⁴ RECUERO M., “Contaminación Acústica”, 2002, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

de diferentes maneras frente a los estímulos sonoros. La cantidad de energía acústica que ingresa al organismo depende, de los cambios de impedancia que la perturbación acústica experimenta al atravesar los medios de propagación que encuentra en su camino.

d. Efectos psicológicos.

Los efectos potenciales del ruido en la salud mental son posiblemente los que menos se han estudiado, pues la mayor parte de la investigación en esta área ha sido basada en datos subjetivos. Dos estudios extensos en Gran Bretaña determinaron que la relación entre el ruido y los posibles efectos psicológicos es compleja, dependiendo también de la molestia, sensibilidad del individuo, de variables sociales y demográficas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) publica en 1999, una investigación que concluye que la exposición a los altos niveles del ruido ocupacional está asociada al desarrollo de la neurosis, pero de los resultados con respecto al ruido ambiental y los efectos de salud mentales son poco concluyentes. Precisan la necesidad de tomar a “grupos vulnerables” en consideración, pues estos individuos pudieran no hacer frente a ruido ambiental indeseado. Los “grupos vulnerables” incluyen a niños, a los ancianos, y a gente con las enfermedades preexistentes.

CAPÍTULO III

FUENTES DE RUIDO EN EL TRÁFICO DE AUTOPISTAS

3.1 GENERALIDADES

El ruido del tráfico resulta de la contribución colectiva del ruido producido por vehículos de motor individual por lo que varía enormemente dependiendo de su tipo y el modo de la operación. Los automóviles forman el grupo más grande de vehículos y la mayor parte de este grupo se accionan mediante motores diesel o gasolina.

Se suelen distinguir tres tipos de fuentes de ruido en el tráfico de carreteras:

- a. *Ruido originado por la propulsión del propio vehículo*: En esta fuente, intervienen elementos vibrantes, excepto los neumáticos. Entre estos elementos se pueden mencionar: el motor, la transmisión, los sistemas de admisión, los frenos, el escape y la suspensión.
- b. *Ruido de rodadura*: Este se produce por las interacciones entre los neumáticos y la superficie del pavimento siendo compleja esta caracterización del ruido, como se verá más adelante.
- c. *Ruido aerodinámico*: Este ruido, también llamado de turbulencia, se produce por la interacción entre la carrocería del vehículo y el aire, dependiendo de su forma y su velocidad. Se realizan ensayos y mediciones en túneles de viento, a motor parado, con el objeto de estudiar individualmente esta fuente de ruido. Esta clase de emisión de ruido generalmente, no es un factor importante para el ruido exterior del vehículo a velocidades bajas y moderadas, por debajo de 130 Km/h.

La importancia relativa de estas fuentes, depende del tipo de vehículo y de las condiciones de funcionamiento. A bajas velocidades en el camino, la unidad de potencia es la fuente principal, mientras que a altas velocidades en el camino, el ruido de rodadura que surge en gran parte de la interacción neumático/vía, predomina.

Como norma general se puede indicar que, en el caso de vehículos ligeros circulando hasta 50 ó 60 Km/h, la influencia en la generación de ruido es preponderantemente de tipo mecánico; a velocidades más altas, es de rodadura. Este límite es de 70 u 80 Km/h para los vehículos pesados. En la tabla siguiente, se muestran datos de contribución al ruido con un pavimento de mezcla bituminosa convencional (combinación de un material hidrocarbonado, arena - incluido el polvo mineral - y aditivos, de manera que todas las partículas de grano queden recubiertas de una película de ligante).

Tabla 3.1 Contribución de fuentes de ruido en función de la velocidad.

Fuente de ruido	V = 50 Km/h		V = 80 Km/h	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
Motor	20 – 50%	10 – 80%	15 – 35%	50 – 70%
Transmisión	5 – 35%			
Tubo de Escape	10 – 35%			
Ventilador/Radiador	0 – 30%			
Admisión/Escape	10 – 35%	0 – 10%		
Rodadura	10 – 15%	10 – 15%	65 - 85%	30 – 50%

(Fuente: Jorge Muñoz Sanz . “Evaluación del ruido de rodadura en carreteras”, 2006)

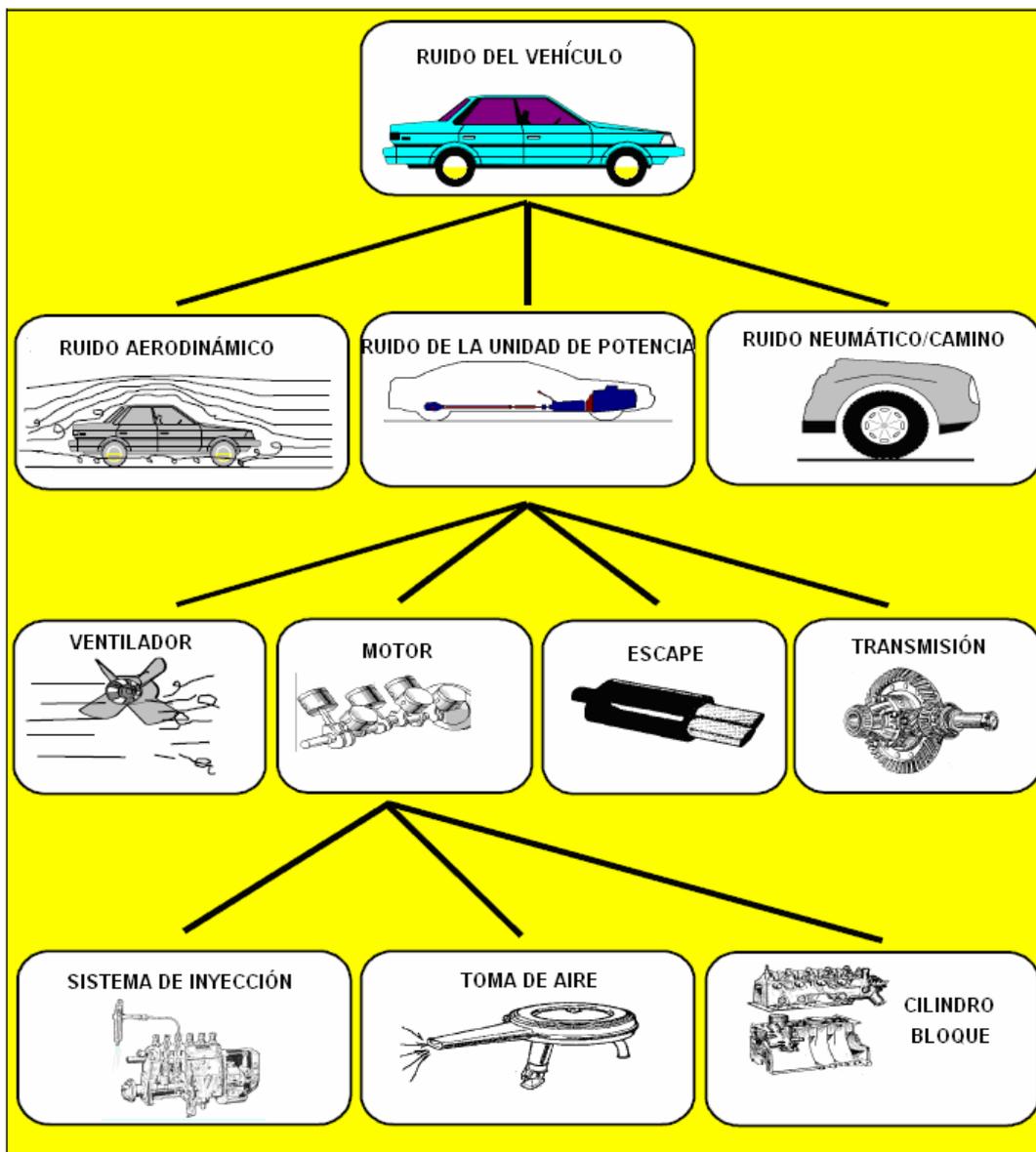


Fig. 3.1 Las fuentes de ruido más importantes de un vehículo terrestre
(Fuente: S. Robertson, "The effect of speed on noise, vibration and emissions from vehicles", 1998)

3.2 MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO DE RODADURA.

Los mecanismos más importantes de generación de ruido de rodadura se muestran en la Tabla 3.2. Además, también se muestran algunos fenómenos que no pueden ser considerados como mecanismos de generación pura, pero ellos influyen en la emisión de ruido de una manera significativa.

Como se puede ver en la Tabla 3.2 los mecanismos pueden ser divididos en dos grupos principales:

- Los mecanismos relacionados con vibraciones del neumático. Estos mecanismos ocurren en su mayoría por debajo de la frecuencia de 1000 Hz.
- Los mecanismos relacionados con fenómenos aerodinámicos. Estos mecanismos ocurren en su mayoría por encima de la frecuencia de 1000 Hz.

No es sencillo señalar cuál mecanismo es el más importante, ya que sus contribuciones relativas pueden variar para diferentes tipos de neumáticos, caminos y condiciones de funcionamiento.

En el Anexo A.0 se observan los siguientes mecanismos actuando simultáneamente en diferentes instantes del giro del neumático.

Tabla 3.2 Mecanismos de generación de ruido neumático/vía y fenómenos relacionados

Mecanismos de Generación	<i>Vibratorios</i>	Mecanismos de Impacto (radial)	Impacto de Banda de Rodadura
			Impacto de Textura
		Mecanismos de Adhesión (tangencial)	Pisar - Resbalar
			Pegar - Despegar
	<i>Aerodinámicos</i>	Mecanismos de Desplazamiento del Aire	Turbulencia del Aire
			Bombeo del Aire
			Resonancias de Tubo
			Resonancias Helmholtz
Mecanismos de Amplificación o Reducción	Efecto Bocina		
	Resonancias del Neumático	Resonancia Cinturón/Carcasa	
		Resonancia Toroidal de la Cavidad	
	Efecto de Impedancia Mecánica	Reacción de la superficie de camino a los bloques del neumático sobre la rugosidad neumático/vía	
	Efecto de Impedancia Acústica	Superficies porosas que afectan la fuerza de la fuente	
		Superficies porosas que afectan la propagación del sonido a un receptor alejado	

(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances", 2004).

3.2.1 MECANISMOS VIBRATORIOS.

Los mecanismos vibratorios (propagación estructural), comprenden los impactos y la adhesividad neumático/pavimento. Las vibraciones se deben al choque de los bloques del relieve del neumático contra el pavimento. Éstas son vibraciones locales, tanto normales como tangenciales con respecto al eje de giro del neumático.

3.2.1.1 Impacto En La Banda De Rodadura Del Neumático (300-1500 Hz).

La existencia de un relieve de Banda de Rodadura¹⁵ con sus elementos separados en la dirección rodante, causa una interrupción del desplazamiento radial en los bordes de la zona de contacto. Se podría decir que los elementos de la banda de rodadura impactan contra la superficie del camino, pero como la superficie del camino es no-compresible, los elementos de la banda de rodadura tendrán que absorber la deflexión resultante y no el camino.

3.2.1.2 Impacto En La Textura (800-1250 Hz).

Este mecanismo es básicamente similar al mecanismo de impacto en la banda de rodadura del neumático, con la diferencia de que la textura de superficie impacta contra el neumático en lugar del bloque de relieve contra el camino. Es conveniente describir la textura de la superficie del camino (las irregularidades), en términos de dimensiones típicas de longitud de onda. Las definiciones siguientes se muestran esquemáticamente en la Figura 3.2.

¹⁵ Es la parte del neumático que permite la adherencia al suelo. Su diseño debe proporcionar capacidad de frenado y tracción. Su compuesto de caucho debe resistir la abrasión y el desgaste.

a.-Micro-textura.

Éste es responsable del componente de la adhesión de fricción entre el neumático y la superficie del camino, por lo que es importante asegurar una buena resistencia entre el neumático y la superficie del camino a bajas velocidades, en condiciones de camino seco.

b.-Macro-textura.

La macro-textura es importante porque ayuda a dispersar el agua de la superficie, proporcionando canales de drenaje en la misma, por lo tanto, ayudan a prevenir que ocurra un patinaje en condiciones de clima lluvioso.

c.-Mega-textura.

Las amplitudes en la región de mega-textura se asocian con efectos desfavorables, especialmente para la fricción del neumático/camino y en la generación del ruido.

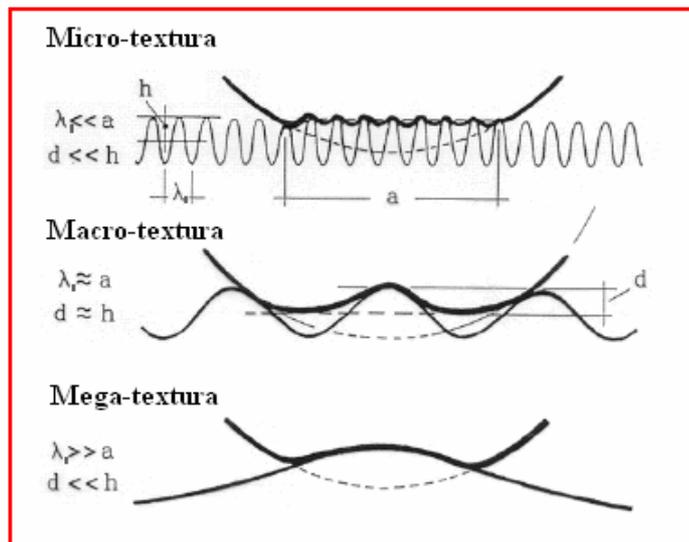


Fig. 3.2 Descripción de parámetros medidos de textura superficiales (Fuente: Malcolm Hunt Associates, “Noise Impact of Land Transport”, 2000)

3.2.1.3 Pisar / Resbalar (Fricción).

Dentro de la zona de contacto¹⁶, los bloques de la banda de rodadura transfieren fuerzas de tracción del neumático al pavimento y debido a la deformación de la carcasa del neumático en la zona de contacto, la interfase “bloque de banda de rodadura / pavimento” experimenta fuerzas tangenciales significativas. Si estas fuerzas horizontales exceden los límites de la fricción, el bloque de banda de rodadura resbalará brevemente y luego se obstruye al pavimento como se ilustra en la Figura 3.3. Esta acción de resbalar y atascar puede suceder rápidamente y generar tanto ruido como vibración.

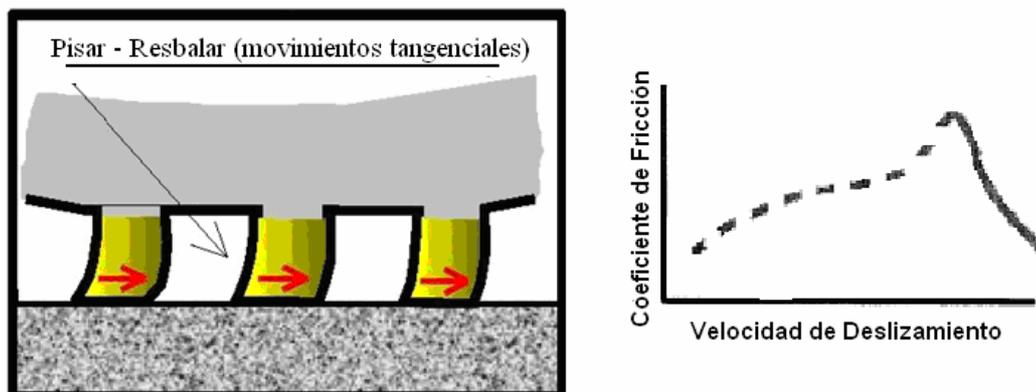


Fig. 3.3 *Izquierda:* Cuando la deformación del bloque de la banda de rodadura es muy larga, los bloques se deslizan hacia atrás. *Derecha:* Coeficiente de fricción vs Velocidad de deslizamiento. (Fuente: Ron Blom, “**Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances**”, 2004)

3.2.1.5 Pisar / Adherir (Por Encima De 2 Khz).

Este fenómeno ocurre cuando un neumático llega a ser "adhesivo" en una superficie considerablemente lisa, es decir, sin un gran número de granos o defectos visibles a simple vista, donde el apoyo de los bloques de relieve en la superficie del

¹⁶ Es el área del neumático que está en contacto con la superficie de la carretera en un momento dado.

camino y ciertas fuerzas son necesarias para romper la adhesión. En este caso antes de que el caucho se libere de la superficie, este será estirado un poco y finalmente cuando sea liberado, habrá cierta vibración en el caucho para luego volver a su posición original.

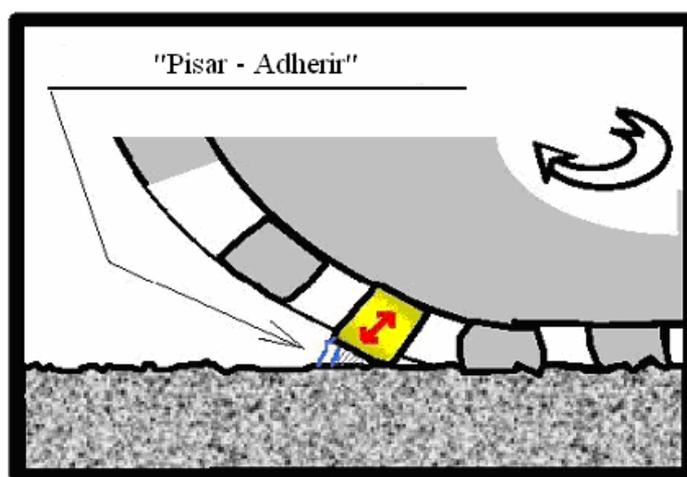


Fig. 3.4 Adhesión entre el bloque de la banda de rodadura y el pavimento a la salida de la zona contacto.

(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances", 2004)

3.2.2 MECANISMOS AERODINÁMICOS EN EL NEUMÁTICO.

Los mecanismos aerodinámicos de generación de ruido de rodadura, corresponden a la movilización o bombeo del aire debido a las compresiones y dilataciones del aire atrapado en las cavidades, limitadas por la banda de rodadura del neumático y la superficie del pavimento. Estos mecanismos originan la amplificación y la reducción del ruido de rodadura que comprenden el efecto de bocina, el efecto de la impedancia acústica (comunicación entre cavidades de bolsas y tubos) y la resonancia toroidal (correspondiente a la cavidad del aire de inflado que interacciona con la vibración del encintado del neumático).

3.2.2.1 Turbulencia Del Aire (300 Hz).

El aire alrededor del neumático es puesto en movimiento por la rotación del mismo y el ruido que es generado por este mecanismo constituye una contribución significativa al ruido del neumático/vía a velocidades mucho más altas que a velocidades normales en autopista.¹⁷

3.2.2.2 Bombeo Del Aire (> 1000 Hz).

Cuando un neumático envuelve un volumen de aire, éste es encerrado en la zona de contacto dentro de las cavidades y poros, constituidos por las ranuras del relieve de banda de rodadura y la textura de superficie. El aire es comprimido y expandido hacia afuera al frente de la zona de contacto y succionado en las cavidades en la parte trasera; incluso dentro de la zona de contacto serán significativos los desplazamientos de aire.

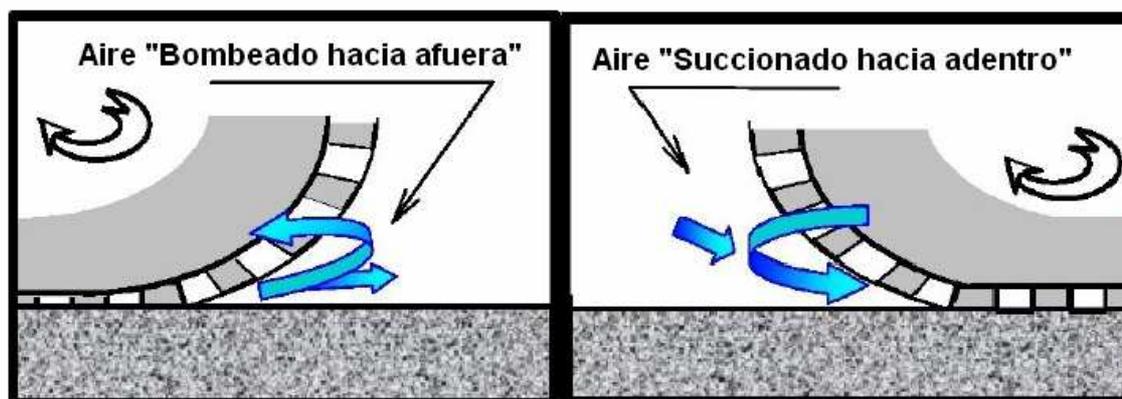


Fig. 3.5 Bombeo de Aire en la entrada y salida de la zona de contacto.
(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonantes", 2004)

¹⁷ Hayden, R.E.; (1971) *Roadside noise from the interaction of a rolling tyre with the road surface*, Proc. Of the Purdue Noise Control conference, Purdue University, Indiana, USA

El Bombeo de aire parece ser una fuente importante del sonido por encima de 1000 Hz, especialmente en superficies de altas densidades. En superficies porosas el bombeo de aire es menos importante, ya que el aire puede escapar de las cavidades con mayor facilidad.

3.2.2.3 Resonancia Tubular (900-2000 Hz).

En la zona de contacto se desarrolla una formación tubular entre el relieve de la banda de rodadura del neumático y la superficie del camino. Estos tubos pueden tener ambos terminales abiertos o tener un sólo terminal abierto.

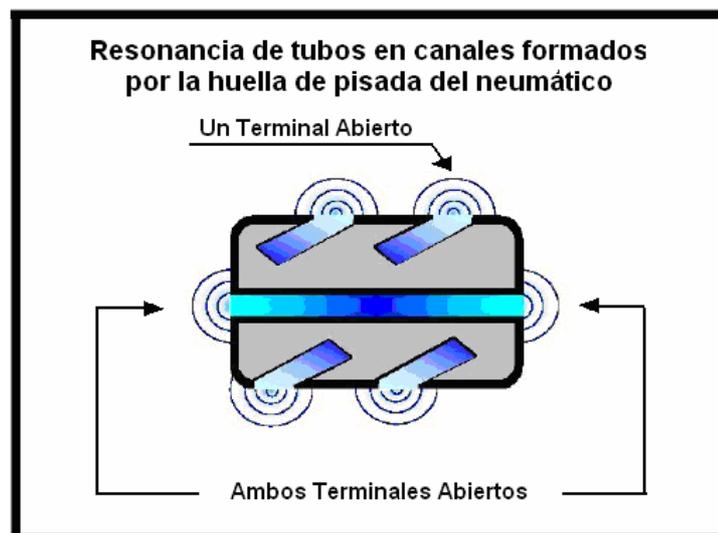


Fig. 3.6 Amplificación del sonido causado por una formación tubular
(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances", 2004)

3.2.2.4 RESONANCIAS DE HELMHOLTZ (1 -2.5 Khz).

El resonador de Helmholtz consiste en una cavidad rígida de volúmen V que comunica al exterior a través de un cuello de longitud L y sección S . Si se cumple que la longitud de onda (λ) es superior a L ($\lambda \gg L$) el fluido del cuello se moverá como una unidad, constituyendo el elemento de *masa*. Si $\lambda \gg V^{1/3}$, la presión acústica dentro de la cavidad proporcionará el elemento de *rigidez*. Si $\lambda \gg S^{1/2}$, la apertura radiará sonido como una fuente simple y por lo tanto será el elemento de *resistencia*. En el cuello se dan pérdidas de tipo viscoso, pero para cuellos de diámetro mayor a 1cm, estas pérdidas son, en general, menores que las asociadas con la radiación y pueden ignorarse.

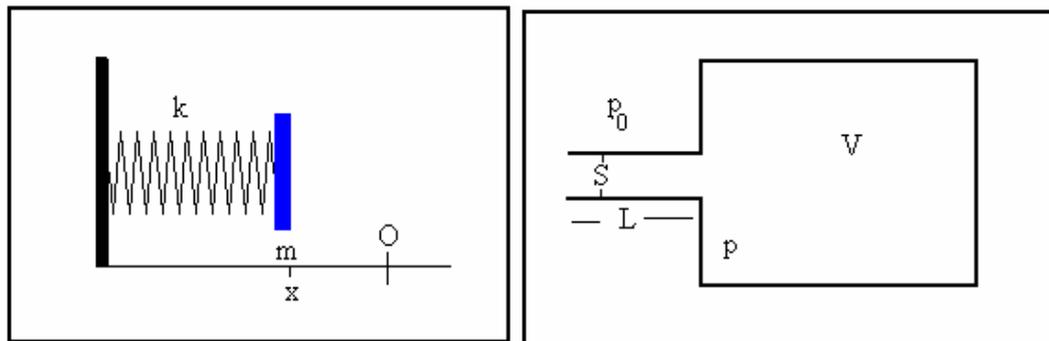


Fig. 3.7 Izquierda: Esquema Masa – Resorte / Derecha: Esquema del resonador ideal
(Fuente: Arturo Busso “El Resonador de Helmholtz”, 2003)

Aplicado a la generación del ruido en el neumático, el volumen de la cavidad del contacto de salida con la superficie del camino, actúa como un resorte y el aire presente entre la banda de rodadura y el camino, actúa como una masa. (Ver la figura 3.8).



Fig. 3.8 Amplificación de Sonido causado por resonador de Helmholtz.
(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonantes", 2004)

Cuando el volumen de la cavidad se mueve fuera de la zona de contacto, un sistema masa-resorte es creado en el momento en que la cavidad entra en contacto con el aire detrás del neumático. Luego, a lo largo del movimiento de la cavidad, alejándose del borde de arrastre, aumentará el volumen y la masa del aire inmediatamente fuera de la cavidad. Así, la masa y las constantes del resorte y amortiguamiento, determinan la frecuencia de la resonancia y esta frecuencia cambia durante el movimiento de la cavidad; al mismo tiempo, las amplitudes de resonancia decrecen.

3.2.3 MECANISMOS DE AMPLIFICACIÓN / REDUCCIÓN.

Otros de los mecanismos de generación, aparte de los estudiados en la sección 3.2.1 y 3.2.2, son los que tienen una influencia importante en el ruido de neumático / vía. Estos mecanismos no pueden ser considerados como mecanismos de generación.

3.2.3.1 Efecto Bocina.

Este efecto no es un mecanismo de generación de ruido, sino un mecanismo donde los niveles sonoros son amplificados. En los límites delanteros y traseros del neumático, el ángulo entre éste y la superficie de la vía, actúa como una pequeña bocina que aumenta la eficiencia de la radiación del neumático en vibración.. Esta geometría proporciona una mejor alianza entre la impedancia en la estructura, formada por el borde trasero y la superficie de la vía (donde una mayor parte del ruido es generada) y la impedancia acústica ambiental. (Ver la Figura 3.9). Los pavimentos absorbentes (porosos) puede reducir la eficiencia del efecto de bocina

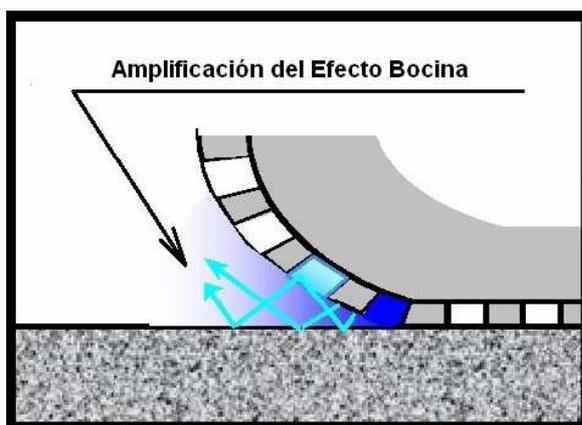


Fig. 3.9 Efecto Bocina creado por el neumático y el pavimento
(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances", 2004)

3.2.3.2 Resonancias Cinturón/Carcasa (600-1300 Hz).

La deformación de la banda de rodadura del neumático, cerca de la zona de contacto, lleva a discontinuidades de esfuerzos radiales y tangenciales que inducen vibraciones en la carcasa y el cinturón. Cuando el neumático interactúa con la macro-textura del camino, las vibraciones de la banda de rodadura son transportadas a la pared lateral del neumático actuando como una caja de resonancia irradiando el

sonido. La superficie de la banda de rodadura y la forma de la pared lateral del neumático, juegan un papel importante en la generación del ruido del neumático/vía. Para el neumático de camión, con travesaño de gran tamaño, la vibración de la pared lateral del mismo, es la mayor fuente de ruido¹⁸.

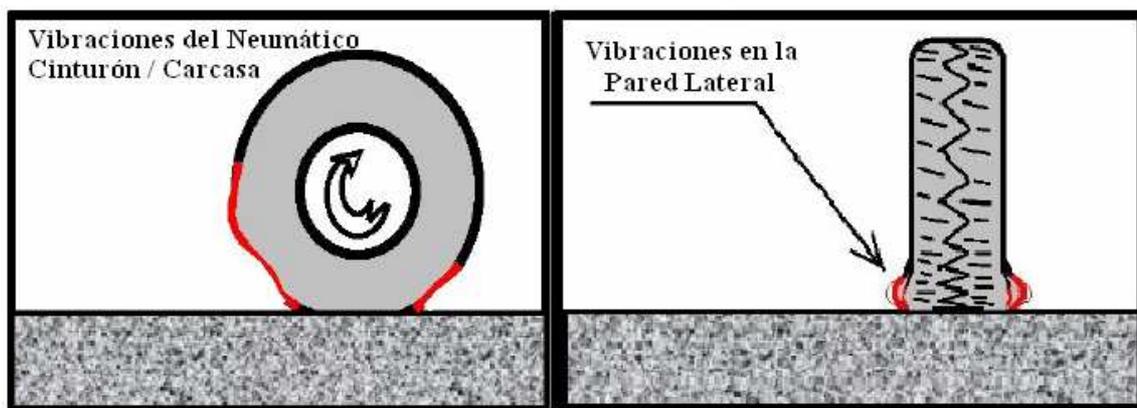


Fig. 3.10 Vibraciones de la Carcasa / Cinturón del Neumático alrededor de la banda de rodadura y en la pared lateral de la zona de contacto.

(Fuente: Ron Blom, "Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances", 2004)

Las vibraciones de la envoltura del neumático, son una combinación de diferentes tipos de onda que aparecen en frecuencias diferentes. En un rango de baja frecuencia, donde el neumático se comporta como una viga elástica, el modelo de anillo circular puede ser utilizado para analizar las relaciones de dispersión. Para vehículos de pasajeros¹⁹, se encontró que las vibraciones de la carcasa son iguales o menores a 10 dB en comparación con las vibraciones en el centro de la banda de rodadura.

¹⁸ Watanabe, T., *et al.*, "The noise generation mechanism of crossbar tyres and countermeasures against it", I.J.V.D., Vol.9, No.6, 1988

¹⁹ Doan, V.Q., *et al.*, "Investigation into the Influence of Tire Construction on Coast-by Noise", Tire Science and Technology, Vol. 23, April – June 1995;

3.2.3.3 Resonancia Toroidal De La Cavity (230-280 Hz).

La columna de aire en la cavidad del neumático, puede resonar a una cierta frecuencia. La frecuencia de resonancia de la cavidad, es definida sólo por el neumático, tamaño del rin²⁰ y la velocidad del sonido en el medio en que se expande el neumático.

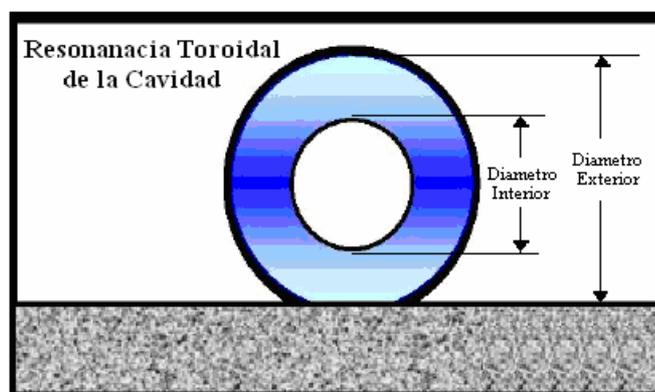


Fig. 3.11 Resonancia Toroidal de la Cavity

(Fuente: Ron Blom, “**Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances**”, 2004)

3.2.3.4 Tipos de Vías Reductoras de Ruido

En la actualidad, la severidad del ruido del tráfico requiere, a gran escala, la introducción de tecnologías para disminuir el ruido. Con respecto a las tecnologías disponibles por las autoridades de vialidad, la aplicación de superficies de camino reductoras de ruido, no es la única solución rentable, pero es una de las que puede ser implementada a corto plazo. Tales ventajas han llevado al desarrollo y la aplicación de varios tipos de superficies reductoras de ruido²¹.

²⁰ Pieza metálica central de una rueda, sobre la que se monta el neumático.

²¹ Van Keulen, W., “**Silent Roads for Noise Reduction**”, IRF Congreso for South-East Europe, Belgrade, 2002;

Las superficies de vías silenciosas, tal como asfalto poroso y superficies delgadas, son consideradas para estar entre los medios más efectivos que reducen el ruido del tráfico y están sujetos a estudios continuos y de optimización, gracias a que en el pasado se obtuvieron buenos resultados con mejoras significativas en la reducción total del ruido del tráfico.

La atención se centra, en los pavimentos fonoabsorbentes, capaces de reducir el nivel de ruido de rodadura al menos en 3 dB con respecto a los convencionales. Se aplicarían, en principio, en vías cercanas a zonas pobladas.

Se consideraran por tanto:

- Mezclas drenantes o porosas (P.A).
- Mezclas SMA.
- Micro-aglomerados.

a.- Mezclas Drenantes o Porosas (P.A).

Las mezclas permeables o porosas P.A (*porous asphalt*) consisten en un esqueleto mineral de granulometría discontinua y un ligante que, en aplicaciones de reducción de ruido, suele ser un betún modificado, con una matriz de huecos interconectados, a través de la cual puede fluir el agua y el aire.

Para una buena absorción, es muy importante la accesibilidad y distribución de los “tamaños” de los huecos, que son la cámara de expansión del aire atrapado, entre el neumático y el pavimento. Una mezcla P.A para velocidades altas puede reducir el nivel de ruido en 4 dBA. Estas mezclas pueden utilizarse, en capa única o en doble capa, siendo esta última la más adecuada para la reducción del ruido.



Fig. 3.12 A) Esqueleto de piedras de un asfalto poroso de una capa, B) Esqueleto de piedras de un asfalto poroso de doble capa,
(Fuente: K.Iwao, I. Yamazaki, “A study on the mechanism of tire/road noise”, 1996).

Aún en el caso del tráfico a velocidades bajas, las absorciones acústicas de los pavimentos drenantes doble capa, son superiores a las monocapa.

b.- Mezclas Bituminosas (S.M.A).

Las mezclas bituminosas S.M.A (*asfalto mastico de piedra*) se desarrollaron en Alemania en los años 60, con el nombre de *split mastic asphalt*; una granulometría discontinua para mezclas en caliente de capas de rodadura. Éstas consisten, en granos áridos gruesos de igual tamaño, rodeado de un mortero o compuesto mástico de finos granos arenosos, betún y a menudo fibras de celulosa (0,3%) para evitar el escurrimiento de la mezcla.

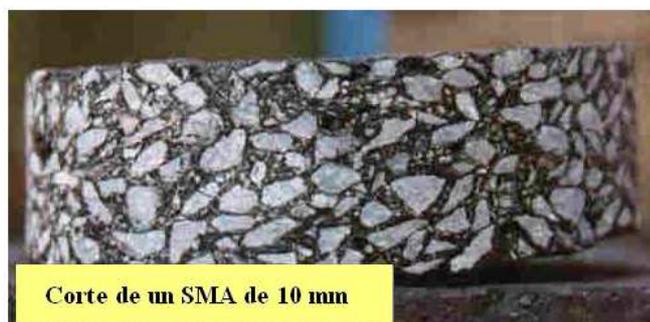


Fig. 3.13 Corte de un SMA de 10 mm
(Fuente: C.J. Summer, “Stone Mastic Asphalt (SMA), a study in Picture”, 2000)

El contacto entre las partículas de grano grueso, favorece la durabilidad y la resistencia a la deformación. La reducción del nivel de ruido es de 2 dBA, a 50 Km/h, se explica porque se obtiene de una textura óptima en la superficie de la carretera. Los mejores resultados se obtienen cuando el tamaño máximo granular es de 6 mm. Este tipo de mezclas son resistentes a las deformaciones permanentes y suelen ofrecer una alta resistencia al deslizamiento.

c.- Micro-Aglomerados.

Los micro-aglomerados se desarrollaron en Francia, a comienzos de los años 80, con el fin de aumentar la resistencia al deslizamiento, rehabilitar la superficie de los suelos envejecidos en vías urbanas. Los más empleados son el micro-aglomerado discontinuo; la discontinuidad se compensa estructuralmente con un mástico²² (entre el 5,5 y el 6,5%) y éste suele ser un betún modificado que cohesiona la mezcla y evita los riesgos de exudación extendiéndose en capas de entre 1,5 y 3,5 cm de espesor.

El empleo de betunes modificados con la adición de caucho, tiene una gran ventaja porque se aprovecha la goma de los neumáticos de desecho, triturándola hasta reducirla a tamaños de partícula de 1 mm o inferiores y se efectúa un aprovechamiento del caucho por el betún en caliente, en planta, antes del amasado de la mezcla. En general, el nivel de ruido de rodadura decrece cuando la amplitud de las rugosidades corresponde a una longitud de onda perteneciente al primer rango y aumenta si se encuentra en el caso del segundo rango; es decir, a mayor textura más nivel de ruido.

²² El mástico está formado por una mezcla de betún asfáltico de penetración modificado con un copolímero elastomérico SBS y filler mineral, o betún oxidado.

3.3 MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO DE PROPULSIÓN.

Los modelos utilizados para el cálculo del ruido del tráfico son basados en parámetros estadísticos (vehículos/hora, porcentaje de vehículos pesados, la velocidad promedio en el camino, etc.). Si se quiere desarrollar un modelo que relacione al ruido individual del vehículo, los parámetros operadores para cada fuente deben ser considerados. En modelos como el Harmonoise, las fuentes principales pueden ser divididas en dos grupos (ruido de rodadura y ruido de propulsión). El ruido de propulsión lo configura el ruido del motor, la toma de aire, el escape, sistema de enfriamiento y transmisión, que actúan como fuentes de ruido dominantes en muchas ocasiones para vehículos pesados. A altas velocidades, el ruido de rodadura llega a ser dominante, especialmente cuando se trata de neumáticos de tracción. El ruido de propulsión está relacionado a la velocidad y carga del motor y el ruido del neumático y la transmisión esta relacionado a la velocidad y carga del vehículo.

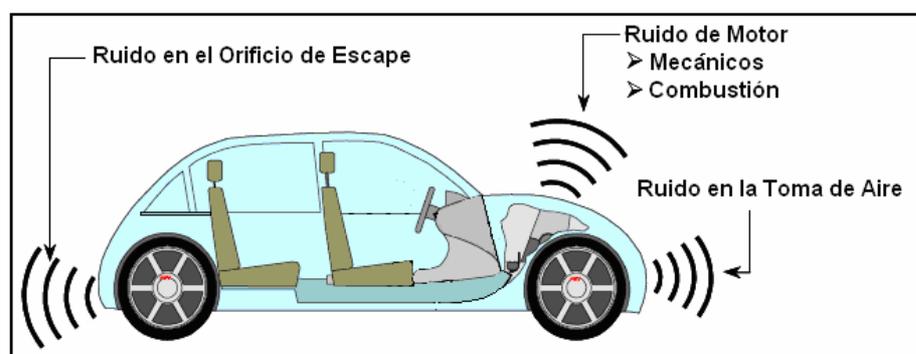


Fig. 3.14 Excitación del Ruido del Vehículo por el Motor.
(Fuente: Dr N. Alt, O. Lang, "Acoustic Behavior of New Combustion Process Concepts for Gasolinas Engines")

El ruido del escape (con un adecuado silenciador) y el ruido de la toma de aire, están por debajo del nivel de ruido de motor; la influencia en el nivel de presión sonora general en dBA puede ser considerado insignificante.

3.3.1 RUIDO DEL MOTOR.

El ruido del motor, se debe a diferentes fuerzas producto de la mezcla aire-combustible durante la combustión, que lleva al llamado ruido de combustión y ruido mecánico en la estructura del motor, en donde la causa de ruido de la combustión, es la presión de la mezcla de gas en los cilindros y el ruido mecánico es generado por un impacto mecánico tal como el golpeteo del émbolo o un sonido excesivo del engrane. Existen varios parámetros que afectan el ruido del motor tales como: la velocidad de motor, la carga, el tamaño del motor y características de diseño, tipo de inyección y cilindro y configuración de válvula.²³

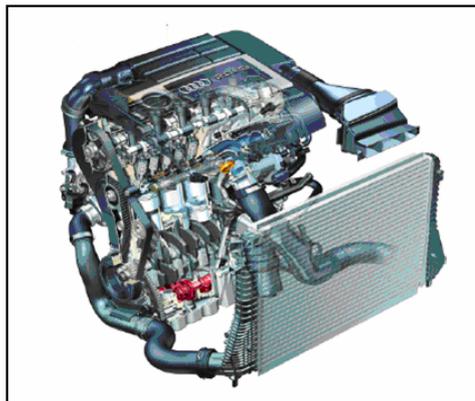


Fig. 3.15 Motor de un Vehículo de Pasajeros
(Fuente: Sven Ruschmeyer, “**Vehicle Noise Measurement** “, 2006)

3.3.1.1 Ruido Mecánico.

El ruido mecánico de motores puede ser dividido en cuatro categorías:

²³ P.M. Nelson, *Transportation Noise Reference Book*, Butterworth & Co. 1987

a.- Ruido por el Golpeteo del Émbolo.

Consecuencia de los impactos entre el émbolo y la pared del cilindro tal que el émbolo se mueve de lado a lado durante el ciclo del motor.

b.- Ruido en la Sincronización.

Consecuencia de los impactos que ocurren entre los dientes de los engranes en la sincronización del tren de engranaje como un contragolpe tomado en cualquier dirección. Los cambios de dirección ocurren como resultado de la vibración de torsión del cigüeñal y los requisitos del momento de torsión fluctuante del árbol de levas y el equipo de inyección.

c.- Otras Fuentes de Ruido.

Estos incluyen los impactos del tren de válvulas y la bomba de inyección, además de los impactos de cierre de la aguja del inyector. Estas fuentes, pueden producir alguna vibración adicional, dependiendo del diseño, pero es generalmente de un orden más bajo que los mencionados anteriormente.

3.3.1.2 Ruido Por Combustión.

Se entiende por ruido del MCI (Motor de Combustión Interna) la emisión acústica que éste produce durante el trabajo. Los principales componentes del ruido del motor son: el ruido de admisión; el ruido por la deformación de las paredes de la cámara de combustión durante la compresión, combustión y expansión; el ruido provocado por las oscilaciones del motor sobre la suspensión; el ruido por golpes durante el trabajo de los mecanismos; el ruido por el funcionamiento de agregados del motor y el ruido durante el escape de los gases. En un motor correctamente ajustado, la combustión normal casi nunca produce ruido, sin embargo, muchas veces puede oírse dos tipos de ruidos peligrosos provenientes del interior del motor. Ello se

debe a la detonación y a la pre-ignición, ésta última originada por la presencia de algún punto caliente que inflama la mezcla de combustible antes de que salte la chispa.

Como se conoce, la principal fuente de ruido de los vehículos para sus conductores en sentido general, es el producido por el motor de combustión interna durante su funcionamiento. Para proporcionarle al conductor un máximo de comodidad en la cabina, es necesario tener en cuenta varios factores tales como los niveles de ruido y la temperatura en la cabina. Se considera que el nivel de ruido estándar actual en la cabina es de 90 dB medido a 200 mm, desde el oído derecho del conductor; buscando como objetivo final para el nivel de ruido dentro de la cabinas el valor de 74 dB.

3.3.1.3 Efectos De Las Variables Del Motor En La Emisión Del Ruido.

a.-Efecto de la velocidad del motor en la emisión del ruido.

El ruido del motor se aprecia principalmente por el efecto de la velocidad del motor dependiendo de su tipo y su potencia. La velocidad y la potencia más alta del motor generan normalmente el nivel más alto del ruido tota, en general un motor diesel ligero de un vehículo produce un ruido más fuerte que un motor de gasolina ya que el rango de velocidad para el motor de gasolina es más alto y los niveles del ruido se acercan uno al otro.

b.-Efecto del tamaño del motor en la emisión del ruido.

No existe relación directa entre la potencia del motor y el ruido del mismo, debido a que el factor principal es la velocidad de motor. Los motores más grandes operan a una velocidad más baja debido a la velocidad limitada del émbolo por lo tanto la velocidad promedio del motor “ n ” es reducida por n^* (capacidad de cilindro

en litros)^{0.5}. El ruido emitido es generalmente independiente del trabajo realizado por la unidad (hp) y más crucial es la velocidad operacional o el tiempo de operación de un ciclo de acontecimientos realizados por el motor.

3.3.2 RUIDO EN EL TUBO DE ESCAPE.

La primera pieza que se encuentra en un tubo de escape se denomina "catalizador" cuya función es la de transformar los gases del motor que tienen componentes tóxicos en gases que son compatibles con la naturaleza y con la vida. Posteriormente el tubo de escape tiene una trayectoria ondulada para poder esquivar de alguna manera todos los componentes del vehículo.

Siguiendo el recorrido en el tubo de escape se llega al "silenciador frontal" considerado como un "resonador" el cual controla las ondas de presión que van y vienen dentro del tubo de escape permitiendo que tengan las características óptimas para el funcionamiento de ese motor. El resonador trabaja como una cámara de expansión: los gases llegan allí y se expanden violentamente, por lo cual interrumpen y reflejan las ondas que llegan hasta él. El resonador no puede ser cambiado, ni en forma, ni en posición, porque se alteraría el comportamiento del vehículo.

Finalmente en el último trayecto del tubo de escape se encuentra el "silenciador trasero". Éste dispositivo proporciona la característica de reducir el ruido en donde el gas del motor no sale en forma de flujo continuo, sale en forma de pulsos, que tratan de expandirse a velocidades superiores a la del sonido generando el característico ruido de un "escape libre" típico de un motor de competición.

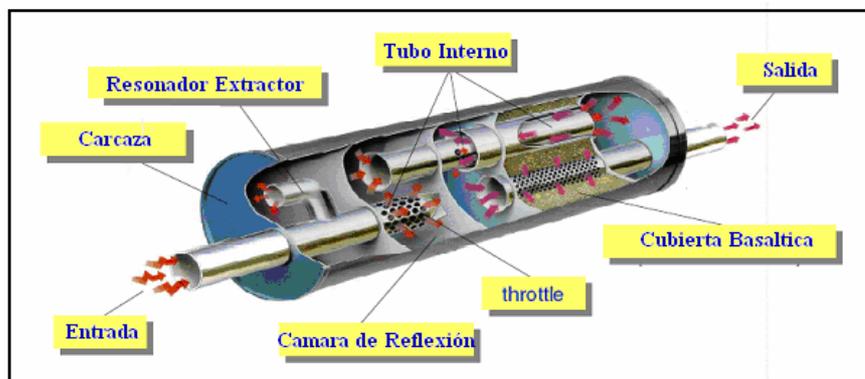


Fig. 3.16 Silenciador de Escape con Material de Absorción
(Fuente: Sven Ruschmeyer, “*Vehicle Noise Measurement*”, 2006)

En el diseño de silenciadores de escape, para llevar al máximo la reducción del ruido generalmente se usan métodos de diseño computarizados y procedimientos analíticos de prueba. El problema básico en este particular es lograr la reducción adecuada del ruido sobre la gama importante de frecuencias en la cola del tubo de escape con la restricción mínima de flujo de gases al exterior, y con el volumen del silenciador tan pequeño como sea posible.

Es importante también evitar la generación del ruido por el flujo de los gases en los tubos que conectan el escape múltiple a la caja del silenciador, así como por las características físicas de la misma caja. Por ejemplo, el vórtice que se libera en una orilla del tubo dentro de la caja puede producir un ruido substancial en el rango de ponderación A. También la vibración de los paneles en las cajas del silenciador debe ser aminorada.

3.3.3 RUIDO DEL VENTILADOR.

La mayoría de los diseños actuales de vehículo incluyen ventilador de motor controlados termostáticamente y operan para sólo un porcentaje relativamente pequeño del tiempo de viaje del vehículo. Cuando ocurre el ruido de ventilador puede

ser una fuente importante del ruido de vehículo. En particular son los vehículos pesados los que tienen motores potentes que requieren grandes flujos de aire a través del radiador para estabilizar la temperatura de motor. El ruido generado por el ventilador puede ser clasificado de la manera siguiente:

- **Ruido de banda ancha:** causado por vórtices y turbulencia aérea.
- **Ruido Tonal:** causado por la rotación del ventilador y el paso de las aspas fijadas. La frecuencia depende del número de aspas, la velocidad de giro y el ángulo que forma el aspa.
- **Ruido Mecánico:** causado por la vibración del ventilador, cubierta del ventilador de proa y el radiador.

3.3.4 RUIDO DE LA TRANSMISIÓN.

. El ruido de la transmisión, es decir caja de cambios, árboles motores y ejes traseros, han llegado a ser más obvio con el mejoramiento y diseño acústico del motor. La excitación principal del ruido en la transmisión es el acople de los dientes engranados y el ruido de la caja de cambios se desarrolla principalmente por el momento de torsión de motor y la velocidad del motor.

3.3.5 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE RUIDO Y SUS SOLUCIONES EN MOTOCICLETAS.

Las fuentes de ruido de mayor influencia en las motocicletas incluyen sistemas de aireación, sistema de escape, motor, neumáticos, tren de manejo, entre otros. Sin embargo, el sistema de escape es una de las partes de mayor nivel ruido en motocicletas el cual se podría reducir alojando un único sistema de escape.

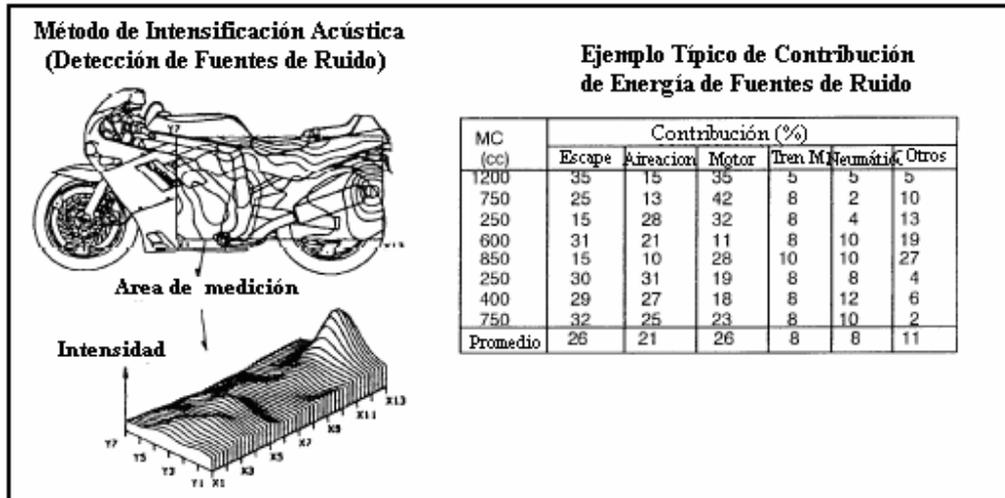


Fig. 3.17 Identificación de Fuentes de Ruido

(Fuente: IMMA , “ Motorcycle Noise: A curious silence“ , 1996)

En años recientes, las fuentes de ruido han sido medidas con mayor facilidad usando la intensidad acústica como se muestra en la Fig. 3.17, por lo tanto el modelo de fuentes de ruido puede ser determinado. Lo cual quiere decir que los métodos de análisis y mediciones han sido mejorados significativamente, sin la existencia de tecnologías innovadoras para la reducción del nivel de ruido.

Las tecnologías presentes usadas para reducir el ruido de motocicletas son básicamente las mismas que para el motor de un vehículo. De cualquier forma, las mediciones para motocicletas son más difíciles para ser realizadas en comparación a motores de vehículos por las siguientes razones:

- Una restricción en la capacidad de silenciador (a causa del espacio disponible y estabilidad de manejo).
- Un motor expuesto (por razones prácticas, mantenimiento).
- Una velocidad de altas revoluciones del motor relativas (para mantener la función necesaria con un reducido desplazamiento del motor).

Las características del ruido varían en diferentes motocicletas siendo que una tecnología efectiva para un tipo puede ser inefectivas para otras. Por tal motivo para el desarrollo de un método de ensayo y error para cada tipo de motocicleta se requiere, que la estructura del silenciador sea completamente diferente para cada tipo.

3.4 MECANISMOS DE GENERACIÓN DEL RUIDO AERODINÁMICO.

El ruido aerodinámico, es el causado por fluctuaciones temporales de la corriente de aire alrededor del cuerpo de un automóvil en movimiento. El ruido del viento, un ejemplo del ruido aerodinámico, es causado por fluctuaciones en vórtices, donde esta clase de emisión de ruido generalmente no es un factor importante para el ruido exterior de vehículo (para velocidades bajas y moderadas, por debajo de 130 Km/h).

El ruido por una vibración aerodinámica se reconoce como un ruido cuando la onda sonora creada por fluctuaciones muy pequeñas en la densidad del flujo, pasa a través de un medio estacionario uniforme y alcanza al receptor. Sin embargo, las fluctuaciones de presión sonora distinguidas como ruido, tiene una intensidad de sólo aproximadamente 10^{-5} W/m^2 .

Por consiguiente, al realizar un análisis aerodinámico verdadero del ruido, dos métodos se pueden aplicar después de calcular las fluctuaciones en el campo del flujo que es la fuente del ruido: primero las características del ruido se predicen indirectamente utilizando las fluctuaciones de la presión del flujo; segundo la presión sonora en un punto de observación se calcula aplicando la teoría de Lighthill-Curle, en los resultados computacionales del campo inestable del flujo.

Para la velocidad ordinaria del flujo sobre un vehículo en movimiento, la corriente de aire alrededor del cuerpo de este se trata como un flujo incompresible, ya que no permite cambios en la densidad y debe ser considerado.

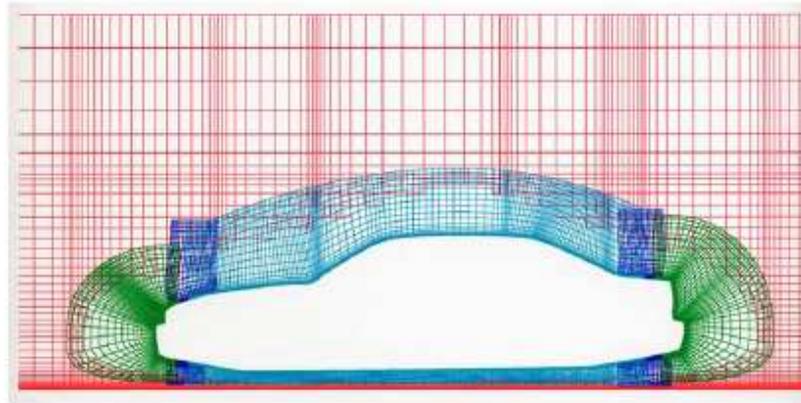


Fig. 3.18 Sistema Gradual de configuración general para la simulación del flujo de aire de un tipo de vehículo

(Fuente: Nariaki Horinouchi, “**COSMOS-V, an Aerodynamic Noise Simulator**”)

CAPÍTULO IV

BARRERAS ANTI-RUIDO EN AUTOPISTAS

4.1 GENERALIDADES.

Debido al crecimiento de las ciudades y del parque automovilístico, los problemas de ruido tienden a agravarse. Este hecho, unido a las mayores demandas de calidad medioambiental por parte de la sociedad hace que sea imprescindible el desarrollo de medidas correctoras del impacto acústico generado por las vías de circulación.

La reducción de los niveles sonoros percibidos por la población se puede realizar a través de la actuación sobre la fuente, sobre la propagación acústica o sobre el receptor. En el caso de la circulación rodada, se ha realizado un esfuerzo por reducir el ruido en su origen, actuando sobre los motores de los vehículos y en el diseño de los neumáticos. Se ha llegado actualmente, a unos niveles por debajo de los cuales es difícil descender.

Se puede actuar sobre el receptor del ruido del tráfico mediante la instalación de dobles ventanas y la mejora del aislamiento acústico de los edificios, que es una solución económica y eficaz para cualquier origen del ruido, pero cuya eficacia se limita a la población que se encuentra ubicada en su interior con las ventanas cerradas, con lo que no se percibe la mejora global del entorno. Por lo tanto, actuar sobre la propagación se presenta, en muchos casos, como la única solución posible.

4.2 BARRERAS ANTI-RUIDO

Las barreras anti-ruido son muros constituidos por elementos de pared relativamente delgada, verticales o inclinados, que ofrecen gran resistencia a la transmisión del sonido. Este elemento es un obstáculo para el sonido, que interrumpe

el camino entre el foco emisor y el receptor. El ruido se propaga mediante ondas sonoras que cuando llegan a una superficie sólida, como lo es una pantalla acústica, cambian su dirección o son transformadas en otro tipo de energía, dependiendo del tipo de obstáculo que se encuentre. Por tal motivo, como puede verse en la figura 4.1, cuando las ondas sonoras se encuentran con una pantalla acústica pueden ser: reflejadas, absorbidas, transmitida o difractada en los bordes, ocasionando esto último ondas idénticas a las incidentes en todas las direcciones.

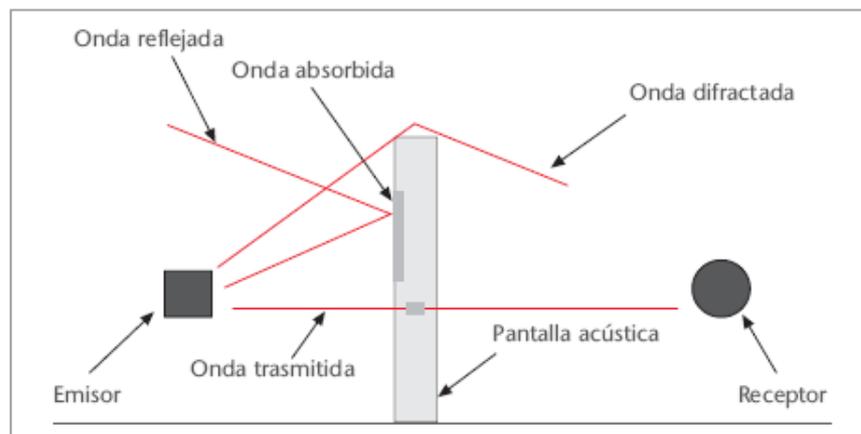


Fig. 4.1 Trayectoria de ondas incidentes en una Barrera Anti-ruido
(Fuente: COMPOSAN, **Manual Aislamiento Acústico**)

Además del diseño, existen otros factores que contribuyen al buen funcionamiento de las barreras acústicas, como son el flujo de vehículos, los factores ambientales, el diseño de las carreteras, el terreno, etc. Es muy importante la ubicación de la pantalla en el campo libre, así como la altura de la misma ya que ambos conceptos repercuten en su rendimiento. Para valorar la reducción sonora o la pérdida de inserción de las barreras acústicas se utilizan programas y métodos mas avanzados, como el ábaco de Maekawa, el número de Fresnel o el ábaco de Kurze.

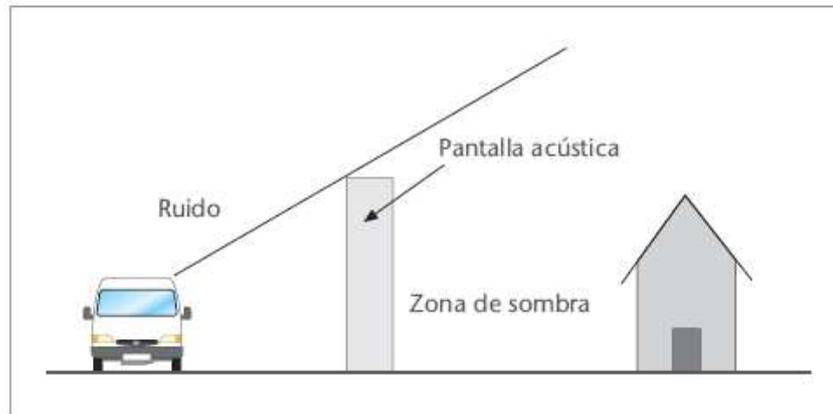


Fig. 4.2 Zona de Sombra
(Fuente: COMPOSAN, “Manual Aislamiento Acústico”)

4.2.1 FUNDAMENTO ACÚSTICO.

En ausencia de barrera, un sonido emitido por una fuente se propaga por el aire hasta alcanzar al receptor. En un medio homogéneo e isótropo, los rayos sonoros se propagan en línea recta en todas direcciones, por tal motivo, la intensidad sonora, lógicamente, disminuye con la distancia a la fuente (la energía acústica debe distribuirse en una mayor superficie de frente de onda). Además, la absorción del aire y la presencia de elementos absorbentes reducen los niveles acústicos. Si se interpone una pantalla entre la fuente y el receptor, la propagación del sonido se modifica y parte de la energía que incide en la pantalla pasa a través de la misma (esta energía, llamada “transmitida”, es despreciable desde el punto de vista energético). El resto de la energía, como se menciona anteriormente el absorbida, reflejada y difracta en el borde de la barrera. La absorción de un material se caracteriza por medio del coeficiente α sabine que se define, para una frecuencia determinada del sonido, como el cociente entre la energía absorbida y la incidente. En función del coeficiente de absorción del material constitutivo de la pantalla, ésta se puede denominar como reflejante (α próximos a 0) o absorbente (α cercanos a 1).

En configuraciones de apantallamiento vertical a ambos lados de una carretera estrecha o en el caso de reflexiones múltiples entre la caja de un camión y la barrera, resulta más eficaz la disposición de elementos muy absorbentes, que eliminan las reflexiones perniciosas (las cuales podrían reducir la eficacia de la barrera). Sin embargo, la fuente de mayor nivel de ruido siempre cubre a la de menor nivel.

4.3 AISLAMIENTO ACÚSTICO.

El sonido puede transmitirse por vía aérea (al incidir la onda sonora sobre una superficie, la hace vibrar y ésta a su vez hace vibrar el aire en el recinto contiguo, además de atravesar la superficie a través de los poros) o por vía estructural (se hace vibrar la superficie mediante la acción de una fuerza externa, transmitiéndose la vibración a lo largo de la superficie y haciendo finalmente vibrar el aire en torno a la superficie). En este sentido se definen dos tipos de aislamiento para una misma superficie; aislamiento a ruido aéreo y aislamiento a ruido de impacto, relacionados respectivamente con las distintas formas de transmisión del sonido. En adelante, siempre que en el presente estudio se hable de aislamiento, se entenderá “aislamiento a ruido aéreo”.

4.3.1 TEORÍA DEL AISLAMIENTO.

El aislamiento o índice de reducción sonora R , se define como “diez veces el logaritmo del cociente entre la potencia sonora que incide sobre el objeto de prueba que se considere, W_1 , y la potencia sonora transmitida a través de éste, W_2 ”

$$R = 10 \cdot \log\left(\frac{W_1}{W_2}\right) \quad (4.1)$$

Se han desarrollado diversos modelos teóricos, que no se reproducirán por alejarse del objetivo principal del presente trabajo, a partir de los cuales se han obtenido una serie de expresiones matemáticas que permiten el cálculo, de forma aproximada, del valor de aislamiento previsto para diversos tipos de cerramientos estándares (cualquier superficie de separación entre dos locales). Es importante señalar sin embargo que, en la aplicación cuando se le asigna un valor de aislamiento a un determinado material constructivo, se recurre a los valores obtenidos en cámaras de ensayo y no a las expresiones teóricas.

4.3.2 AISLAMIENTO DE UNA PARED SIMPLE HOMOGENEA: LEY DE MASAS

Dado un cerramiento formado por un único material de unas características de elasticidad y densidad conocidas, la energía “atravesará” el cerramiento tanto a través de los poros como en forma de una nueva onda generada al vibrar la propia partición (cerramiento). La atenuación de la onda sonora que incide depende de la frecuencia del sonido, de la masa de la pared y de las condiciones de contorno de la partición. En el caso de una pared simple, las propiedades aislantes varían considerablemente con la frecuencia, por lo que se suelen distinguir tres zonas de comportamiento claramente diferenciados:

Zona 1: A bajas frecuencias, la pared se comporta como un resorte o placa vibrante. En esta zona, el aislamiento decae con la frecuencia y se ve afectado así mismo por las frecuencias propias o de resonancia, que están relacionadas con la rigidez y las condiciones de contorno de la pared. La existencia de estas frecuencias de resonancia, disminuye radicalmente el aislamiento por debajo de los 100Hz.

Zona 2: Se corresponde con la mayor parte del espectro de interés, para los materiales de uso habitual en las construcciones arquitectónicas. En este rango de frecuencias, el comportamiento de la pared simple está gobernado por su masa y se puede considerar como una gran cantidad de pequeñas masas deslizándose unas sobre otras. Para este rango de frecuencias, se encuentran expresiones teóricas para el aislamiento en función de la masa y de la frecuencia, de la siguiente manera:

$$R = 20 \cdot \log(Mf) + C \quad (4.2)$$

Donde:

M = masa por unidad de superficie del material [Kg/m^2]

f = frecuencia [Hz]

C = constante que depende de la impedancia del material

El aislamiento R aumenta con una pendiente de 6dB/octava, tanto si se duplica la masa del cerramiento como si se dobla la frecuencia, aunque esto es así solo hasta un determinado límite superior de frecuencias. La ecuación (4.2) constituye la conocida *Ley de Masas* y se representa en la Figura 4.3.

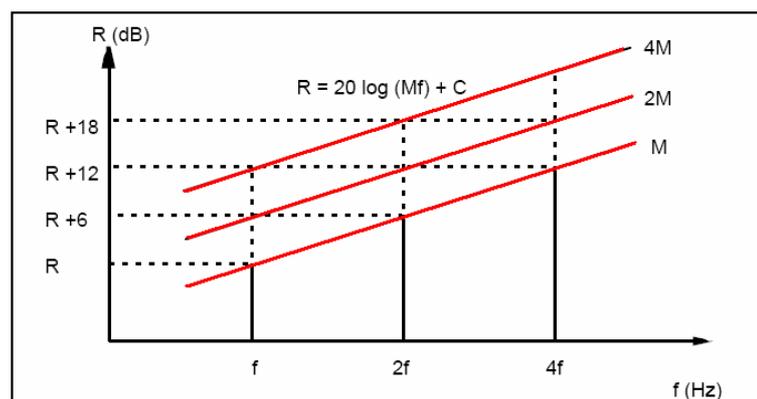


Fig. 4.3 Ley de Masas. Partición Simple
(Fuente: “El Aislamiento Acústico y la Norma Existente”)

En la práctica, los materiales no responden a la ley de masas a todas las frecuencias. Bajo determinadas condiciones, las ondas de flexión (λ_F) que se generan en la pared al vibrar, pueden entrar en resonancia con la onda sonora incidente (λ). A este fenómeno se le denomina efecto de coincidencia. (Figura 4.4)

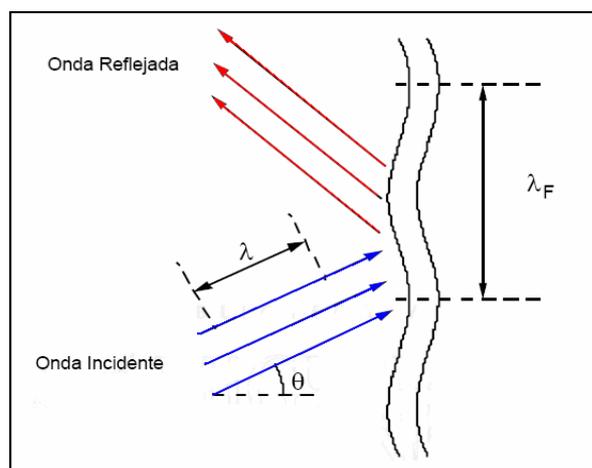


Fig. 4.4 Onda Sonora de Flexión. Fenómeno de Coincidencia
(Fuente: “El Aislamiento Acústico y la Norma Existente”)

La menor de las frecuencias de coincidencia posibles es la llamada frecuencia crítica y marca el límite superior a la zona 2. Debido el aislamiento se reduce bruscamente a esta frecuencia.

Para los sonidos incidentes cuya longitud de onda cumpla la relación mostrada en la ecuación (4.3), se tiene que la frecuencia crítica se calcula según la expresión (4.4)

$$\lambda = \lambda_F \cdot \text{sen}(\theta) \quad [\text{m}] \quad (4.3)$$

Donde:

λ_F = Longitud de la onda a flexión originada en el cerramiento [m]

θ = Ángulo de incidencia.

La frecuencia crítica viene dada por:

$$f_c = \frac{6,14 \cdot 10^4}{d} \sqrt{\frac{\rho \cdot (1 - \sigma^2)}{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.4)$$

Siendo d el espesor del cerramiento [m], ρ es la densidad del material del cerramiento [Kg/m^3], σ su coeficiente de Poisson, E su módulo de Young.

Zona 3: Por encima de la frecuencia crítica, la pared simple no obedece a la ley de masas, pasando nuevamente a tener un comportamiento de resorte. En esta zona, el factor que gobierna las variaciones del aislamiento es el amortiguamiento interno del material, es decir, la capacidad del material para absorber energía acústica a las ondas de flexión. Existen sucesivas frecuencias de coincidencia muy distanciadas. La pendiente de la curva de aislamiento a la frecuencia superior a la de coincidencia, pasa a ser de 10dB/octava en vez de los 6dB correspondientes a la ley de masas.

Las tres zonas anteriormente descritas pueden observarse en la Figura 4.5.

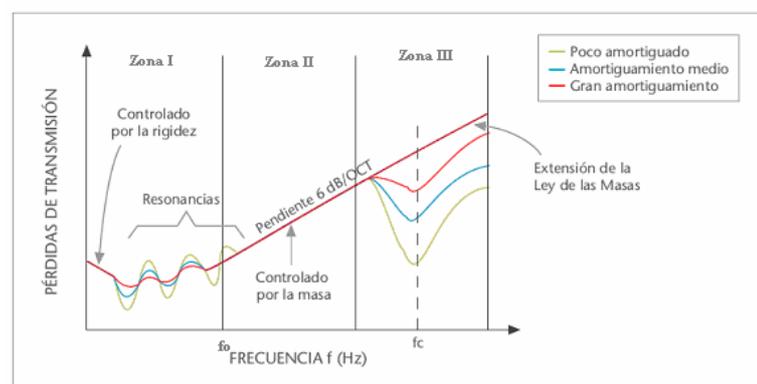


Fig. 4.5 Aislamiento de una pared simple
(Fuente: COMPOSAN, “Manual de Aislamiento Acústico”)

Es interesante notar que, aunque en la *Zona 2*, es la Ley de Masas quien gobierna el aislamiento, sin embargo, existe así mismo una dependencia con el ángulo de incidencia. La variación del aislamiento con el ángulo de incidencia θ viene dada por la ecuación:

$$R_{\theta} = 10 \cdot \log\left(\frac{M \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(\theta)}{\rho_0 \cdot c}\right)^2 = 20 \cdot \log(M \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(\theta)) - 42 \quad (4.5)$$

Donde ρ_0 es la densidad del aire [Kg/m^3] y c es la velocidad del sonido en el aire [m/seg]. El aislamiento, por tanto, disminuye en aquellas situaciones en el que la onda incide es tangente al muro, frecuentes en el caso de fuentes direccionales. En el caso particular de recintos cerrados con ondas incidiendo en todas direcciones, si se hace un promedio para todos los ángulos de incidencia entre 0° y 80° , se obtiene un aislamiento 5dB menor que en el caso de incidencia normal.

4.4 EFECTIVIDAD ACÚSTICA.

La eficacia acústica de las barreras anti-ruido puede se mide en términos de la **Pérdida de Inserción** y la **Pérdida de Transmisión**. La pérdida de inserción, es la reducción del ruido que una barrera causa, si es colocada entre la fuente y el receptor. La pérdida de la transmisión es una medida de la cantidad de sonido que viaja a través de una barrera. Ambas pérdidas le dan al diseñador un sentido de la eficacia acústica de una barrera propuesta.

4.4.1 PÉRDIDA DE INSERCIÓN.

La pérdida de inserción es una medida que incluye la difracción de ondas sonoras sobre el tope de una barrera anti-ruido. A causa de que la mayoría de las

barreras bloquean la transmisión sonora, la mayor parte de los sonidos que alcanzan los receptores detrás de la barrera se difractan sobre el tope de la misma.

La importancia de la difracción de las ondas sonoras sobre el tope de las barreras es reforzada por una investigación que se mencionan a continuación. La absorción de un perfil T en el tope de una barrera, incrementan la pérdida de inserción de la barrera de 1 a 1,5 dB (May y Osman, 1980).²⁴ Las barreras con topos cilíndricos aumentan la pérdida de inserción de 2 a 3 dB (Fujiwara y Furuta 1991)²⁵ y un dispositivo de desfase que produce aumentos de 3 a 5 dB (Amram y los otros 1987)²⁶.

4.4.1.1 Método De Lam Usando La Curva De Maekawa/Kurze

La ecuación para la pérdida de inserción en barreras finitas se da como:

$$IL(dB) = M_1 + 10 \cdot \log \frac{1 + 2 \cdot \left(\frac{d_o}{d_r}\right) \cos(\pi \cdot N_r) + \left(\frac{d_o}{d_r}\right)^2}{\sum_{i=1}^8 \sum_{m=1}^8 \frac{10^{-M_i/20}}{10^{-M_1/20}} \frac{10^{-M_m/20}}{10^{-M_1/20}} \cos[\pi \cdot (N_i - N_m)]} \quad (4.6)$$

Donde N_i es el número de Fresnel para la trayectoria $i^{\text{ésima}}$, y M es el valor de la pérdida de inserción de la curva de Maekawa. El subíndice “o” se refiere a la

²⁴ May, D.N., Osman, M.M.; “The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in Toronto”, Journal of Sound and Vibration 71(1), 1980, pag. 65–71.

²⁵ Fujiwara, K.; Furuta, N; “Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge”, Noise Control Engineering Journal, 37(1), 1991, pag. 5–11.

²⁶ Amram, M.; Chvojka, V.J.; Droin, L; “Phase reversal barriers for better control at low frequencies: laboratory versus field measurements”, Noise Control Engineering Journal 28(1), 1987, pag. 16–24.

trayectoria directa (de la fuente al receptor) y el subíndice “r” se refiere a la trayectoria reflejada al suelo (de la fuente imagen al receptor). La curva de Maekawa/Kurze puede ser representada por las siguientes dos ecuaciones:

$$M = 20 \log \frac{2\pi \sqrt{\frac{N}{2}}}{\tanh(\pi \sqrt{\frac{N}{2}})} - 10 \cdot \log(2 \cdot e^{-h/2\lambda} + 1) \quad , \quad (N < 1) \quad (4.7)$$

$$M = 10 \log(20N) \quad , \quad (N > 1) \quad (4.8)$$

El número de Fresnel se da de la siguiente manera:

$$N = \frac{2}{\lambda} (A + B - d) \quad (4.9)$$

Donde $(A+B-d)$ es la diferencia de longitud de la trayectoria como se muestra en la Figura 4.6, λ en la onda de longitud y h la altura de la pantalla.

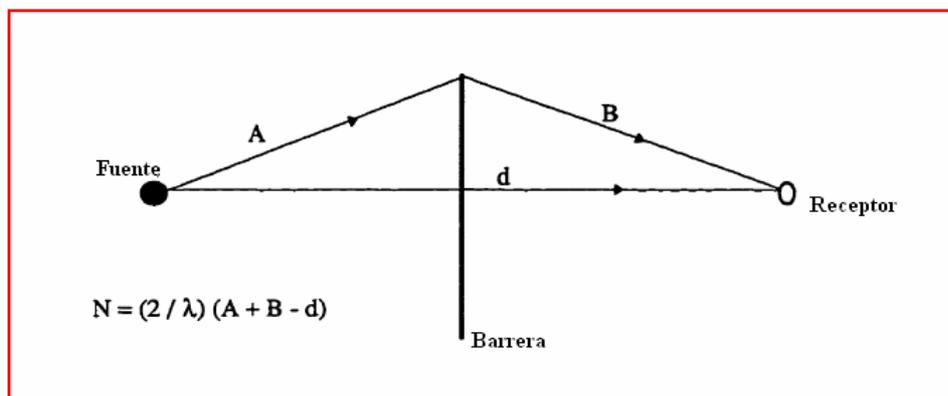


Fig. 4.6 Definición de símbolos usados para determinar el número de Fresnel, N
(Fuente: Amirmohamed Muradali, “**Geometric Models to Model Acoustic Barriers Including Atmospheric Conditions**”, 1997)

Otro método poco usado e investigado es determinar la presión debido a cada trayectoria difractada en la forma de la ecuación:

$$p_i = A_i \cdot e^{\zeta_i} \cdot G \cdot (k \cdot d_i) \quad (4.10)$$

Donde A_i , ζ_i y d_i son el cambio de la amplitud en la difracción, fase de transferencia a la difracción y la longitud de trayectoria de la onda difractada, respectivamente. La función G , es la tendencia geométrica para la fuente a ser considerada.

$$p_i = A_i \cdot e^{j \frac{\pi}{4}} \frac{e^{-j \cdot k \cdot d_i}}{d_i} \quad (4.11)$$

Donde A_i es un término de amplitud y puede ser determinado por:

$$A = \frac{d_i}{d_o} \cdot \left(\frac{\tanh\left(\pi \cdot \sqrt{\frac{N}{2}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{N}{2}}} \right) \quad (N < 1) \quad (4.12)$$

$$A = \frac{d_i}{d_o} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{20 \cdot N}} \right) \quad (N > 1)$$

4.4.2 PÉRDIDA DE TRANSMISIÓN.

Es la diferencia entre el nivel de potencia sonora incidente y el nivel de potencia que atraviesa el material y depende de la frecuencia. En paredes simples aumenta 5 dB cada vez que se duplica el espesor, propiedad conocida como *ley de la masa*, definida anteriormente. En paredes dobles aumenta con mayor rapidez. Debe tenerse en cuenta que si la pérdida de transmisión de un material es 40 dB, por ejemplo, no necesariamente el nivel sonoro disminuye 40 dB al interponer un tabique construido con ese material. El cambio de nivel de ruido puede ser mayor, menor o

igual que 40 dB dependiendo del tamaño del tabique y de la absorción sonora del espacio receptor.

La pérdida de transmisión y su influencia en la pérdida de inserción es un asunto de interés para muchos diseñadores de barreras anti-ruido en carreteras. A causa de que la densidad de masa de la madera es más baja que la del cemento o el acero, los diseñadores han observado que cuando las barreras de madera no son suficientemente gruesas, la poca pérdida de transmisión contrarrestará la pérdida de inserción. Es decir, las ondas sonoras viajarán a través de la barrera y reducirán el efecto protector de la barrera entre el receptor y la fuente sonora.

Sin embargo, según Kurze y Anderson (1971)²⁷ la transmisión a través de las barreras puede ser ignorada si la masa por superficie de la barrera es mayor a 20 kg/m². Esto supone que no hay efectos de resonancia o coincidencia para reducir las pérdidas de transmisión; si tales efectos existen, la amortiguación será necesaria para la barrera. Los efectos de la resonancia y la coincidencia en barreras anti-ruido de acero resultan un aumento de 4 dB en la pérdida de inserción, según Behar y May (1980).

4.5 PERFILES DE BARRERAS ANTI-RUIDO.

4.5.1 DISEÑO DE BARRERAS DE PERFIL “T”.

Mucha de la investigación disponible se enfoca en varios tratamientos para el tope límite de la barrera, la intención es el de alterar el límite lineal que causa la difracción del sonido hacia receptores detrás de la barrera. Parte de la investigación identificada es el del tope de perfil ”T” que redujo niveles de ruido en un área

²⁷ Kurze, U.J.; Anderson, G.S; “Sound attenuation by barriers”, Applied Acoustics 1, 1971,pag 35–53.

residencial detrás de la barrera de 1,0 a 1,5 decibeles (dBA), comparado con una barrera vertical convencional de la misma altura (May & Osman, 1980). Los estudios posteriores confirmaron los beneficios del tope límite de un perfil “T” en reducir niveles del ruido, aún siendo comparado a variaciones tales como las barreras de perfil “Y” y el perfil flecha.²⁸

4.5.2 DISEÑO DE BARRERAS CON EL TOPE MELLADO.

A finales de la década de los noventa y comienzos del 2000 varios investigadores examinaron la reducción de potencial del ruido reemplazando el límite del tope lineal de una barrera anti-ruido con un límite de tope mellado o irregular. Los resultados demuestran una reducción de 6 dBA en niveles de ruido²⁹. Sin embargo, dos equipos de investigadores identificaron que en frecuencias más bajas, el diseño mellado del tope de la barrera proporcionó un beneficio mínimo (Ho, Busch-Vishniac, & Blackstock, 1997; y Sarigul-Klijn & Karnopp, 2000). El pobre desempeño a baja frecuencia fue inexplicable y se dirigió un equipo de investigación para concluir que no había beneficio al utilizar el diseño del tope límite mellado para barreras de ruido de carretera (Sarigul- Klijn & Karnopp, 2000).

4.5.3 DISEÑO DE BARRERAS CON EL TOPE CILINDRICO.

Las primeras investigaciones en esta sub-área, de diseños innovadores de barrera anti-ruido, ocurrieron en Japón. Aquí, los investigadores examinaron acústicamente los cilindros de absorción, en el tope límite de este elemento (Fujiwara

²⁸ Hothersall, D.; Crombie, D.; Chandler-Wilde; “**The performance of Tprofile and associated noise barriers**”, *Applied Acoustics* 32, 1991, pag. 269-287.

²⁹ Busch, Vishniac; “**Jagged-edge noise barriers**”. Acoustical Society of America, 1998.

& Furuta, 1991). Ensayos de campo de dos fijaciones de cilindro mostraron que el cilindro absorbente proporcionó un exceso de atenuación de 2 a 3 dBA en comparación con una barrera convencional anti-ruido, que eran comparable con el aumento de 6,5 pies en la altura. En la investigación subsiguiente se comparó el cilindro absorbente con una fijación absorbente de tipo hongo³⁰.

4.5.4 DISEÑO DE BARRERA CON EL TOPE EN FORMA DE HONGO

El tope en forma de hongo fue estudiado por varios investigadores en 1995 y a través de la investigación, este diseño fue construido con materiales absorbentes y fue aplicado como una mejora a la aplicación de topes límites de barreras anti-ruido existentes. Gharabegian (1995)³¹, aplicó el diseño del tipo hongo a lo largo de una barrera cerca de Los Ángeles y mostró la aplicación, con una altura efectiva de 1,5 pies, proporcionando la misma reducción de ruido con 3,5 pies adicionales en la altura de la pantalla. Yamamoto (2000), condujo aplicaciones semejantes de campo realizadas por dos autopistas en Japón, obteniendo como resultado las reducciones insignificantes para una carretera inclinada.

4.5.5 DISEÑO DE BARRERA CON EL TOPE LÍMITE MÚLTIPLE.

Las fijaciones de tope límite múltiple en las barreras han sido examinadas por varios investigadores, aunque los diseños individuales varíen en algunos factores. Crombie y Hothersall (1994)³² diseñaron una fijación de tipo tenedor que podría ser

³⁰ Okubo, T; Fujiwara, K, “**Efficiency of a noise barrier with an acoustically soft cylindrical edge for practical use**”, Journal of the Acoustical Society of America 105(6), 1999, pag. 3326-3335.

³¹ Gharabegian, A.; “**Improving soundwall performance using Route Silent**”. Proceedings of Inter-noise 95, 1995. pag. 385-388.

³² Crombie, D.; Hothersall, D.; “**The acoustical performance of multiple edge noise barriers**”. Proceedings of Inter-noise 94, 1994, pag. 587-590.

aplicada a una barrera anti-ruido existente para proporcionar una reducción adicional del ruido. Watts y Morgan (1996)³³ realizaron pruebas sobre este diseño y tuvieron como resultado alrededor de 1,9 dBA de reducción adicional de ruido. Shima, Watanabe, y Yokoi (1998)³⁴ realizaron las pruebas de varios diseños de tope ramificado, dos de los cuales mostraron las reducciones de 3 a 4 dBA.

4.5.6 DISEÑO DE BARRERAS DE CONTROL ACTIVO EN EL TOPE.

El control activo del ruido, implica un dispositivo conectado al tope de una barrera anti-ruido que prueba continuamente el espectro del ruido del ambiente y produce una onda sonora opuesta, para cancelar el ruido experimentado. Esto es un área naciente de la investigación de barrera anti-ruido en los últimos años.

La primera investigación práctica en el área del control activo del ruido consistió, en un concepto teórico por investigadores japoneses, mostrando en simulaciones una atenuación de 3 a 5 dBA mayor que un tratamiento de topes de absorción.

4.6 MATERIALES DE BARRERAS.

Las barreras anti-ruido de carreteras están hechas de varios materiales diferentes. En esta sección, estos materiales se revisan haciendo énfasis particularmente en las especificaciones comúnmente utilizadas. Una variedad de

³³ Watts, G.; Morgan, P.; “Acoustic performance of an interference-type noisebarrier profile”. Applied Acoustics 49(1), 1-16.

³⁴ Watanabe, T., Yokoi, T.; “Branched noise barriers”. Proceedings of Inter-noise 98,1998, pag 403-406.

materiales se ha considerado para paneles de pared de ruido, entre ellos se pueden mencionar:

4.6.1 CONCRETO.

Los paneles de concreto ofrecen una gran flexibilidad en el diseño, en el que pueden estar en forma de superficies concretas lisas que no ofrecen textura o un agregado expuesto que proporciona la misma. Las superficies de concreto se pueden rastrillar, también pueden ser barridas, o sujeto a otras técnicas especializadas para agregar el carácter final del panel. El concreto puede tomar apariencias parecidas a tablas de madera erosionadas, para proteger la cara y para granizar los bloques.



Fig. 4.7 Barrera anti-ruido de Concreto
(Fuente: FHWA, **Noise Barrier Constructability Study**, 2004)

Gracias a la prefabricación se pueden conseguir acabados superficiales, precisión geométrica y prestaciones estéticas imposibles para la construcción “in situ”, por las numerosas terminaciones superficiales y colores, que permiten lograr

conjuntos de gran fuerza estética. Por otro lado, es factible la ejecución de barreras anti-ruido de concreto” in situ”, aunque la obra no permite llegar a la calidad lograda por la prefabricación. El peso específico elevado del concreto le aporta inmejorables cualidades de aislamiento acústico por la ley de las masas.

4.6.2 METAL.

Las barreras anti-ruido de metal se pueden pintar o pueden ser revestidas en una gran variedad de colores. El metal laminado se puede formar en secciones huecas ligeras, que puede contener paneles de madera aglomerada o lana mineral de materiales absorbentes. Varios sistemas retratados de perfil de la barrera, comprendiendo paneles horizontales que atraviesan postes galvanizados de acero, están comercialmente disponibles. El laminado metálico en un lado se puede perforar para permitir que el ruido pueda interactuar con el material absorbente por dentro, y el perfil ondulado proporciona rigidez estructural.



Fig. 4.8 Barrera Anti-ruido de Metal
(Fuente: FHWA, “**Keeping The Noise Down**”, 2001)

4.6.3 LADRILLO Y BLOQUE DE ALBAÑILERÍA.

El ladrillo es fabricado, utilizando una combinación de arcilla y arena que es despedida en un horno para aumentar la fuerza del ladrillo y su durabilidad. Los ladrillos pueden ser producidos variando los tamaño, pero en su mayoría en 2 x 3 $\frac{3}{4}$ x 8 pulgadas. El bloque de la albañilería es fabricado utilizando una mezcla concreta seca; estos bloques pueden ser producidos en cualquier tamaño pero con un rango común de 8 a 12 pulgadas gruesas, 8 a 10 pulgadas altas, y 14 a 18 pulgadas de largo.

Tanto el ladrillo como las paredes de bloque de albañilería pueden colocarse a mano ó montado por máquinas. Las paredes colocadas a mano tienen mayor flexibilidad en disposiciones y en su habilidad de conformarse a la variedad de contornos de suelo que hace los paneles montados. Los paneles preensamblados, han fijado también los tamaños de paneles y requisitos de los equipos pesados.



Fig. 4.9 Barrera Anti-ruido de Ladrillo
(Fuentes: FHWA, “**Keeping The Noise Down**”, 2001)

4.6.4 MATERIALES COMPUESTOS.

Los materiales compuestos de una barrera anti-ruido están conformados por cualquier producto compuesto de dos o más materias primarias, tal como madera contra chapada con una fibra de vidrio, o una mezcla de madera con cemento. La combinación de estos materiales básicos tiende a cambiar el desempeño, la durabilidad, y, a veces, las características de la seguridad del producto final.

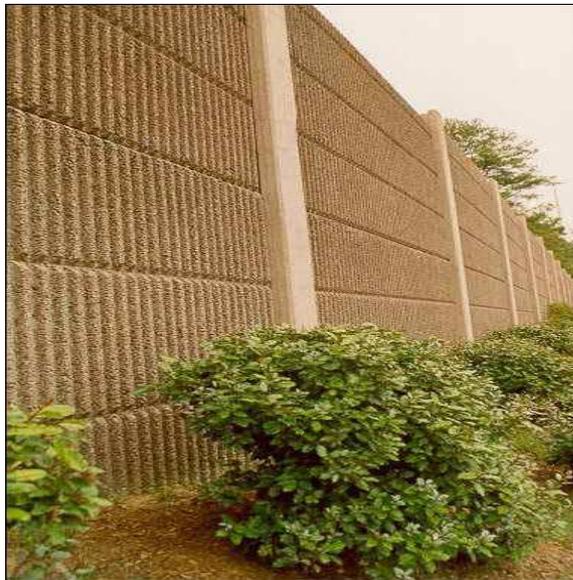


Fig. 4.10 Barrera Anti-ruido de Material Compuesto
(Fuente: FHWA, “**Keeping The Noise Down**”, 2001)

CAPÍTULO V

MODELO MATEMÁTICO PARA LA GENERACIÓN PROPAGACIÓN Y CONTROL DE RUIDO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD

5.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO EN EXTERIORES.

5.1.1 DIRECTIVIDAD.

La directividad es la medida de la característica direccional de una fuente sonora. Se expresa a menudo como el **Índice de Directividad** (DI) en decibelios, o con el valor adimensional Q , también llamado **Factor de Directividad**.

El Factor de Directividad Q se expresa como:

$$Q = \frac{P_{\theta}^2}{P_s^2} = \frac{I_{\theta}}{I_s} = \frac{\text{antilog}(L_{p\theta} / 10)}{\text{antilog}(L_p / 10)} \quad (5.1)$$

Por tanto:

$$Q = \text{antilog} \frac{L_{p\theta} - L_p}{10} \quad (5.2)$$

El Índice de Directividad DI se expresa como:

$$DI = 10 \cdot \text{Log}(Q) \quad [\text{dB}] \quad (5.3)$$

Por Tanto:

$$DI = L_{p\theta} - L_p \quad [\text{dB}] \quad (5.4)$$

Donde:

P_{θ} = presión sonora a una distancia r y con un ángulo θ de la fuente direccional medido respecto a una referencia.

P_s = presión sonora a una distancia r de una fuente no direccional radiando la misma potencia acústica total.

$L_{p\theta}$ = nivel de presión sonora a una distancia r y con un ángulo θ de la fuente direccional.

L_p = nivel de presión sonora a una distancia r de una fuente no direccional radiando la misma potencia acústica total.

5.1.1.1 Índice de directividad en espacios esféricos.

El Índice de Directividad (DI) de una fuente sonora en un espacio sin obstáculos en un ángulo θ para una banda de frecuencia dada es igual a:

$$DI = L_{p\theta} - \bar{L}_{ps} \quad [\text{dB}] \quad (5.5)$$

Donde:

$L_{p\theta}$ = nivel de presión sonora a una distancia r y con un ángulo θ de la fuente direccional.

L_{ps} = presión sonora en un área esférica de ecuación $4\pi r^2$, alrededor de la fuente.

5.1.1.2 Índice de Directividad en espacios Hemisféricos.

El cálculo del Índice de Directividad (DI) de una fuente sonora situada en un plano rígido en un ángulo θ , para una determinada banda de frecuencia se realiza de la siguiente manera:

Como se mostró en la ecuación (2.15):

$$L_{ps} = 10 \cdot \log(I_p) - 10 \cdot \log(I_{ref}) \quad [\text{dB}] \quad (5.6)$$

Usando la ecuación (2.8):

$$L_{ps} = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{A}\right) - 10 \cdot \log(I_{ref}) \Rightarrow L_{ps} = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{A/2}\right) - \log(2) - 10 \cdot \log(I_{ref}) \quad [\text{dB}] \quad (5.7)$$

El nivel de presión sonora para un espacio Hemisférico:

:

$$L_{pH} = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{A/2}\right) - 10 \log(I_{ref}) \quad [\text{dB}] \quad (5.8)$$

Por tanto según la ecuación 5.7:

$$L_{ps} = L_{pH} - \log(2) \approx L_{pH} - 3 \quad [\text{dB}] \quad (5.9)$$

Usando las ecuaciones 5.5 y 5.9 se obtiene:

$$DI = L_{p\theta} - \bar{L}_{pH} + 3 \quad [\text{dB}] \quad (5.10)$$

Donde:

$L_{p\theta}$ = Nivel de presión sonora a una distancia r y con un ángulo θ de la fuente direccional.

L_{pH} = Media cuadrada del nivel de presión sonora en un área hemisférica, alrededor de la fuente.

5.1.2 DIVERGENCIA DE ONDAS.

El nivel de presión sonora generado por una fuente sonora en un receptor situado en el campo lejano de la fuente, disminuye como cierta función de la distancia de la fuente debido a la divergencia de la onda. El nivel de presión sonora también es afectado por condiciones ambientales.

La divergencia de las ondas pone de manifiesto que la energía sonora emitida por el foco, se distribuye sobre superficies cada vez mayores, según avanza el frente de onda. Esta distribución de la energía, hace que la intensidad acústica en los puntos de las superficies disminuya a medida que se alejan de la fuente. De esta forma, si la fuente es puntual, y el medio es isótropo y homogéneo, se cumple que la intensidad en un punto de una superficie esférica de radio r , con centro en el foco, será $I = W/4\pi r^2$, siendo W la potencia de emisión de la fuente.

Para la deducción de la ecuación de divergencia de onda se parte de la ecuación del nivel de presión sonora de una fuente unidimensional, la cual es:

$$L_{pS} = \left(\frac{P^2(r)}{P_{ref}^2} \right) \Rightarrow L_{pS} = 10 \cdot \log \left(\frac{P^2(r)}{4 \times 10^{-10} \text{ N/m}^2} \right) \quad [dB] \quad (5.11)$$

De la ecuación (2.8) y (2.9):

$$L_{pS} = 10 \cdot \log \left(\frac{W \cdot \rho c}{4\pi \cdot r^2 \cdot 4 \times 10^{-10}} \right) \quad [dB] \quad (5.12)$$

De las ecuaciones (5.2) y (5.12) se obtiene:

$$L_{p\theta} = 10 \cdot \log(Q) + L_{pS} \Rightarrow L_{p\theta} = 10 \cdot \log \left(\frac{W \cdot Q \cdot \rho c}{4\pi \cdot r^2 \cdot 4 \times 10^{-10}} \right) \quad [dB] \quad (5.13)$$

Con el uso de las ecuaciones (2.7) y (5.3):

$$L_{p\theta} = L_w + DI - 20 \cdot \log(r) - 11 + 10 \cdot \log \left(\frac{\rho c}{400} \right) \quad [dB] \quad (5.14)$$

Suponiendo que la fuente está situada muy cerca de un área plana en la cual puede haber árboles, arbustos, o algunos tipos de barrera (pared) se obtiene:

$$L_{p\theta} = L_w + DI - 20 \cdot \log(r) - 11 + 10 \cdot \log \left(\frac{\rho c}{400} \right) - A_e \quad [dB] \quad (5.15)$$

Donde:

$L_{p\theta}$ = Nivel de presión sonora para un receptor localizado en un ángulo θ a una distancia r (en metros) de la fuente [dB].

L_w = Nivel de potencia sonora en la fuente [dB].

DI = Índice de Directividad [dB].

r = Distancia de la fuente al receptor [m].

A_e = Atenuaciones causadas por el entorno [dB].

$11 \text{ dB} = 10 \log(4\pi)$.

ρc = Resistividad del aire [MKs rays].

5.1.3 RUIDO DEL TRÁFICO VEHICULAR.

La Figura 5.1 muestra la variación del nivel de sonido con ponderación A para densidades de tránsito bajas y altas. A bajas densidades de tránsito, los picos en el nivel de sonido corresponden a vehículos individuales que pasan por el receptor. A altas densidades de tránsito, los picos se juntan y aumenta el ruido promedio, de tal manera que únicamente se pueden identificar los picos de los vehículos más ruidosos. Por consiguiente, las fluctuaciones del ruido de tránsito de vehículos decrecen conforme aumenta la densidad de tránsito. Las fluctuaciones también decrecen, para una densidad de tránsito constante, conforme aumenta la distancia entre el receptor y la carretera, ya que a distancias mayores los picos para los vehículos individuales serán más anchos y suaves.

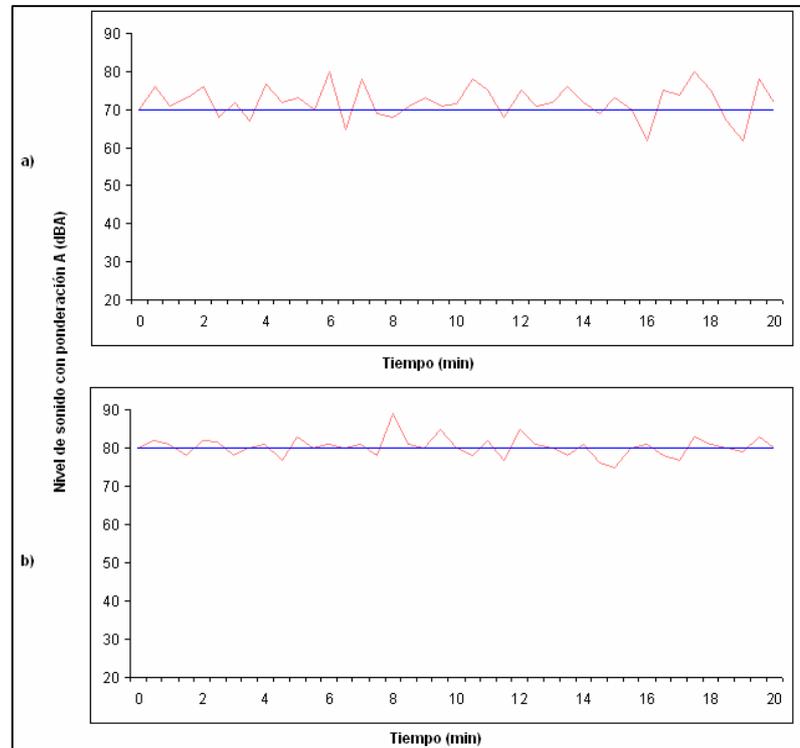


Fig. 5.1 Niveles de sonido con ponderación A medidos cerca de una carretera con a) baja densidad de tránsito b) alta densidad de tránsito.
(Fuente: Lawrence, Kinsler, 1995).

5.2 MODELOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO DE TRÁFICO RODADO EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD.

5.2.1 MODELO CORTN (Calculation Of Road Traffic Noise)

El procedimiento CRTN para la estimación del ruido del tráfico del camino fue desarrollado por el Departamento de Ambiente del Reino Unido en 1985. Este modelo es usado para el diseño de carreteras y para la determinación del aislamiento en zonas residenciales.

En Gran Bretaña, este modelo es el instrumento de medición mas usado para la determinación de impacto del ruido ambiental por el tráfico rodado. Las

autoridades reportan que para un rango entre 50 y 54.9 dBA hay una diferencia promedio entre los valores predichos y los medidos en +1,4 dBA y en situaciones con un rango entre 80 y 84,9 dBA el error es de 1,2 dBA.

En este modelo, el nivel de ruido se expresa en términos de L_{10} para cada hora o para dieciocho horas en ponderación A. El ruido del tráfico se toma como una fuente lineal con una altura de 0,5 metros sobre el nivel de la carretera y a 3.5 metros del borde de la calzada, considerando el carril más cercano al receptor. (ver la Figura 5.2).

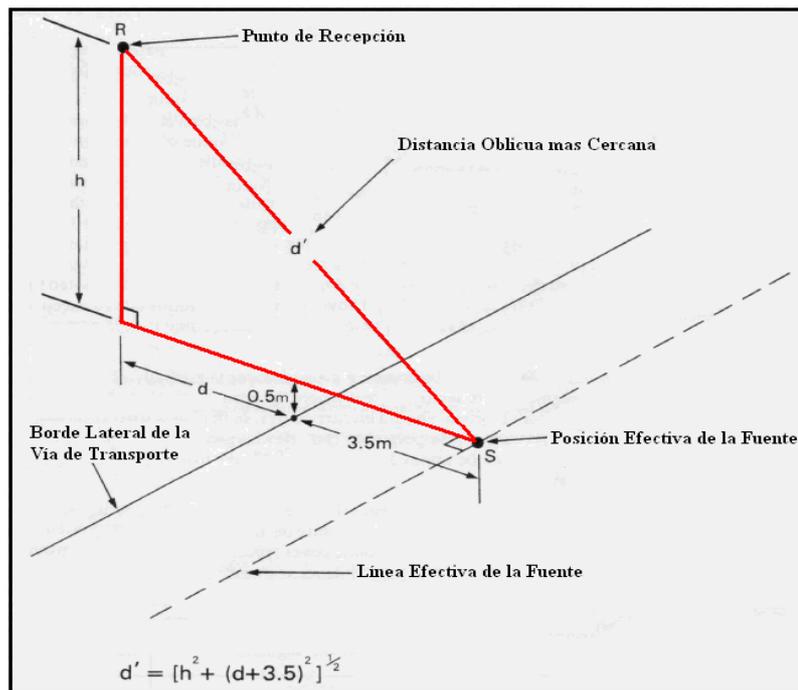


Fig. 5.2 Una ilustración de la distancia de inclinación más corta entre un punto de recepción y una línea efectiva de la fuente que representan una circulación (Fuente: CRTN, 2002)

El procedimiento de los pasos anteriores es mostrado diagramáticamente en la Figura 5.3.

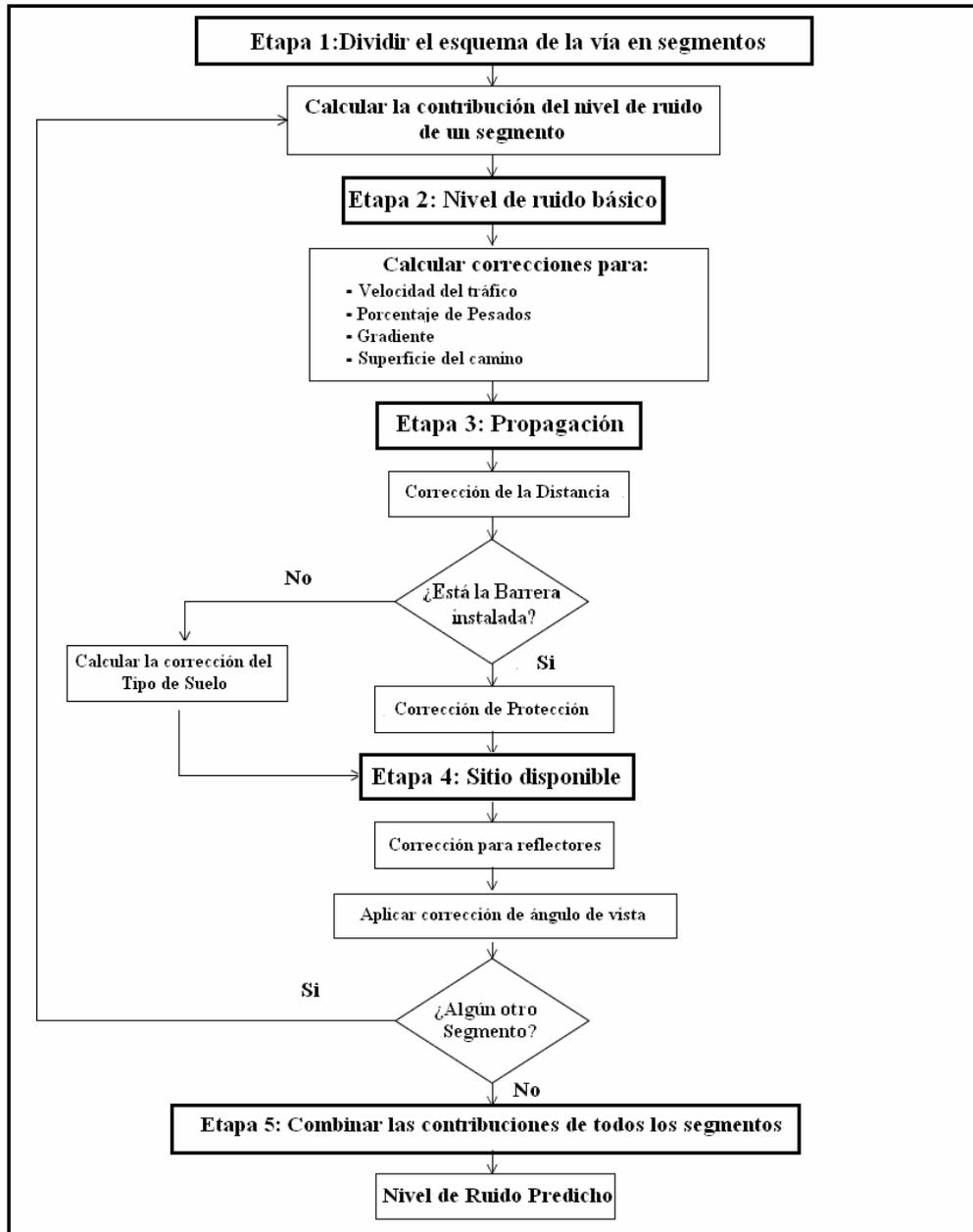


Fig. 5.3 Diagrama de Flujo del método CRTN
(Fuente: CRTN,2002)

5.2.1.1 División del esquema del camino en segmentos.

Si los niveles de ruido varían apreciablemente a lo largo de la vía, entonces el camino es dividido en un pequeño número de segmentos separados para que dentro de cualquier segmento la variación de nivel de ruido sea menor de 2 dBA. Cada segmento es tratado como una fuente separada de ruido, por consiguiente su contribución es determinada.

5.2.1.2 La predicción de niveles de ruido básicos.

El nivel de ruido básico es predicho por hora en a una distancia de 10 metros con respecto al lado izquierdo de la vía de transporte según la ecuación

$$L_{10} (\text{por hora}) = 42,2 + 10\log_{10}(q) \quad [\text{dBA}] \quad (5.16)$$

y el nivel del ruido básico en términos del flujo total de 18 horas es

$$L (18 - \text{hora}) = 29,1 + 10\log_{10}(Q) \quad [\text{dBA}] \quad (5.17)$$

Donde q y Q son el flujo por hora del tráfico (vehículos/hora) y el flujo de 18 horas (vehículos/hora), respectivamente. Aquí se supone que la velocidad básica $v = 75\text{km/h}$, el porcentaje de vehículos pesados $p = 0\%$ y la inclinación de la vía $G = 0\%$.

5.2.1.3 Corrección para la velocidad promedio del tráfico, el porcentaje de vehículos pesados y el gradiente de la vía.

La corrección para el porcentaje de vehículos pesados y la velocidad del tráfico es determinada utilizando las expresiones siguientes:

$$\Delta_{pv} = 33 \log_{10} \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{5p}{v} \right) - 68.8 \quad [\text{dBA}] \quad (5.18)$$

En esta expresión el porcentaje de vehículos pesados es dado por

$$p = \frac{100f}{q} = \frac{100F}{Q} \quad [\%] \quad (5.19)$$

Donde f y F son los flujos por hora y de 18 horas de vehículos pesados, respectivamente.

La ecuación (5.18) es aplicada a los niveles básicos por hora o de 18 horas. El valor de v a ser utilizado depende de si el camino es plano o tiene alguna inclinación. Para caminos planos la velocidad del tráfico a ser utilizada en el cálculo esta señalada en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Clasificación de caminos y la velocidad de tráfico recomendada

CLASIFICACIÓN DEL CAMINO	Velocidad del Tráfico
Caminos no sujeto a un limite de velocidad menor a 60 mph Caminos especiales (rural) excluyendo camino resbaladizo Caminos especiales (urbano) excluyendo camino resbaladizo Todos los planes de doble vía excluyendo camino resbaladizo Una vía de transporte, mayor a 9m de ancho Una vía de transporte, igual o menor a 9m de ancho (Caminos resbaladizos a ser estimados individualmente)	108 km/h 97 km/h 97 km/h 88 km/h 81 km/h
Caminos no sujeto a un limite de velocidad 50 mph Doble Vías de Transporte Una Vía de Transporte	80 km/h 70 km/h
Caminos sujeto a un limite de velocidad menor a 50mph y mayor a 30 mph Doble Vías de Transporte Una Vía de Transporte	60 km/h 50 km/h
Caminos sujeto a un limite de velocidad menor o igual a 30 mph Todas las Vías de Transporte	50 km/h

(Fuente: CRTN, 2002)

Si la velocidad del tráfico es estimada de la tabla 5.1 entonces la reducción de la velocidad del tráfico depende del porcentaje del gradiente y el porcentaje de vehículos pesados y es estimada a partir de la expresión:

$$\Delta v = [0.73 + (2.3 - \frac{1.15p}{100}) \frac{p}{100}] G \quad [\text{km/h}] \quad (5.20)$$

Donde G es el declive expresado como un porcentaje. En este caso, la velocidad del tráfico (ver Tabla 5.1) es reducido por el valor Δv calculado de la expresión (5.20). Una vez que la velocidad del tráfico es conocida, el ajuste para el ruido extra del tráfico en una vía inclinada es calculado según:

$$\Delta_G = 0.3G \quad [\text{dBA}] \quad (5.21)$$

5.2.1.4 Superficie del Camino.

Para aquellos caminos impermeables o caminos mojados y donde la velocidad de tráfico utilizada es $v \geq 75$ km/h, se aplica una corrección al nivel de ruido básico. La corrección para superficies de concreto es dada por:

$$\Delta_{ID} = 10 \log_{10}(90TD + 30) - 20 \quad [\text{dBA}] \quad (5.22)$$

Para superficies bituminosas:

$$\Delta_{ID} = 10 \log_{10}(20TD + 60) - 20 \quad [\text{dBA}] \quad (5.23)$$

Donde TD [mm] es la profundidad de la textura medida en el ensayo de arena-relieve.

Por otro lado para $v < 75$ km/h:

- Para superficies de camino bituminosas impermeable $\Delta_{TD} = -1$ dBA
- Para superficies de camino permeables $\Delta_{TD} = -3.5$ dBA.

5.2.1.5 Corrección de la distancia.

Para los puntos de recepción localizados a distancias $D \geq 4,0$ metros del borde del lado cercano de la vía de transporte, la corrección de la distancia es dada por

$$\Delta_d = -10 \log_{10}(d'/13.5) \quad [\text{dBA}] \quad (5.24)$$

Donde d' es la distancia más corta de inclinación entre la fuente efectiva y el receptor (ver figura 5.2).

5.2.1.6 La Propagación sin Obstrucción

Ahora es necesario tomar en cuenta si la línea de visión a la fuente al segmento del camino esta obstruida o libre. A veces, la línea de visión a la fuente puede estar parcialmente obstruida interviniendo obstáculos al grado de protección que pueden ser leves, para estos casos es necesario calcular los niveles del ruido que supone la propagación obstruida.

5.2.1.7 Corrección por la cubierta del suelo.

Si la superficie del suelo entre el borde del lado cercano a la vía de transporte de la carretera o del segmento de carretera y el punto de recepción es totalmente o parcialmente de una naturaleza absorbente, (por ejemplo, terrenos de césped, campos cultivados o plantaciones) una corrección adicional para la cubierta del suelo es requerida. Esta corrección es progresiva con la distancia y afecta especialmente los

puntos de la recepción cercanos al suelo. La corrección para la absorción del suelo es una función de la distancia horizontal desde el borde lateral cercano a la vía de transporte d hasta el receptor; de la altura media de la propagación $H = 0.5(h + 1)$, y de la proporción del suelo absorbente, I , es dado por:

$$\Delta_{GC} = 5.2I \log_{10}\left(\frac{6H - 1.5}{d + 3.5}\right) \text{ [dBA]} , \quad 0.75 \leq H < \frac{d + 5}{6} \quad (5.25)$$

$$\Delta_{GC} = 5.2I \log_{10}\left(\frac{3}{d + 3.5}\right) \text{ [dBA]} , \quad H < 0.75 \quad (5.26)$$

$$\Delta_{GC} = 0 \text{ [dBA]} \quad H \geq \frac{d + 5}{6} \quad (5.27)$$

Las Expresiones (5.25) - (5.27) son válida para $d \geq 4$ metros. En estas expresiones el valor de H es tomado de manera que la altura media esté por encima del suelo que interviene en la trayectoria de propagación entre el segmento de fuente lineal y el punto de la recepción. Se sugiere suponer que la intervención del suelo es principalmente plano y que el valor aproximado es $H = 0.5 (1 + h)$ metros.

Tabla 5.2 En la selección del valor de I

% de cubierta de suelo absorbente dentro del segmento	Valor de I usado en el Carácter 8
<10	0
10-39	0.25
40-59	0.5
60-89	0.75
≥ 90	1.0

(Fuente: CRTN, 2002)

5.2.1.8 Propagación Obstruida.

El efecto de protección por la intervención de obstrucciones tales como edificios, paredes, barreras anti-ruido etc. necesita ser tomadas en cuenta. El grado de protección depende de las posiciones relativas de la fuente efectiva S, el punto de recepción R y el punto B donde el borde de difracción a lo largo del tope de la obstrucción corta el plano vertical (ver la Figura 5.5), es decir normal a la superficie del camino, conteniendo ambos S y R. La región entre la obstrucción y el punto de recepción es dividida en la zona no afectada por la difracción y la zona de sombra por la línea prolongada SB.

El grado de protección es calculado con la diferencia de trayectoria δ , el trayecto del rayo difractado SBR y el trayecto directo de rayo SR

$$\delta = SB + BR - SR = SB + BR - d', \text{ m} \quad (5.28)$$

5.2.1.9 Tamaño del Segmento

El nivel de ruido en el punto de recepción del segmento en el esquema del camino depende del ángulo θ (grados) subtendida por las fronteras de dicho segmento en el punto de la recepción (ver la Figura 5.4). Este ángulo a menudo es referido como el ángulo de Visión y este ajuste es obtenido según la ecuación.

$$\Delta_s = 10 \log_{10} \left(\frac{\theta}{180} \right) \text{ [dBA]} \quad (5.29)$$

5.2.1.10 Combinando las Contribuciones de segmentos.

La fase final del proceso de cálculo, para llegar al nivel de ruido predicho, requiere la combinación de contribuciones de niveles del ruido de todos los segmentos de la fuente, que comprende el esquema total del camino. Para esquemas

de camino que consisten en más de un segmento el nivel predicho en el punto de recepción será calculado combinando las contribuciones, L_{10} , de N segmentos según la siguiente expresión:

$$L_{10}^{tot} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{10i}}{10}} \right) \quad [\text{dBA}] \quad (5.30)$$

Donde

$$L_{10} = L_{10,i} + \Delta_{pV,i} + \Delta_{G,i} + \Delta_{TD,i} + \Delta_{D,i} + \Delta_{GC,i} + A_i + \Delta_{S,i} \quad [\text{dBA}] \quad (5.31)$$

Siendo $L_{10,i}$ el nivel de ruido para ciertas condiciones, aclaradas e el apartado 5.2.1.2, $\Delta_{pV,i}$ es la corrección por el porcentaje de vehículos pesados, $\Delta_{G,i}$ es la corrección por el gradiente de la carretera, $\Delta_{TD,i}$ es la corrección por el tipo de superpie del suelo, $\Delta_{D,i}$ es corrección por la distancia del receptor, $\Delta_{GC,i}$ corrección por el tipo de suelo en que está ubicado el receptor, A_i es el ajuste para una propagación del sonido con obstáculos y por ultimo $\Delta_{S,i}$ es el ajuste por el tamaño de segmento.

5.2.1.11 Múltiples caminos incluyendo empalmes.

Los cálculos de niveles del ruido de múltiples caminos son logrados combinando las contribuciones de cada longitud individual del camino que utiliza la velocidad promedio apropiada, ignorando algún cambio de la velocidad en el empalme.

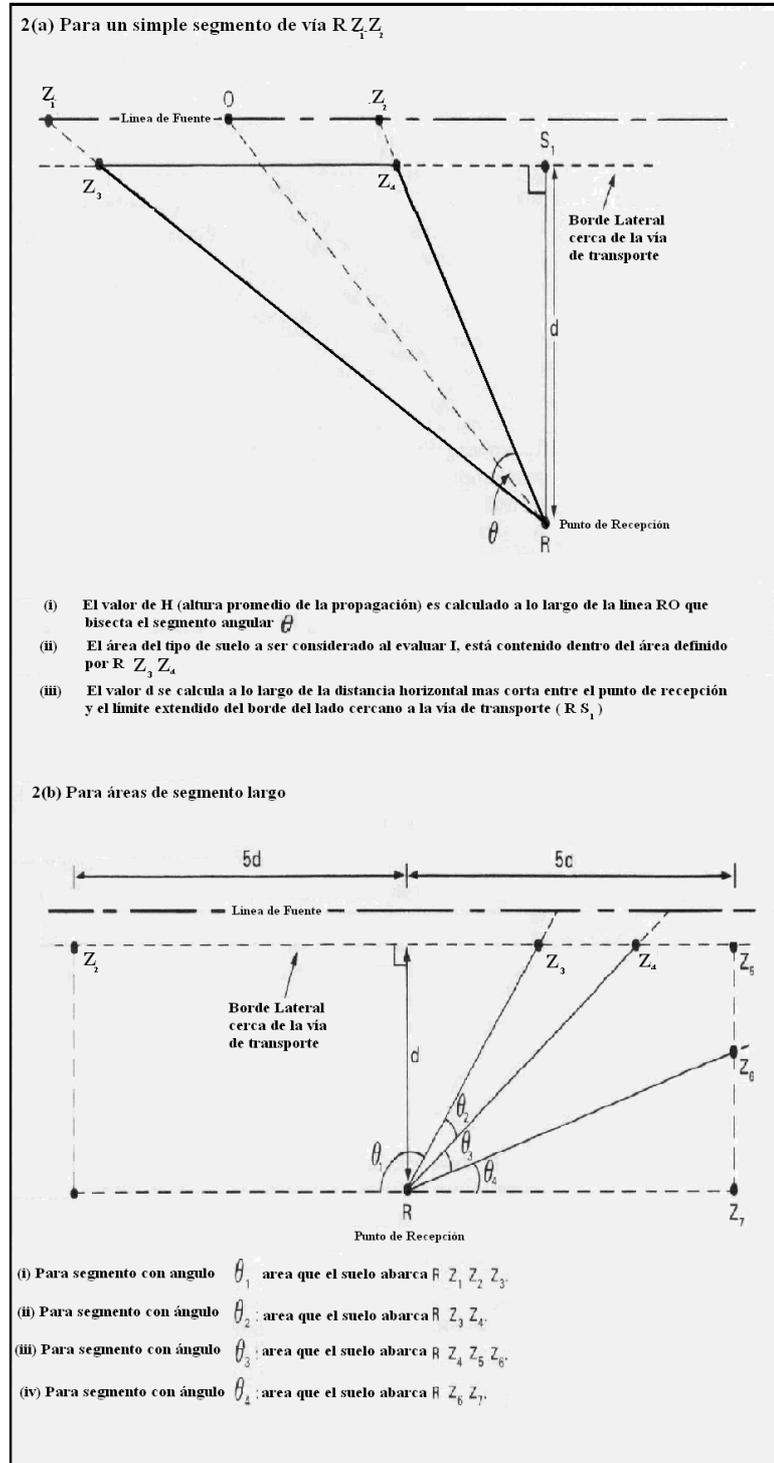


Fig. 5.4 Relación entre θ y el tramo de carretera.
(Fuente: CRTN,2002).

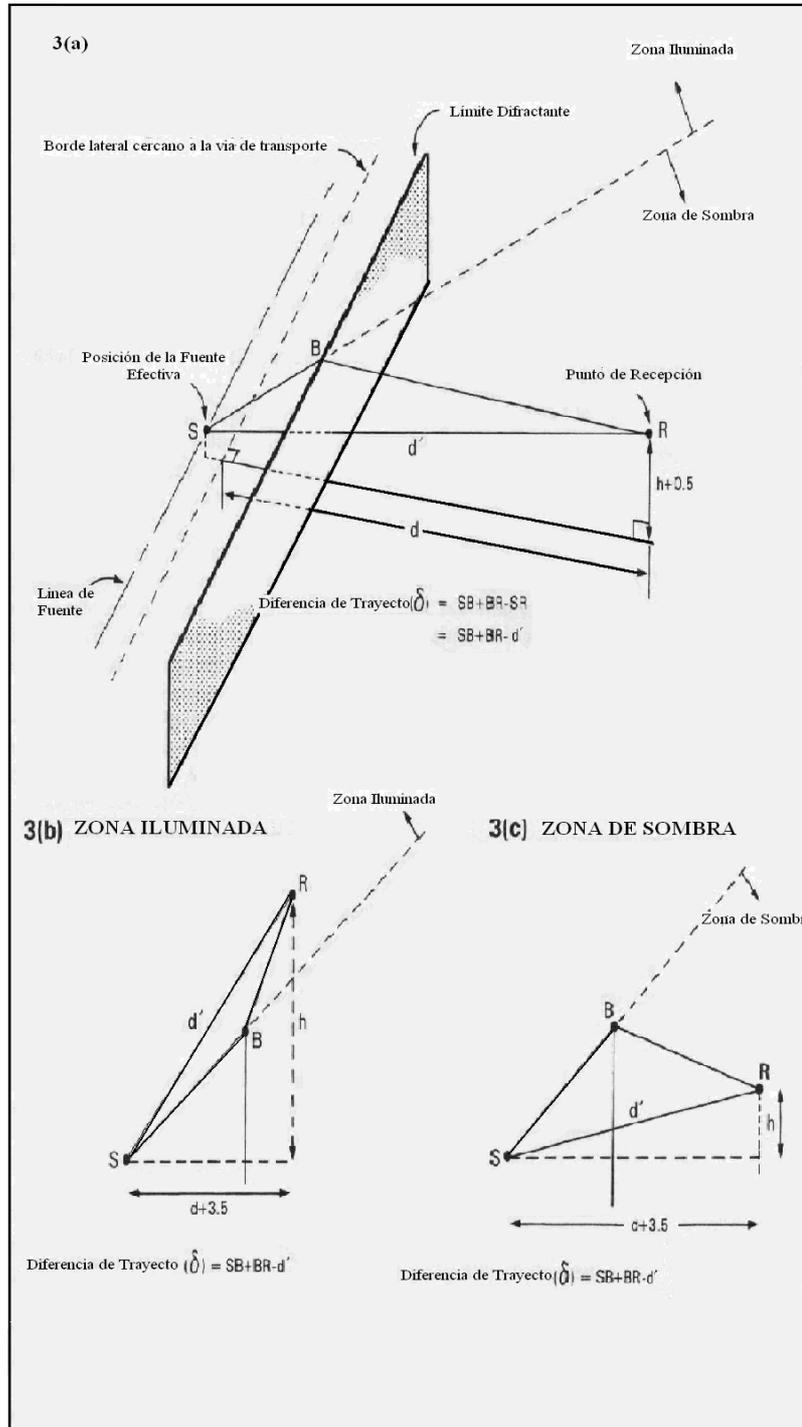


Fig. 5.5 Variables de importancia en la propagación obstruida, modelo CORTN. (Fuente: CRTN, 2002)

5.2.2 MODELO FHWA.

La *Federal Highway Administration* (FHWA) ha desarrollado un modelo de previsión del ruido del tráfico de autopista. Este modelo combina las características de otros métodos anteriores, como el método del Informe 117 del *Transportation Research Board's National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (revisado por el Informe NCHRP 144), la guía de diseño revisada en el Informe NCHRP 174 y el programa USDOT del Centro de Sistemas de Transporte.

El modelo FHWA predice el nivel sonoro equivalente de una hora para un flujo de vehículos circulando a lo largo de una línea infinitamente larga. Los algoritmos se basan en la determinación de una serie de correcciones con respecto a un nivel sonoro de referencia. Este nivel de referencia se sitúa a una distancia de 15,2 m (50 ft) de un vehículo aislado que circula a lo largo de una carretera recta infinitamente larga, sin apantallamiento de la fuente. A continuación se realizan correcciones en función del flujo total de tráfico, la distancia real del punto receptor a la carretera, la extensión del segmento de carretera que se está considerando, el tipo de cubierta del suelo entre la fuente y el receptor, cualquier pantalla en la fuente y, si es aplicable, la pendiente de la carretera.

En este modelo el parque de vehículos se divide en tres tipos: (1) automóviles (vehículos de dos ejes y cuatro ruedas), (2) camiones medios (vehículos de dos ejes y seis ruedas) y (3) camiones pesados (tres o más ejes). Para usar el modelo FHWA se necesitan: (1) las intensidades de circulación de cada tipo de vehículo por hora (para la hora que se está considerando), (2) la velocidad media de circulación de cada tipo de vehículo y (3) la(s) distancia(s) entre la carretera y el(los) punto(s) receptor(es).

5.2.2.1 Niveles medios de emisión de referencia (media energética).

El valor inicial que se calcular para cada tipo de vehículo (i) es el *nivel medio de emisión de referencia* $[(L_o)_E]_i$. Este nivel es una función que depende de la velocidad media de un determinado grupo de vehículos a una distancia de referencia de 15,2 m (50 ft) para un tipo de vehículo determinado. Los niveles nacionales medios de emisión de referencia son:

- Automóviles $(L_o)_E = 38,1 \log(v) - 2,4$ [dBA] (5.32)

- Camiones medios $(L_o)_E = 33,9 \log(v) + 16,4$ [dBA] (5.33)

- Camiones pesados $(L_o)_E = 24,6 \log(v) + 38,5$ [dBA] (5.34)

Donde v es la velocidad media de circulación en km/h.

5.2.2.2 Corrección por intensidad de tráfico.

Con el fin de tener en cuenta la intensidad total horaria del tipo de vehículo y el nivel equivalente en el período de tiempo de una hora, se realiza un ajuste ($\Delta_{\text{tráfico}}$) en el nivel medio de emisión de referencia:

$$(\Delta_{\text{tráfico}})_i = 10 \cdot \log\left(\frac{N_i d_o}{v_i}\right) - 25$$
 [dBA] (5.35)

Donde N_i = intensidad horaria de vehículos de tipo i , vehículos/hora

d_o = distancia de referencia de 15,2 m

v_i = velocidad del tipo de vehículo i , km/h

En el sistema inglés de unidades, la distancia de referencia es 50 ft, la velocidad esta en mph y el término constante es -32,2 dB(A).

5.2.2.3 Ajuste por distancia.

Por lo general, las previsiones del ruido del tráfico se realizan en puntos en los que suele existir algún tipo de actividad. Por ello es necesario un ajuste de los niveles medios de emisión de referencia, estimados para una distancia de referencia de 15,2 m.

Al calcular el ajuste, se considera el tipo de cubierta del suelo. En espacios abiertos o sobre una superficie dura como la de un sitio pavimentado, el nivel sonoro equivalente de 1 hora para una serie de fuentes puntuales que se mueven a lo largo de una línea decrece 3 dBA por cada duplicación de la distancia desde la línea de tráfico.

La *Federal Highway Administration* ha utilizado estos dos valores. 3 y 4,5 dBA, para desarrollar un parámetro de tipo de suelo denominado *factor alfa* (α). Para suelos duros, el factor alfa tiene un valor de 0,01; para suelos blandos es de 0,5. Una expresión general de la corrección por distancia es:

$$\Delta_{\text{distancia}} = 10 \cdot (1 + \alpha) \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad [\text{dBA}] \quad (5.36)$$

Donde d es la distancia perpendicular del receptor hasta el centro del carril. Si una agencia estatal de transporte tiene datos para justificar otros valores de atenuación por el efecto suelo, pueden calcularse otros factores alfa a partir de la Ecuación (5.36). Los factores alfa se utilizan en los programas de ordenador de la FHWA para especificar los factores de propagación. La Tabla 5.3 aporta directrices sobre cuándo utilizar los valores de propagación de 3,0 y 4,5 dB.

Tabla 5.3 Directrices para la elección de las tasa de propagación del sonido.

Situación	Tasa de propagación dBA
1. Todas las situaciones en que la fuente o el receptor están localizados 3 m por encima del suelo, o siempre que, la línea de visión* esté a más de 3 m por encima del suelo.	3 ($\alpha = 0$)
2. Todas las situaciones que implican propagación sobre la parte superior de una barrera de 3 m o más altura.	3 ($\alpha = 0$)
3. Donde la altura de la línea de visión sea inferior a 3 m y además:	
a) Hay una visión clara (no obstruida) de la autopista, el suelo es duro y no hay estructuras intervinientes.	3 ($\alpha = 0$)
b) La vista de la carretera está interrumpida por edificios aislados, grupos de arbustos o árboles esparcidos, o el suelo es blando o está cubierto de vegetación	4,5 ($\alpha = 1/2$)

(Cyril Harris, "Handbook of Noise Control", 1979)

5.2.2.4 Corrección por segmento finito de carretera.

La metodología considerada anteriormente supone que la carretera es infinitamente larga. En la práctica, para los análisis, las autopistas se dividen en una serie de segmentos rectos de longitud finita. Los niveles sonoros de una hora para todos los segmentos se calculan por separado y se combinan al final del cálculo. Hay varias situaciones en que una carretera debe subdividirse para su análisis:

1. Cuando cambia la intensidad de tráfico o la velocidad (entre la carretera principal y una rampa de entrada o salida).
2. Cuando el tipo de cubierta del suelo cambia significativamente.

3. Cuando se ha modelado una carretera con curvas mediante segmentos rectos.
4. Cuando cambia la pendiente de la carretera.

La corrección por segmento finito de carretera depende del tipo de suelo y se define como:

$$\Delta_{\text{segmento}} = 10 \cdot \log \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{\pi} \cdot (\cos \varphi)^\alpha d\theta \quad (5.37)$$

Donde θ_1 y θ_2 son ángulos en radianes con vértice en el receptor; θ_1 es el ángulo en el extremo de la izquierda y θ_2 es el ángulo en el extremo de la derecha (ver figura 5.6). Si los ángulos se miden en la dirección contraria a las agujas del reloj desde la línea normal, se les asigna valores negativos; si se miden en dirección a las agujas del reloj, valores positivos.

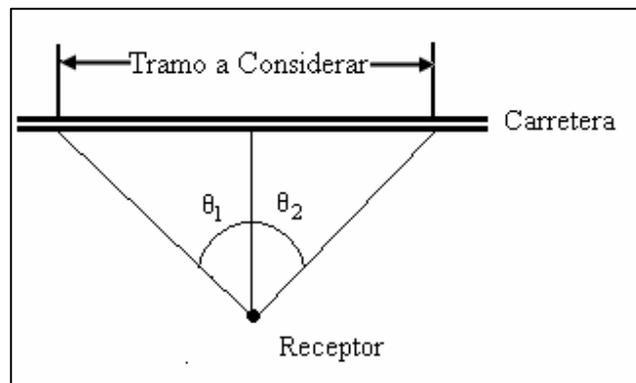


Fig. 5.6 Ángulos para determinar el tramo de carretera a estudiar.
(Fuente: elaboración Propia)

Para un suelo duro, como el pavimento, la ecuación (5.38) se reduce a:

$$\Delta_{\text{segmento}} = 10 \cdot \log \left[\frac{(\theta_2 - \theta_1)}{\pi} \right] \quad (5.38)$$

Para un suelo blando, la ecuación (5.38) debe resolverse mediante integración numérica. Para el caso general de un suelo blando y una carretera «infinitamente»

larga (donde θ_1 es $-\pi/2$ radianes y θ_2 es $\pi/2$ radianes), este ajuste tiene un valor de -1,2 dBA.

5.2.2.5 Corrección por rampa

La Federal Highway Administration recomienda que los niveles equivalentes de una hora para camiones pesados se aumenten en función de la pendiente de la carretera de la siguiente manera:

1. 0 a 2 por 100: $\Delta_{gr} = 0$ dBA
2. 3 a 4 por 100: $\Delta_{gr} = +2$ dBA
3. 5 a 6 por 100: $\Delta_{gr} = +3$ dBA
4. Más del 7 por 100: $\Delta_{gr} = +5$ dBA

5.2.2.6 Apantallamiento mediante edificios.

La reducción del nivel sonoro debido a la presencia de una o más hileras de casas entre el punto de estudio y una carretera (Δ_{ap}) puede estimarse mediante la siguiente regla empírica: Si entre el 40 % y el 65 % de la longitud de la primera fila está ocupado por edificios, se restan 3 dBA del nivel sonoro medio. Si entre el 65 % y el 90 % de la longitud de la primera fila está ocupado por edificios, se restan 5 dBA del nivel sonoro medio; si el porcentaje supera el 90 % por 100 %, los edificios pueden modelarse como barreras acústicas. Cada fila sucesiva de edificios añade 1.5 dBA a este ajuste, hasta una reducción máxima de 10 dBA. Cualquier influencia de la atenuación del suelo termina en la primera fila.

5.2.2.7 Apantallamiento mediante un área arbolada.

Un segundo tipo de apantallamiento (también denominado Δ_{ap}) puede originarse por una zona de árboles situada entre la carretera y el receptor, lo suficientemente densa como para no permitir una visión directa de la carretera. Para un cinturón de 30 m (100 ft) de anchura, la *Federal Highway Administration* recomienda una corrección de -5 dB(A); para 30 m (100 ft) adicionales en la anchura del cinturón, otra corrección adicional de -5 dBA, hasta un total de -10 dBA. Cuando se utiliza este ajuste, las correcciones correspondientes a distancia y segmento finito deben basarse en un factor de propagación de 3 dBA por cada duplicación de la distancia desde la línea fuente.

5.2.2.8 Atenuación de barreras

En el modelo de la *Federal Highway Administration* (FHWA) la *atenuación de barrera* ($A_{barrera}$) se calcula mediante el uso separado de un modelo incoherente de la fuente lineal para cada tipo de vehículo. Se calculan las atenuaciones para una serie de vías de propagación, definidas mediante los ángulos sobre la línea perpendicular entre la fuente y el receptor, y los resultados se combinan mediante integración numérica. Habitualmente, este cálculo se realiza mediante un programa de ordenador como el FHWA STAMINA. Para situaciones relativamente sencillas, se utiliza un gráfico, como se comenta en la sección «Gráfico de atenuación de barreras para suelos blandos».

Para los cálculos que analizan diferentes longitudes de la vía de propagación, se asumen las siguientes alturas de la fuente por encima de la carretera: (1) automóviles, 0 m (0 ft); (2) camiones medios, 0,7 m (2 ft), y (3) camiones pesados,

2,44 m (8 ft); la altura que suele utilizarse para los receptores en exteriores es 1,5 m (5 ft).

5.2.2.9 Niveles sonoros totales.

El nivel equivalente total de una hora se calcula sumando aritméticamente al valor de referencia las distintas correcciones:

$$L_{eq} = [(L_O)_E]_i + (\Delta_{tráfico})_i + (\Delta_{distancia})_i + (\Delta_{gr})_i + (\Delta_{ap})_i + (\Delta_{Barreras}) \quad [dBA] \quad (5.39)$$

Los niveles de i correspondientes a automóviles, camiones medios y camiones pesados pueden combinarse para obtener el nivel total. Donde $(L_O)_E$ es el Nivel medio de emisión, $(\Delta_{tráfico})$ es la Corrección por intensidad de tráfico, $(\Delta_{distancia})$ es la corrección por distancia, (Δ_{gr}) es la corrección por tipo de suelo, (Δ_{ap}) es la atenuación producido por el apantallamiento de edificios y por ultimo $(\Delta_{Barreras})$ es la atenuación producida por la colocación de una barrera acústica.

5.2.2.10 Pérdida por inserción

La *pérdida por inserción* IL de una barrera se define como:

$$IL = L_{antes} - L_{despues} \quad dBA \quad (5.40)$$

Donde L_{antes} es el nivel sonoro equivalente sin la barrera y $L_{despues}$ es el mismo descriptor una vez colocada la barrera. Para suelos blandos, se utiliza un factor alfa [véase Ecuación (5.36)] para calcular $L_{despues}$ el segmento de carretera apantallado respecto del receptor mediante la barrera. Así, una barrera no aportará pérdida por

inserción hasta que su atenuación supere la pérdida de atenuación del suelo debida a la colocación de la barrera.

5.2.3 MODELO HARMONOISE.

El Directorio Europeo para la evaluación y la gerencia del ruido ambiental, es el encargado de la elaboración de mapas estratégicos de ruido y planes de acción para la regulación de los niveles de ruido en las principales carreteras, aeropuertos y vías férreas en el ámbito europeo. Dicho directorio en el año 2002 observó la carencia de un método armonizado y de confianza para la predicción del ruido, además notó la necesidad de un nuevo método que se podría adoptar a través de los Estados miembros. El proyecto Harmonoise (**H**armonised, **A**ccurate and **R**eliable **M**ethods for the European Directive **O**n the Assessment and Management of Environmental **N**OISE) fue diseñado para satisfacer esta necesidad. El proyecto fue financiado por la Comisión Europea, la sociedad europea de la tecnología y la información.

5.2.3.1 La modelación de la fuente.

El modelo de la fuente trae consigo la descripción del poder sonoro de varias categorías de vehículo en términos de la velocidad. Las fuentes en los vehículos son simplificadas en dos fuentes puntuales: una baja y la fuente más alta. La fuente más baja es principalmente debido al ruido neumático/camino y la fuente más alta es principalmente ruido de propulsión. La altura de la fuente del ruido de la propulsión depende de la categoría de vehículo. De este modo dichas fuentes a diferentes alturas en una carretera con alta densidad vehicular, forman una fuente lineal incoherente.

5.2.3.2 Niveles de emisión de referencia.

Los vehículos se dividen como se muestra tabla 5.6. Hay tres categorías principales que corresponden a los vehículos ligeros (categoría 1), a los vehículos

medianos (categoría 2) y pesados (categoría 3). Todos lo que pertenecen a las categoría uno y dos tienen dos ejes excepto en el caso de combinaciones vehículo/trailer. Los vehículos de la categoría dos tienen generalmente 6 o más ruedas (4 en el eje trasero). La categoría tres contiene los vehículos más pesados que tienen más de dos ejes.

A pesar de que los vehículos eléctricos se encuentran en la tabla (5.4), los niveles de ruido en este caso no han sido estudiados con profundidad en este modelo debido a que las características del ruido de la propulsión serán perceptiblemente diferentes en comparación a los vehículos provisionados por combustible diesel o gasolina. En el anexo (A.1) se observan imágenes referentes a cada tipo de vehículo.

Tabla 5.4 Clasificación de los vehículos según el modelo Harmonoise.

Categorías principales	No.	Sub-Categorías	Observaciones
Vehículos Ligeros	1a.	Carros de pasajeros.	2 ejes, máximo 4 ruedas
	1b.	Furgoneta, Camionetas "Pick up", Carros con remolque.	2 - 4 ejes, máximo 2 ruedas por eje.
	1c.	Vehículos híbridos.	
Vehículos Medianos	2a.	Autobuses.	2 ejes, 6 ruedas.
	2b.	Camiones ligeros.	2 ejes, 6 ruedas.
	2c.	Camiones de peso mediano	2 ejes.
	2d.	Trolebús	2 ejes.
Vehículos Pesados	3a.	Autobuses.	3 - 4 ejes.
	3b.	Camiones pesado	3 ejes.
	3c.	Camiones pesado	4 -5 ejes.
	3d.	Camiones pesados	≥ 6 ejes.
	3e.	Trolebús	3 - 4 ejes.

(Fuente: HAR11TR-030108-VTI04, Harmonoise Project, 2.003)

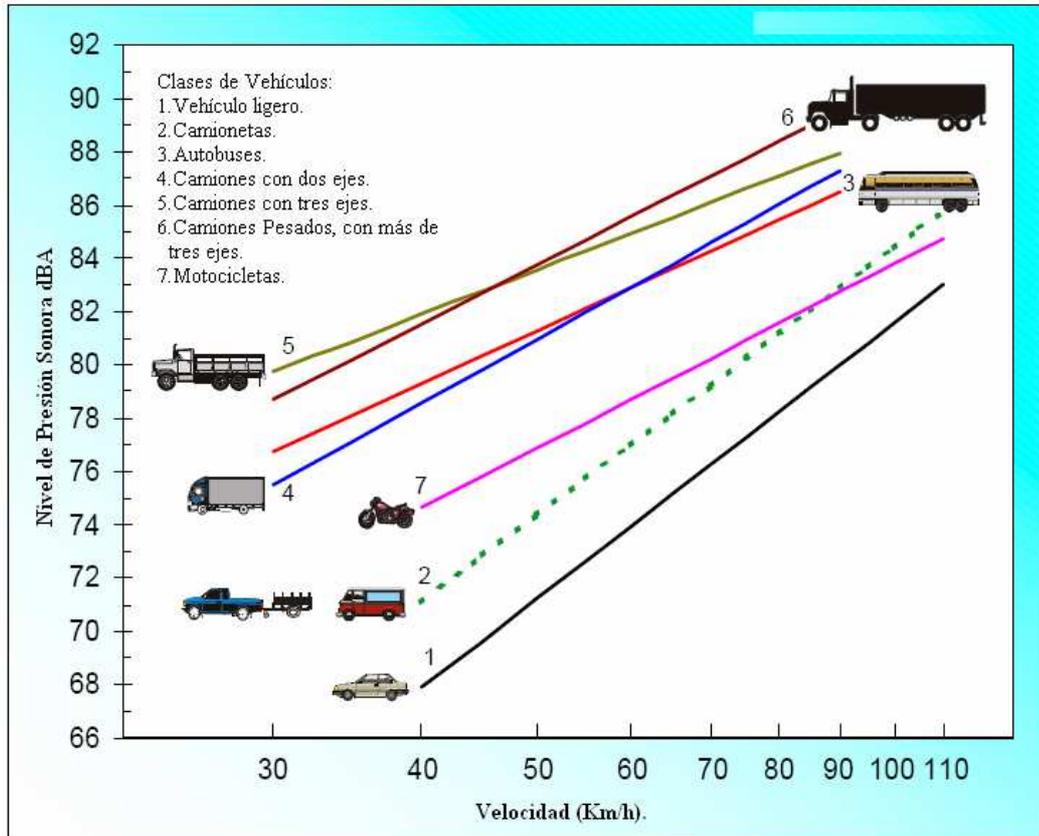


Fig. 5.7 Nivel de presión sonora en función de la velocidad para cada clase de vehículo.
 (Fuente: HAR11TR-030108-VTI04, Harmonoise Project, 2.003).

Como fue expuesto anteriormente en este modelo se asume principalmente dos alturas para las fuentes de ruido en los vehículos. Una a 0.01 m sobre la superficie de la carretera (ruido por rodadura) y el otro está a 0.3 m para los vehículos ligeros o 0.75 m para los vehículos pesados (ruido por propulsión). Con datos tomados en diferentes carreteras de los países europeos se obtuvieron las siguientes ecuaciones (5.41) y (5.42) para cuantificar el ruido de rodadura y el ruido de propulsión respectivamente.

$$L_{WR,m} = a_r(f) + b_r(f) \cdot \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (5.41)$$

$$L_{WP,m} = a_p(f) + b_p(f) \cdot \log\left(\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (5.42)$$

$$L_{W,m} = L_{WP,m} \oplus L_{WR,m} \quad [\text{dB}] \quad (5.43)$$

Donde

$L_{WR,m}$ = Nivel de presión sonora debido al contacto del neumático con el camino, para la categoría m .

$L_{WP,m}$ = Nivel de presión sonora debido al motor, escape y mecanismos internos, para la categoría m .

$L_{W,m}$ = Nivel de presión sonora para un solo vehículo, para la categoría m .

v = Velocidad del vehículo.

v_{ref} = Es la velocidad de referencia del modelo (70 Km/h).

$a_r(f)$, $b_r(f)$ = Coeficientes por frecuencias para el ruido por rodadura, los cuales se muestran el anexo(A.2).

$a_p(f)$, $b_p(f)$ = Coeficientes por frecuencias para el ruido por propulsión, los cuales se muestran el anexo(A.3).

Luego usando la ecuación (5.44) se obtiene el nivel de presión sonora total por clase de vehículo, y finalmente el nivel de presión sonora de una fuente lineal de una de longitud se determina mediante la ecuación (5.45).

$$L_{WT,m} = L_{W,m} + 10 \cdot \log\left(\frac{Q_m \cdot v_0}{1000 \cdot Q_0 \cdot v_m}\right) \quad [\text{dB}] \quad (5.44)$$

$$L_{WT} = 10 \cdot \log \sum_m 10^{0.1 \cdot L_{WT,m}} \quad [\text{dB}] \quad (5.45)$$

Donde Q_m = Flujo de vehículos para la categoría m (h^{-1}).

Q_0 = Flujo de referencia (1 h^{-1}).

v_m = Velocidad promedio de cada categoría de vehículo.(km/h)

v_0 = Velocidad de referencia (1 km/h).

L_{WT} = Nivel de presión sonora total generado por unidad de longitud.

En la Figura 5.8 se muestra el ruido de rodadura y de propulsión en las categorías uno y tres a 100 km/h.

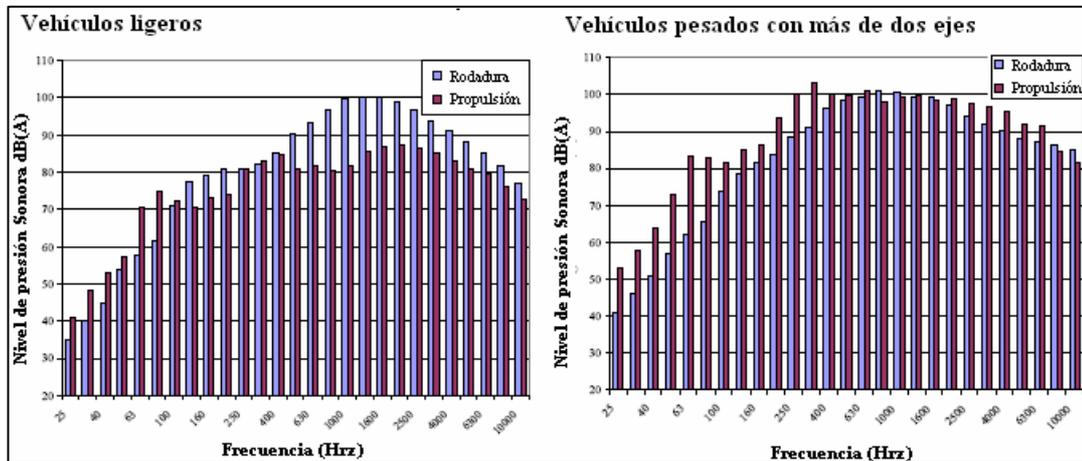


Fig. 5.8 Ruido de Rodadura y propulsión a 100 Km/h.
(Fuente: Technical Report PPR034 UG473, Harmonoise Project, 2.005)

5.2.3.3 Influencia de la superficie del Camino.

El anexo (A.4) muestra la influencia del tipo de pavimento en el nivel de presión sonora, por 1/3 de octava para cada categoría de vehículo, según este modelo.

5.2.3.4 Influencia de la directividad.

Como se muestra en la figura 5.9, la contribución de la directividad en el nivel de ruido depende de los ángulos, así como, de la frecuencia y según el modelo Harmonoise se calcula mediante la ecuación:

$$\Delta L(f, \varphi, \psi) = \Delta L_H(f, \varphi) + \Delta L_V(f, \psi) \quad [\text{dB}] \quad (5.46)$$

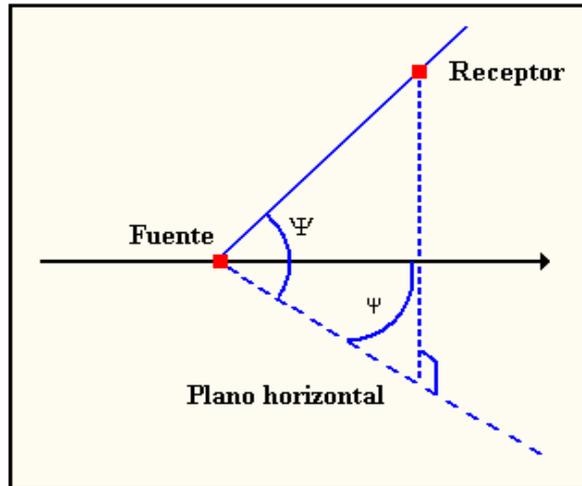


Fig. 5.9 Geometría propuesta para el modelo Harmonoise, enfoque inicial.
(Fuente: Proyecto Harmonoise 2.005)

Donde: ΔL = Directividad total.

ΔL_H = Directividad horizontal.

ΔL_V = Directividad vertical.

En el caso en que la diferencia de altura entre la fuente y el receptor sea pequeña puede considerarse la directividad vertical como despreciable. Por otra parte el valor de la directividad horizontal se calcula mediante las ecuaciones (5.47) y (5.48), para determinadas bandas de frecuencia.

$$\Delta L_H(\varphi) = 0; \quad f \leq 1250 \text{ Hz}, \quad f \geq 8000 \text{ Hz} \quad (5.47)$$

$$\Delta L_H(\varphi) = \left(-1,5 + 2,5 \left| \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \right| \right) \cdot \sqrt{\cos \psi}; \quad 1600 \text{ Hz} \leq f \leq 6300 \text{ Hz} \quad (5.48)$$

5.2.3.5 Influencia de la divergencia geométrica.

En el modelo harmonoise se realiza una segmentación de la carretera mediante un ángulo máximo de visión como se muestra en la figura 5.10, donde R es longitud del receptor al punto central del segmento y l_{segmento} es la longitud del segmento. Para propósitos generales un valor razonable para este ángulo es de 5° .

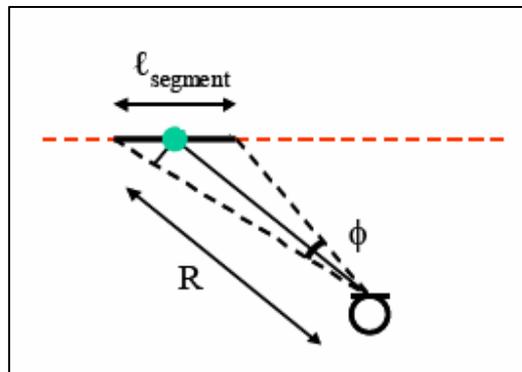


Fig. 5.10 Segmentación de la carretera según el modelo Harmonoise.
(Fuente: Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20, Harmonoise Project, 2.003).

Según este modelo, al segmentar la fuente se puede usar la teoría de campo lejano, la cual indica que si la longitud de la fuente lineal es mucho menor que la distancia entre la dicha fuente y el receptor, se puede considerar que la divergencia geométrica de cada segmento lineal se aproxima bastante a la divergencia de una fuente puntual (ecuación (5.49)).

$$A_{div} = 10 \cdot \log \left[4\pi \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (5.49)$$

Donde: r = Distancia desde la fuente al receptor (m).

r_0 = Distancia de referencia (1 m).

5.2.3.6 Atenuaciones en el modelo Harmonoise.

Para el cálculo de la absorción atmosférica se utiliza el método expuesto por la norma ISO-9613-1. En el caso de la atenuación del suelo se usa el método de Delany y Bazley mostrado entre las ecuaciones (2.24) y (2.26). En el caso de barreras acústicas el cálculo de atenuación se realiza considerando solo el fenómeno de difracción, mediante las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$A_b = 0 \quad [\text{dB}] \quad \text{Para } N_f \leq -0.25 \quad (5.50)$$

$$A_b = 6 - 12\sqrt{-N_f} \quad [\text{dB}] \quad \text{Para } -0.25 \leq N_f \leq 0 \quad (5.51)$$

$$A_b = 6 + 12\sqrt{N_f} \quad [\text{dB}] \quad \text{Para } 0 \leq N_f \leq 0.25 \quad (5.52)$$

$$A_b = 8 + 8\sqrt{N_f} \quad [\text{dB}] \quad \text{Para } 0.25 \leq N_f \leq 1 \quad (5.53)$$

$$A_b = 16 + 10 \cdot \log N_f \quad [\text{dB}] \quad \text{Para } N_f \geq 1 \quad (5.54)$$

Donde N_f es el número de Fresnel, el cual en este modelo se calcula mediante la ecuación (5.55). R_s es la distancia entre la fuente y el tope de la barrera, R_r es la distancia entre el receptor y el tope de la barrera y R la menor distancia entre fuente y el receptor atravesando la barrera.

$$N_f = \text{sgn}(h_{\text{eff}}) \frac{2 \cdot (R_s + R_r - R)}{\lambda} \quad (5.55)$$

5.2.4 MODELO HOLANDÉS, SCM (Standard Calculation Method).

Este modelo comenzó a usarse en Holanda en abril de 2002, con dos objetivos principales, reducir el costo de mediciones de campo y examinar situaciones futuras en ruido generado por el tránsito en las principales carreteras de este país. Al igual

que el modelo Harmonoise, el SCM genera resultados por 1/3 de octava, pero para ocho frecuencias solamente, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, y 8000 Hz.

De la misma forma que modelos los anteriores, el SCM asume que el tráfico vehicular en una vía de alta densidad es una fuente lineal con una altura aproximada de 0.8 metros, considerando que para un tramo de carretera infinito es suficiente tomar en cuenta 127 grados del ángulo de visión del receptor como se muestra en la figura 5.11.

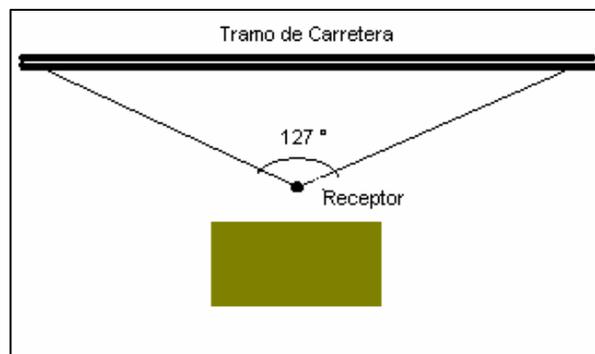


Fig. 5.11 Ángulo que define el tramo de carretera a considerar, Modelo Holandés.
(Fuente: Dutch calculation method, 2002).

Con respecto a los niveles de emisión, estos se calculan mediante la ecuación (5.56), donde v_m es la velocidad por categoría de vehículos, considerándose vehículos ligeros, camionetas, camiones pesados y motocicletas, α y β son valores empíricos mostrados en las tablas 5.5 y 5.6, Δe son las atenuaciones producidas por el suelo, los árboles, pantallas acústicas, entre otros y son calculadas usando las ecuaciones del modelo Harmonoise. Por último los subíndices “m” e “i” significan categoría de vehículos y frecuencia respectivamente.

$$L_{E_{i,m}} = \alpha_{i,m} + \beta_{i,m} \cdot \log(v_m) + \Delta e \quad [\text{dB}] \quad (5.56)$$

Tabla 5.5 Número de emisión α en función de la frecuencia y la categoría de vehículo.

	Vehículos ligeros	Camiones ligeros	Camiones Pesados	Motocicletas
63	75,5	80,3	66,0	26,7
125	37,7	60,5	70,4	35,4
250	37,4	92,5	92,9	41,8
500	44,3	51,4	62,0	44,4
1000	50,1	62,2	68,1	40,9
2000	56,2	69,8	74,1	41,2
4000	48,7	64,0	72,7	37,8
5000	58,7	89,1	92,7	31,6

(Fuente: Dutch calculation method, 2002)

Tabla 5.6 Número de emisión β en función de la frecuencia y la categoría de vehículo.

	Vehículos ligeros	Camiones ligeros	Camiones Pesados	Motocicletas
63	-0,5	0,2	9,8	28,9
125	24,6	16,6	11,4	28,9
250	27,6	2,5	2,6	28,9
500	26,1	26,6	23,2	28,9
1000	26,8	22,3	20,8	28,9
2000	22,5	16,6	15,0	28,9
4000	22,2	16,2	12,4	28,9
5000	11,7	1,9	3,1	28,9

(Fuente: Dutch calculation method, 2002)

Para ajustar el nivel de emisión al flujo de tráfico se usa la ecuación (5.57), donde Q_m es el flujo de vehículo para cada categoría de vehículos por hora. Luego se usa la ecuación (5.58) para determinar el sonido total de la carretera, siendo el subíndice n el número de canales y l la longitud del tramo de carretera.

$$L_{EFi,m,n} = L_{Ei,m} + 10 \cdot \log\left(\frac{Q_m}{v_m}\right) + 10 \cdot \log(l) \quad [\text{dB}] \quad (5.57)$$

$$L_{Ti,m,n} = \sum_n \sum_m \sum_i L_{EFi,m,n} \quad [\text{dB}] \quad (5.58)$$

5.3 MODELO SIMPLIFICADO DE GENERACIÓN DE RUIDO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN VÍAS DE ALTA DENSIDAD.

Considerando los estándares de predicción del ruido expuestos anteriormente, se puede desarrollar un modelo simplificado que permita predecir el nivel de presión sonora generado para una hora, por el tráfico vehicular en vías de alto tránsito con flujo ininterrumpido, siendo el mejor ejemplo de esto las autopistas. Para ello en este trabajo especial de grado se utilizó el llamado enfoque clásico para el estudio y desarrollo de un modelo físico-matemático simplificado. En dicho enfoque se estima a partir de un grupo de variables de naturaleza empírica y se ajusta mediante teorías físico-matemáticas basadas en ecuaciones logarítmicas.

Aunque este enfoque es menos preciso en comparación a los métodos de elementos finitos y elementos de contorno, es muy práctico en el momento de su implementación en la etapa de diseño de vías y para tomar medidas sobre el control de ruido, empleando para esto programas computacionales.

Con el fin de obtener mayor precisión en los resultados, el fundamento teórico se sustentó en modelos desarrollados por Lawrence Kinsler, Edwrad Magrab y Leo Beranek, asimismo parte de la información experimental mostrada por estos autores se uso en el apartado de validación, sobre todo en el caso de Magrad, quien publicó en su libro *Enviromental Noise Control*, algunos nomogramas lo suficientemente funcionales para la medición del ruido.

Para desarrollar este modelo simplificado de predicción del ruido del tráfico vehicular fue necesario partir de la ecuación (5.14), para la propagación del sonido de una fuente puntual en campo abierto. Esta ecuación se basa en la teoría de

divergencia de ondas mostrada entre las ecuaciones (5.11) y (5.15) para una fuente puntual.

Por lo tanto, si se considera al tráfico vehicular como una fuente lineal, con propagación hemisférica, como se muestra en la figura 5.12, la intensidad sonora a una distancia r del centro de la carretera es igual a:

$$I = \frac{W}{\pi \cdot r \cdot l} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.59)$$

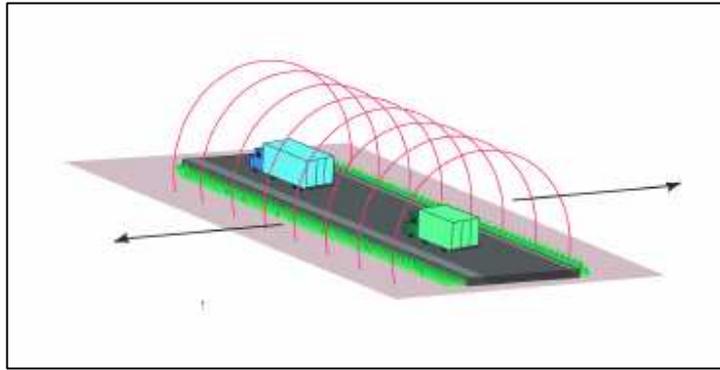


Fig. 5.12 Representación del tráfico vehicular como fuente lineal.
(Fuente: Making Sound Decisions About Highway Noise Abatement, 2003)

De la misma forma, la ecuación de divergencia de onda queda expresada de la siguiente forma:

$$L_{p\theta} = L_w + 10\log(l) + DI - 10 \cdot \log(r) - 5 + 10 \cdot \log\left(\frac{\rho c}{400}\right) - A_e \quad [\text{dB}] \quad (5.60)$$

Tomando en cuenta lo expuesto en el capítulo III, las fuentes de ruido en los vehículos tanto ligeros como pesados son el ruido por el contacto del caucho con el pavimento, el ruido de propulsión y el ruido aerodinámico, este último no tiene relevancia a velocidades menores a 130 Km/h, como se puede observar en la figura

5.13, por lo tanto no se consideró en el modelo simplificado, debido a que las velocidades promedio en una vía de alto tránsito normalmente no exceden este límite.

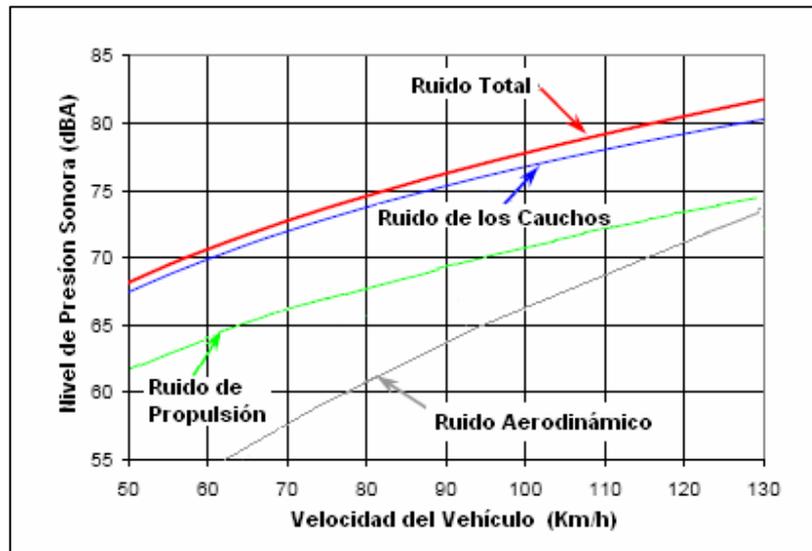


Fig. 5.13 Contribución de las diferentes sub-fuentes de ruido en tráfico vehicular en una autopista. (Fuente: FHWA, 2002).

Para el cálculo del nivel de presión sonora generado por el contacto del caucho con el camino y por propulsión, tanto para automóviles ligeros como para camiones, se usaron las ecuaciones (5.41) y (5.42), definidas en el modelo Harmonoise. En el Capítulo III también se mostró como la superficie del camino afecta el nivel de ruido generado por el contacto rodante, por esta razón se aplicó las correcciones de la tabla 5.7 para este mecanismo de generación, propuestas por la norma estándar alemán para el control de ruido RLS 90. Luego se suman los niveles de cada fuente según la expresión (2.20). Con respecto a las motocicletas se empleó la ecuación (5.56) propuesta por el modelo holandés para este tipo de vehículo.

Tabla 5.7 Valores en dB de Corrección por el efecto del tipo de Pavimento.

	Velocidades	
	< 50	> 50
Asfalto Poroso	0	5
Concreto Liso	0	-2
Stone Mastic Asphalt /SMA)	0	0
Asfalto EWmpedrado	2	5

(Fuente: Estándar RLS 90, 1995)

Asimismo para determinar el nivel de emisión sonora por metro lineal de un canal de la carretera se uso la ecuación (5.44), la cual considera el flujo de vehículos como una fuente lineal incoherente.

Como se mencionó anteriormente, en este modelo se toma el tráfico como una fuente hemisférica en un medio de propagación isotropico y homogéneo, por esta razón puede usarse la ecuación (5.10) para calcular la directividad. Pero además según Beranek³⁵, el tráfico en flujo ininterrumpido se puede considerar como una fuente no directiva³⁶, por lo cual el nivel de presión sonora a una distancia r y con un ángulo θ de la fuente direccional es igual a al nivel de presión sonora alrededor de la fuente, por lo tanto la directividad en este caso es un valor constante de tres decibeles.

Considerando todo lo antes expuesto y tomando en cuenta que para determinar el nivel de presión sonora generado por el tráfico vehicular en una vía con flujo ininterrumpido, es necesario estimarlo en todas las frecuencias centrales de tercios de octavas de banda entre los 25 Hz y los 10.000 Hz, tenemos que la ecuación de generación y propagación del ruido del tráfico vehicular se determina según al expresión (5.62), donde f es el índice de frecuencias, n es el índice que indica las

³⁵ Beranek, Leo; **“Noise and Vibration Control”**, McGraw-Hill, 1.971

³⁶ Una fuente no directiva es aquella que para un radio constante alrededor de la misma el nivel de presión sonora no cambia.

categorías y l la longitud del tramo de carretera, los demás términos fueron definidos en el apartado 5.1.2 :

$$L_{pT} = \sum_{f=1}^{27} \sum_{n=1}^4 L_{WT} \cdot 10 \cdot \log(l) - 2 - 10 \cdot \log(r) + 10 \cdot \log\left(\frac{\rho c}{400}\right) - A_e \quad [\text{dB}] \quad (5.61)$$

Para el cálculo de L_w en el caso de los vehículos ligeros, camiones ligeros y pesados se uso la expresión (5.63). De igual modo para las motocicletas se empleo la ecuación (5.57).

$$L_w = \left(a_r(f) * b_r(f) \cdot \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \oplus a_p(f) * b_p(f) \cdot \log\left(\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}}\right) \right) + 10 \cdot \log\left(\frac{Q_m \cdot v_0}{1000 \cdot Q_0 \cdot v_m}\right) \quad [\text{dB}] \quad (5.62)$$

Donde:

$a_r(f) * b_r(f) \log(v/v_{ref})$ = Nivel de presión sonora debido al contacto del neumático con el camino.

$a_p(f) * b_p(f) \log(v - v_{ref} / v_{ref})$ = Nivel de presión sonora debido al motor, escape y mecanismos internos.

$10 \log((Q_m * v_0) / (1000 * Q_0 * v_m))$ = Ajuste por flujo de vehículos

Con respecto a las atenuaciones se consideraron las más importantes y generales como lo son la atenuación atmosférica, atenuación del suelo, atenuación de la vegetación y la atenuación de los edificios. Para la primera de estas se uso el método propuesto por la norma ISO 9613-1, debido a que en diversos trabajos de generación de ruido y propagación sonora del tráfico vehicular (Beranek, Kurze, Kalke, Lamancusa, Thompson, Tonin, Harris, etc.) hacen énfasis en esta norma como la más adecuada. A continuación se muestra dicho método, el cual está en función de la frecuencia f (Hz), temperatura T (Kelvin) y la concentración molar del vapor de agua h (%):

$$\alpha = 869 \cdot f^2 \cdot \left\{ 1,84 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \cdot \left[0,01275 \cdot \frac{e^{-2239,1/T}}{F_{r,o} + f^2/F_{r,o}} + 0,1068 \cdot \frac{e^{-3352/T}}{F_{r,N} + f^2/F_{r,N}} \right] \right\} \quad (5.63)$$

$$F_{r,o} = 24 + 4,04 \cdot 10^4 \cdot h \cdot \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \quad (5.64)$$

$$F_{r,N} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \cdot \left(9 + 280 \cdot h \cdot e^{\left\{ -4,17 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right\}} \right) \quad (5.65)$$

Donde:

$F_{r,o}$ = Frecuencia de relajación del oxígeno (Hz).

$F_{r,N}$ = Frecuencia de relajación del nitrógeno (Hz).

T_0 = 293,15 K (20 °C).

$$A_{abs} = \frac{\alpha \cdot r}{100} \quad [\text{dB}] \quad (5.66)$$

α = Coeficiente de absorción atmosférico en dB/100m

r = Distancia ó rango en metros.

En cuanto a la atenuación del suelo se uso el método desarrollado por el Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Pekín y publicado en la revista "Applied Acoustics". A continuación se expone las ecuaciones que componen dicho método:

$$A_{Suelo} = a \cdot P \cdot 10 \cdot \log(r_0 / r) \quad [\text{dB}] \quad (5.67)$$

Donde

$$a = \begin{cases} 0.5 & H_{\text{eff}} \leq 3 \text{ m} \\ 0.6 & 3 \text{ m} < H_{\text{eff}} \leq 18 \text{ m} \\ 0 & H_{\text{eff}} \geq 3 \text{ m} \end{cases}$$

H_{eff} = Altura efectiva, la cual se determina mediante el método expuesto en el anexo (A.5).

P = Porcentaje del suelo con alta capacidad absorción (arena, grama. Nieve blanca).

r_0 = Distancia de Referencia.

r = Distancia del receptor a la línea de cada canal.

Para cuantificar la atenuación por la vegetación se eligió las ecuaciones³⁷ (5.69) y (5.70) debió a que estas contempla valores para un rango de frecuencias entre 25 y 10000 Hz por lo cual se ajusta mejor al modelo simplificado desarrollado en este Trabajo Especial de grado, en lugar del método propuesto en la norma ISO 9613-1 que fue expuesto en la Tabla (2.8), debido a que este último considera ocho frecuencias.

Para arbustos, césped alto y de poco espesor:

$$A_{\text{arbusto, césped}} = (0,18 \cdot \log(f) - 0,31) \cdot r \quad [\text{dB}] \quad (5.68)$$

Donde:

$A_{\text{arbusto, césped}}$ = Atenuación sonora por arbustos y/o césped.

f = Frecuencia en Hz.

r = Distancia desde la fuente sonora en metros.

Para bosques:

$$A_{\text{bosque}} = 0,01 \cdot f^{1/3} \cdot r \quad [\text{dB}] \quad (5.69)$$

³⁷ Beranek, Leo; "Noise and Vibration Control", McGraw-Hill, 1.971.

Donde:

A_{bosque} = Atenuación sonora debido a la presencia de bosque.

Las áreas con edificaciones también producen importantes atenuaciones a la propagación de sonido. En el caso del tráfico de automóviles y trenes a través de zonas edificadas Tonin³⁸ propone las siguientes expresiones para determinar esta atenuación:

$$A_{edificaciones} = -10 \cdot \text{Log} \left(10^{-1,0 \cdot DP} + 10^{-0,1 \cdot DE} \right) \quad [\text{dB}] \quad (5.70)$$

$$DP = -10 \cdot \text{Log} \left(1 - \frac{p}{100\%} \right) \quad [\text{dB}] \quad (5.71)$$

$$DE = 1 - 10 \cdot \log(10^{-0,1DE,1} + 10^{-0,1DE,2} + \dots) \quad [\text{dB}] \quad (5.72)$$

Donde D_E es la atenuación sonora considerando los edificios como barreras acústicas planas y p es la proporción que existe entre la longitud ocupada por el edificio y la longitud total del terreno.

Por último para el cálculo de la atenuación de una barrera acústica se usó la teoría de Maekawa, mostrada en el apartado 4.4.1.1. Esta sólo considera los efectos de difracción del sonido en el tope de la barrera, debido a que el nivel de ruido que logra pasar a través de la pantalla es muy bajo y es enmascarado casi en su totalidad por el proveniente de la difracción, esto sucede para materiales con una masa superficial de 20 Kg/m², abarcando cerca de la totalidad de espesores y materiales. Sin embargo, para lograr el máximo de exactitud posible en el modelo simplificado para este tipo de atenuación, se incluyó la ecuación (5.73) propuesta por Magrad³⁹, la cual relaciona las pérdidas por inserción con las producidas por transmisión.

³⁸ Tonin, Renzo; “Modelling and Predicting Environmental Noise”, RTA Group, 2.001.

³⁹ Edgard Magrad, “Environmental Noise Control”, Wiley-Interscience Publication, 1975.

$$A_{Barreras} = IL - 10 \log[1 + 10^{-(IL+TL)/10}] \quad [\text{dB}] \quad (5.73)$$

Donde:

IL = Pérdidas por Inserción.

TL = Pérdidas Por Transmisión.

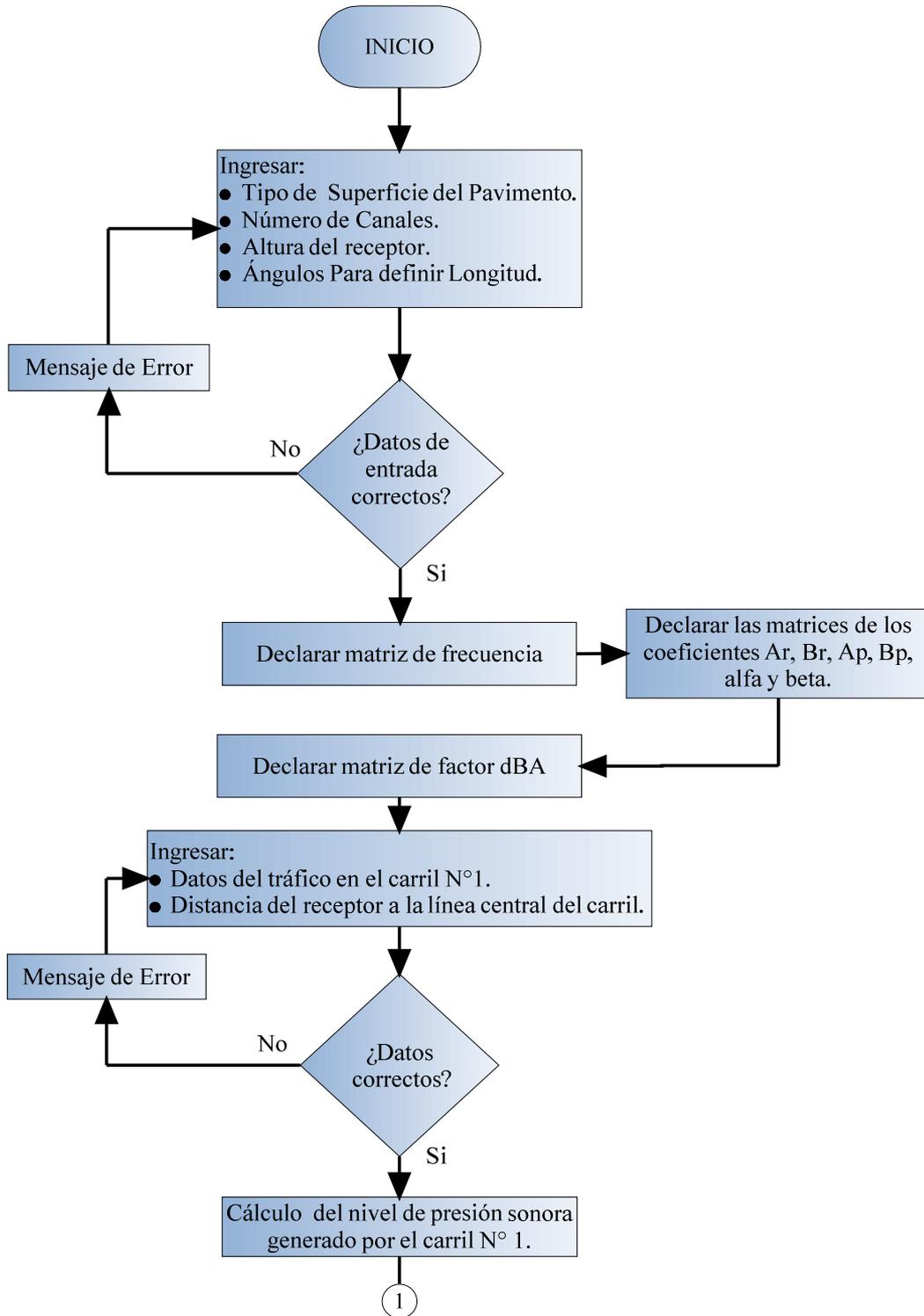
Con respecto al tope de la barrera se emplearon valores promedio de atenuación para los tipo más usados en la actualidad (Simple, perfil “T”, perfil “Y”, perfil cilíndrico, perfil dentado o mellado), tomados de la bibliografía⁴⁰ y mostrados en el anexo (A.7).

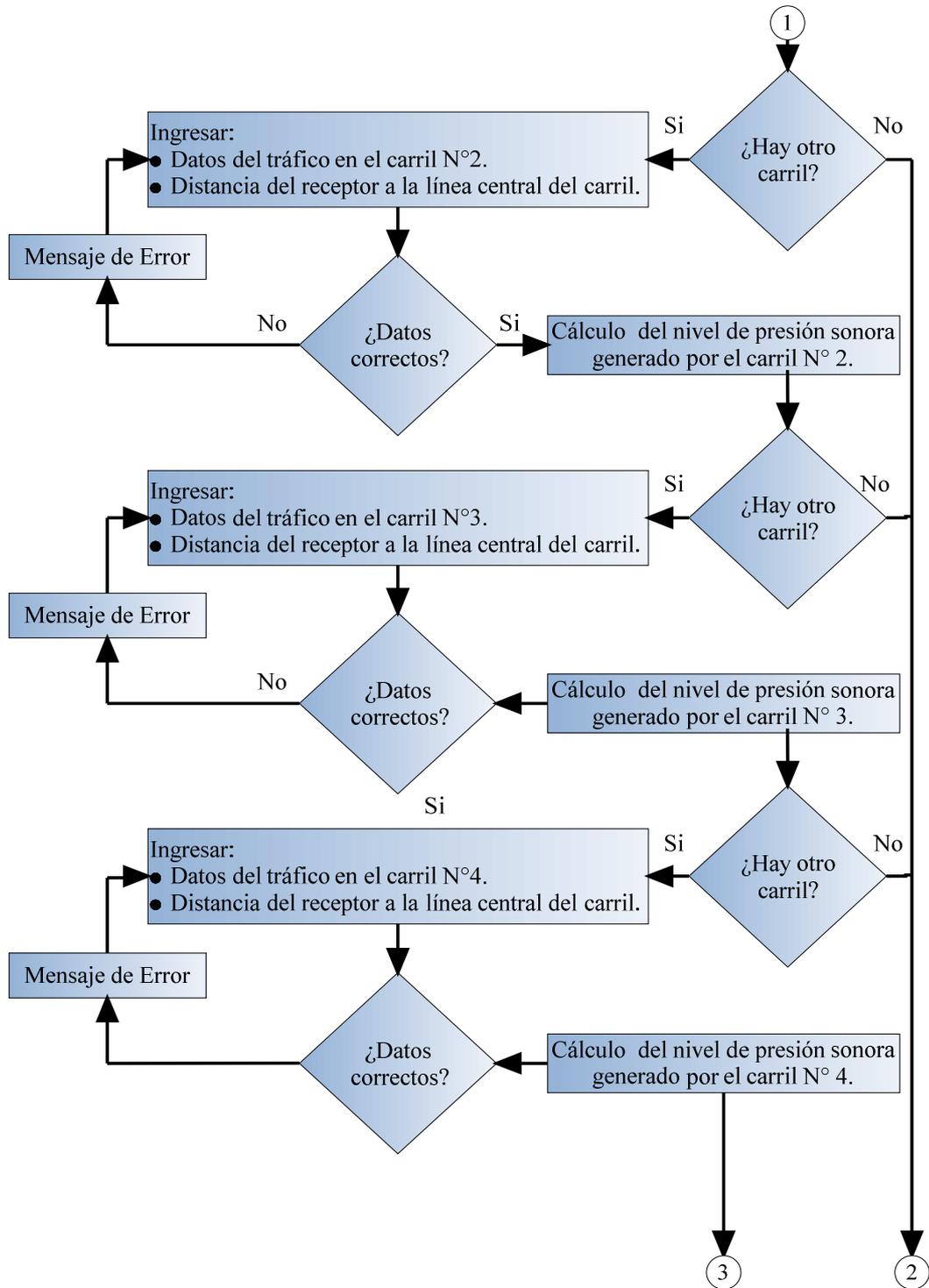
5.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO SIMPLIFICADO.

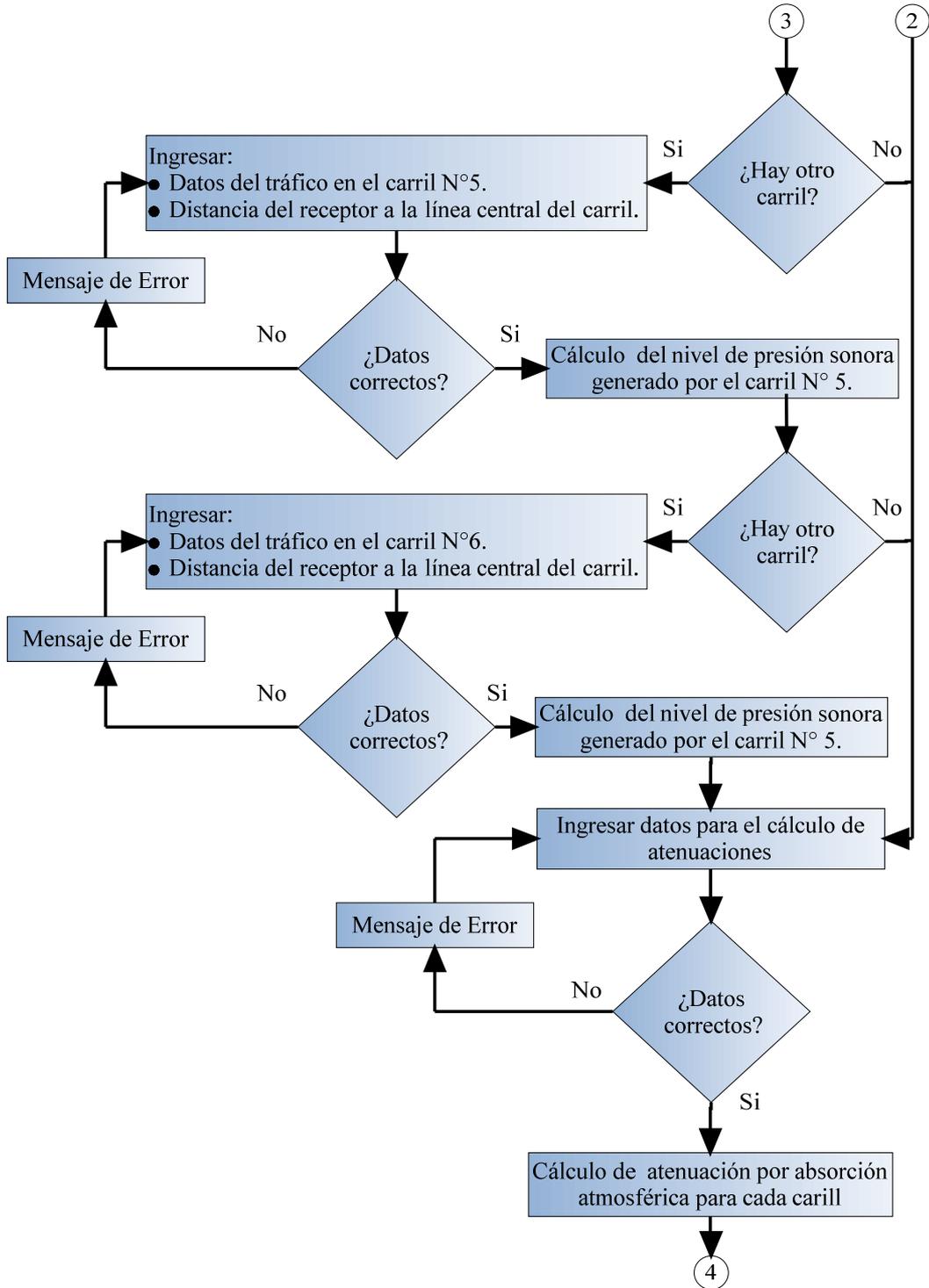
El diagrama de flujo es una representación gráfica de una serie de pasos los cuales, de forma metódica, llevarán a la solución de un problema. En esencia, los diagramas de flujo constan de una ó varias entradas, un conjunto de operaciones intermedias y una ó varias salidas. Este instrumento facilita el estudio y optimiza tanto los algoritmos como de programas de computación y es ampliamente usado, además, para el estudio de diversos procesos como líneas de producción y sistemas de control de calidad.

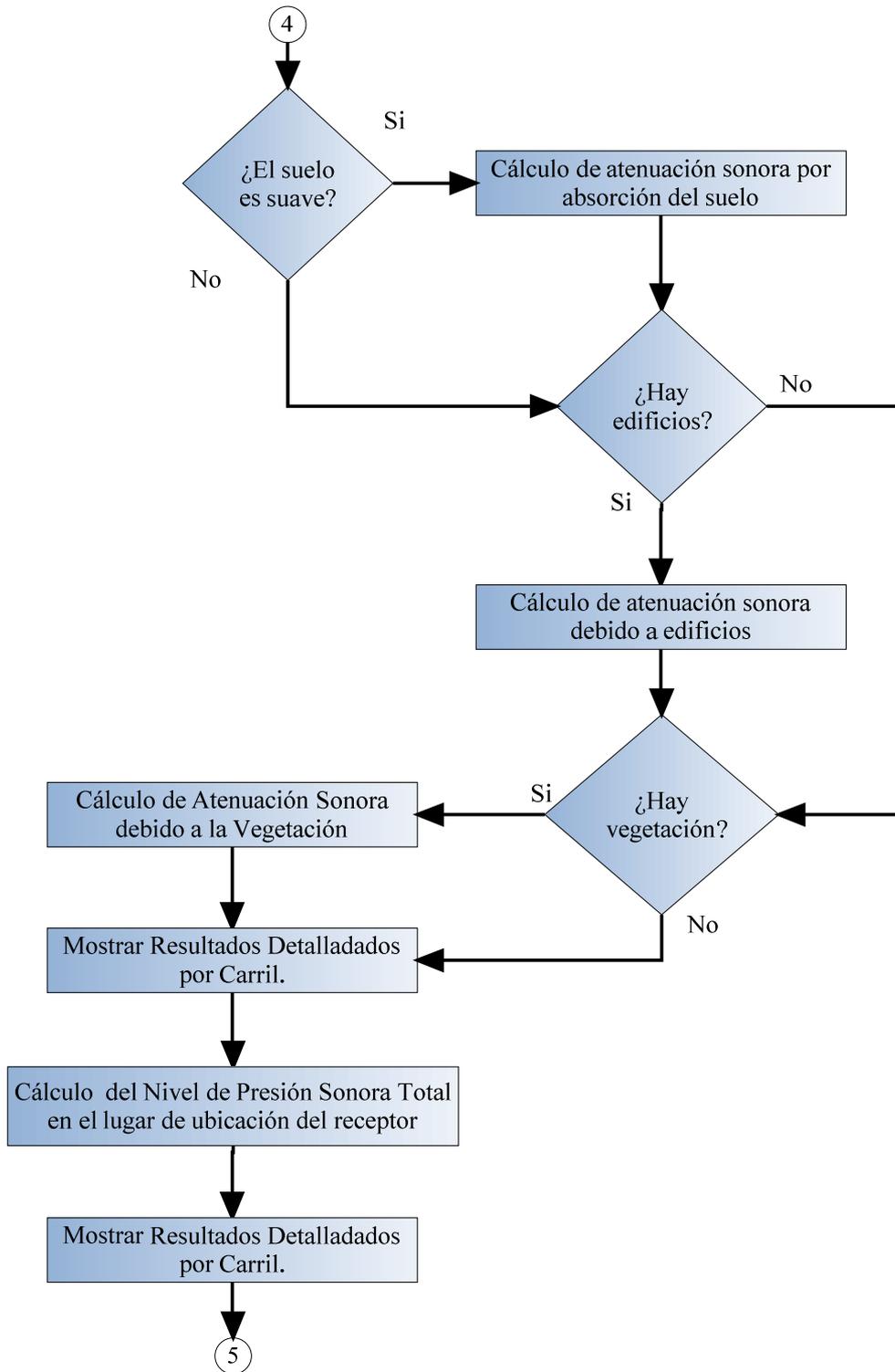
El desarrollo del diagrama de flujo para el modelo simplificado sigue un orden estrictamente secuencial y maneja una serie de decisiones que le permiten al usuario establecer parámetros particulares para la estimación del nivel de presión sonora esperado para el tráfico vehicular.

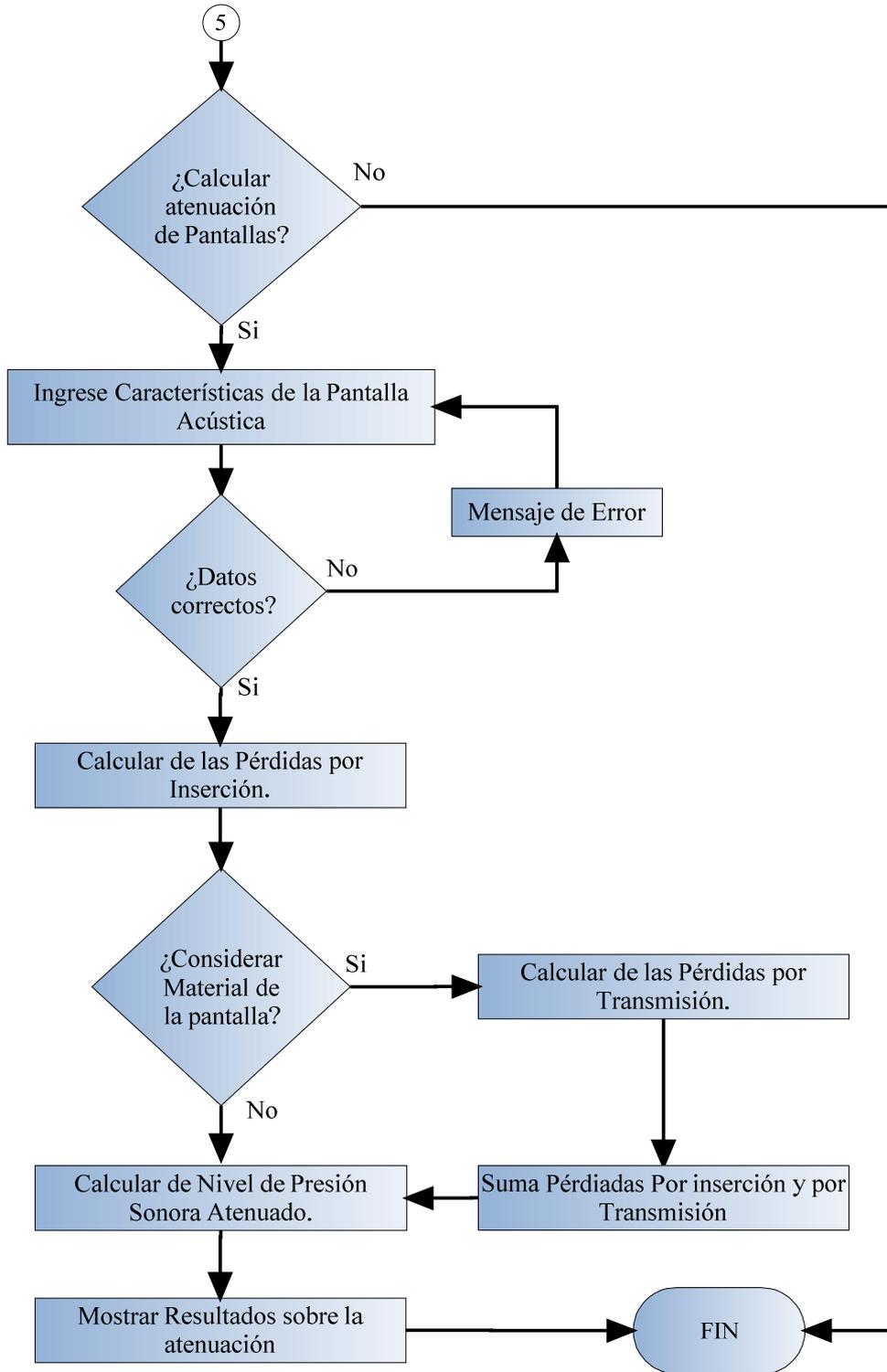
⁴⁰Dustin Watson, “**Evaluation Of Benefits And Opportunities For Innovative Noise Barrier Designs**”, Arizona Department of Transportation, 2006.











5.3.2 ALGORÍTMO DEL MODELO SIMPLIFICADO.

Paso 1: Inicio Algoritmo.

Paso 2: Ingresar Tipo de superficie, número de canales, Altura del receptor y ángulos que definen el tramo de carretera.

Paso 3: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 4. Caso Contrario dar un mensaje de error y regresar al paso 2.

Paso 4: Declarar Matriz de frecuencias.

Paso 5: Declarar Matrices de coeficientes.

Paso 6: Declarar Matriz de Factor dBA.

Paso 7: Ingresar datos del carril uno y distancia del receptor.

Paso 8: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 9. Caso Contrario, dar un mensaje de error y regresar al paso 7.

Paso 9: Calcular el nivel de presión sonora del carril uno.

Paso 10: Verificar si hay otro carril. De ser así, continuar en el paso 11. Caso Contrario continuar, en el paso 32.

Paso 11: Ingresar datos del carril dos y distancia del receptor.

Paso 12: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 13. Caso Contrario, continuar en el paso 11.

Paso 13: Calcular el nivel de presión sonora del carril dos.

Paso 14: Verificar si hay otro carril. De ser así, continuar paso 15. Caso Contrario, continuar en el paso 32.

Paso 15: Ingresar datos del carril tres y distancia del receptor.

Paso 16: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 17. Caso Contrario, continuar en el paso 15.

Paso 17: Calcular el nivel de presión sonora del carril tres.

Paso 18: Verificar si hay otro carril. De ser así, continuar en el paso 19. Caso Contrario, continuar en el paso 32.

- Paso 19: Ingresar datos del carril cuatro y distancia del receptor.
- Paso 20: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 21: Caso Contrario, continuar en el paso 19.
- Paso 22: Calcular el nivel de presión sonora del carril cuatro.
- Paso 23: Verificar si hay otro carril. De ser así, continuar en el paso 24. Caso Contrario, continuar en el paso 32.
- Paso 24: Ingresar datos del carril cinco y distancia del receptor.
- Paso 25: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 27. Caso Contrario, continuar en el paso 24.
- Paso 27: Calcular el nivel de presión sonora del carril cinco.
- Paso 28: Verificar si hay otro carril. De ser así, continuar en el paso 29. Caso Contrario, continuar en el paso 32.
- Paso 29: Ingresar datos del carril seis y distancia del receptor.
- Paso 30: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 31. Caso Contrario, continuar en el paso 29.
- Paso 31: Calcular el nivel de presión sonora del carril seis.
- Paso 32: Ingresar Datos de atenuaciones ambientales.
- Paso33: Verificar si los Datos de entrada son correctos. De ser así, continuar en el paso 34. Caso Contrario dar un mensaje de error y regresar al paso 32.
- Paso 34: Calcular Atenuación por absorción atmosférica.
- Paso 35: Verificar si se considera atenuación sonora por absorción del suelo. De ser así, continuar en el paso 36. Caso Contrario continuar en el paso 37.
- Paso 36: Calcular atenuación sonora por absorción del suelo.
- Paso 37: Verificar si se considera la presencia de edificios. De ser así, continuar en el paso 38. Caso Contrario, continuar en el paso 39.
- Paso 38: Calcular atenuación sonora debido a la presencia de edificios.
- Paso 39: Verificar si se considera la atenuación por vegetación. De ser así, continuar en el paso 40. Caso Contrario, continuar en el paso 41.

Paso 40: Calcular atenuación sonora debido a la presencia de vegetación.

Paso 41: Mostrar resultados por carril.

Paso 42: Calcular el nivel de presión sonora total en la ubicación del receptor.

Paso 43: Mostrar resultados sobre el nivel de presión sonora total.

Paso 44: Verificar si se considera la atenuación por la colocación de una barrera. De ser así, continuar en el paso 45. Caso Contrario, continuar en el paso 47.

Paso 45: Ingresar datos de la barrera.

Paso 46: Mostrar resultados sobre la atenuación producida por la colocación de la barrera.

Paso 47: Fin.

5.3.3 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN USADO.

El lenguaje de programación escogido para la realización de este Trabajo Especial de Grado fue el Microsoft Visual Basic 6.0, el cual se encuentra dentro del grupo de lenguajes orientados a objetos y manejados por eventos, lo que significa que su código esta dividido en bloques o módulos.

Un lenguaje esta orientado a objeto, como botones de opción, casillas de verificación, cuadro de texto, etc., que pueden estar asociados a un procedimiento de ruido y codificación por el programador, respondiendo a eventos o acciones de usuario sobre dicho objeto, ejecutando así el procedimiento asociado. Este el mismo principio de funcionamiento de Microsoft Windows que permite interactuar con el usuario a través de una interfaz gráfica.

El Visual Basic como lenguaje de programación tiene una serie de ventajas, entre las cuales se puede mencionar, su compatibilidad con la plataforma Windows,

la cual es una de la más usadas actualmente, otra ventaja es que permite un desarrollo eficaz y menor inversión en tiempo que con otros lenguajes.

5.3.4 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.

Se tiene una carretera con dos canales, el primero de ellos con un flujo vehicular de 2442 vehículos ligeros, 69 vehículos medianos y 189 vehículos pesados; el segundo con 2400 vehículos ligeros, 67 vehículos medianos y 242 vehículos pesados, con una velocidad promedio de 95 Km/h para todas las clases, en cada canal. La humedad relativa del aire es de 43% y la temperatura ambiental es 14 °C (298 K), el receptor y la carretera se encuentran en un área plana con aproximadamente 50% de suelo suave.

La distancia del receptor a la línea central del primer canal es de 7.5 metros y 11.5 en el caso del segundo. La altura del receptor es de 1,5 m. Se desea estimar los niveles de presión sonora para la gama de frecuencias comprendidas entre 25 Hz y 10.000 Hz con una propagación sin obstrucciones en primer lugar y luego con la colocación de una pantalla acústica de 3 m de alto y 0.2 m de espesor, con perfil “T” y ubicada a 3 m del receptor. El material de la barrera es concreto.

Al ejecutar **PERTRAF.exe**, lo primero que aparece en pantalla es el formulario de presentación (ver figura 5.14), donde se indica el nombre completo del programa, así como el nombre de los desarrolladores y la última fecha de revisión, luego con solo presionar una tecla o hacer clic sobre dicha plantilla se muestra el formulario de datos iniciales (ver figura 5.15); sin embargo, si el usuario no hace ninguna acción sobre el computador la prestación desaparecerá en tres segundos.

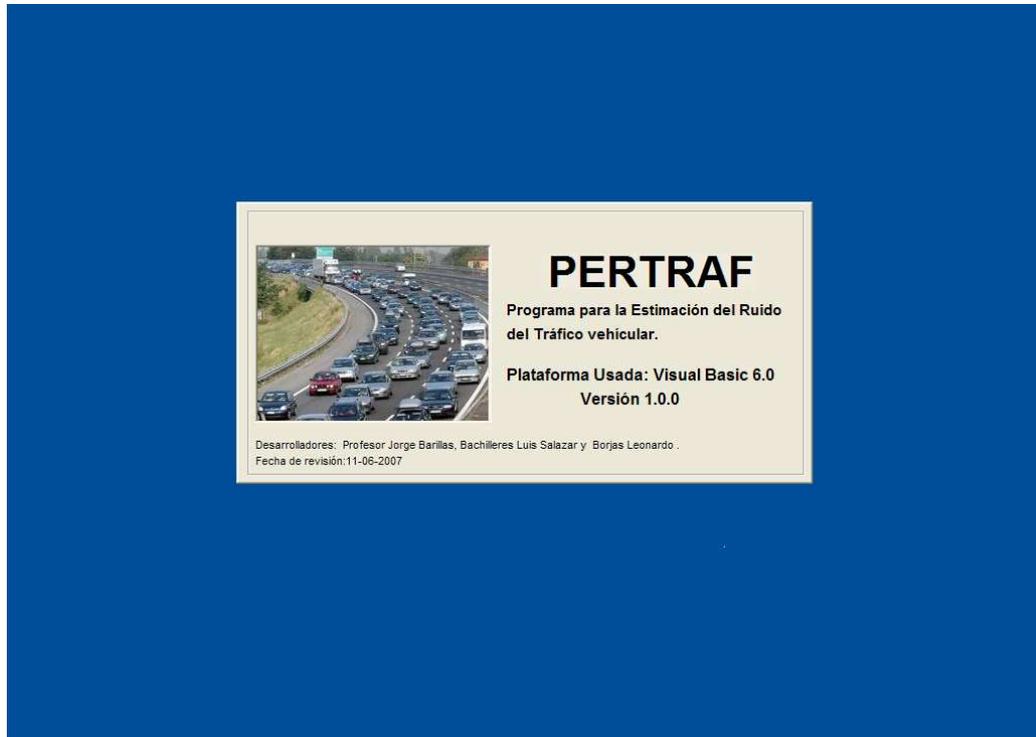


Fig. 5.14 Plantilla de prestación
(Fuente: elaboración propia).

En la plantilla de datos iniciales el usuario debe introducir en las cajas de texto la altura del receptor y los ángulos que indican los extremos del tramo de carretera en cuestión con respecto al receptor. También se debe seleccionar en las listas desplegables el número de canales de la vía en cuestión, así como el tipo de pavimento de la misma.

Datos Iniciales

Datos del Tráfico

Amenazamientos

Resultados - Cambios

Resultados Final

Control de Flujo

Acera de

PERTRAF - Datos Iniciales

Características de Carretera

Número de carriles o canales: Dos Canales

Tipo de superficie del camino: Concreto liso

Ubicación relativa del receptor

Altura del receptor (m): 1,5

Considerar la máxima longitud de vía que tenga afectación sobre el receptor

Ángulo que indica el extremo derecho del tramo de carretera (B₂): 63,5

Ángulo que indica el extremo izquierdo del tramo de carretera (B₁): 63,5

? Borra Datos Introducir Datos Salir

Fig. 5.15 Plantilla para introducir datos iniciales.
(Fuente: elaboración propia).

En caso de que el usuario no este seguro sobre el significado de los ángulos que indican los extremos del tramo de carretera, este puede hacer clic sobre el botón con el signo de interrogación y luego se mostrara una imagen a la derecha del formulario donde se indica como se miden dichos ángulos (ver Figura 5.16).

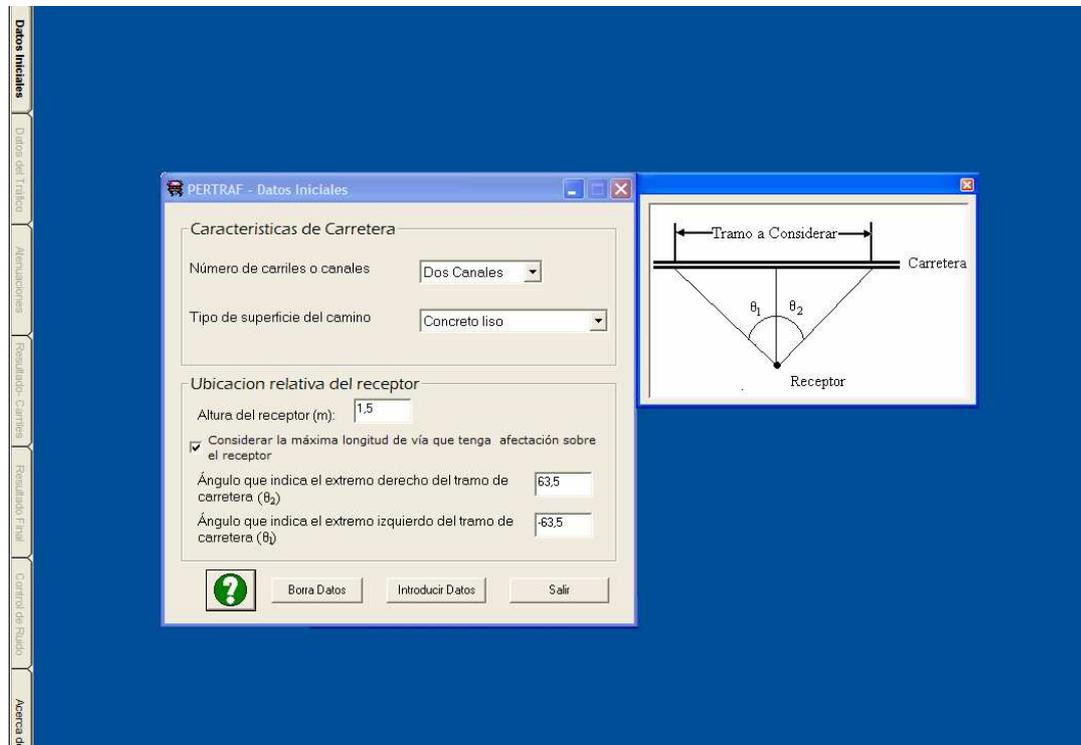


Fig. 5.16 Plantilla para introducir datos iniciales con imagen de ayuda.
(Fuente: elaboración propia).

Luego el usuario debe hacer clic sobre el botón introducir datos para pasar a la siguiente fase del programa, esto último se indica por medio de la barra con pestañas ubicada en el extremo izquierdo de la pantalla, con la cual se puede regresar a una etapa anterior en cualquier momento de la ejecución de PETRAF.exe.

En la plantilla para introducir datos del tráfico (ver figura 5.17), el usuario debe colocar en las cajas de texto el flujo de vehículos para una hora, la velocidad promedio de los mismos y la distancia del receptor a la línea central de cada canal, según sea el caso.

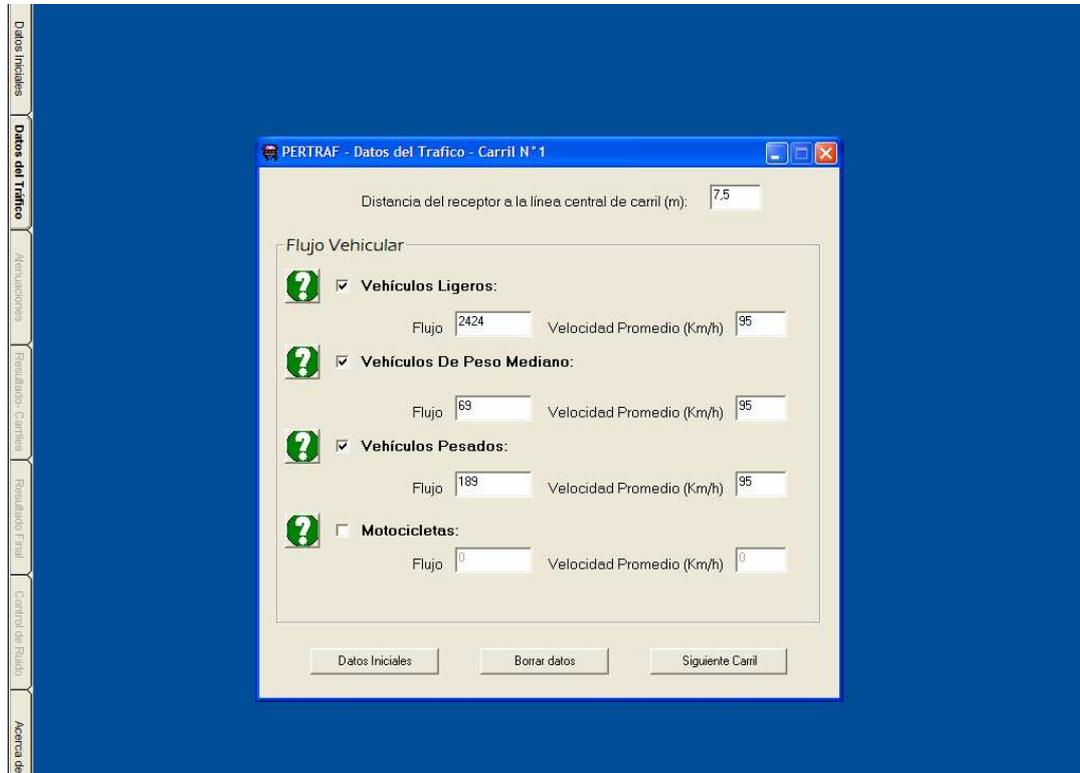


Fig. 5.17 Plantilla para introducir datos del tráfico carril uno.
(Fuente: elaboración propia).

Al igual que en el caso anterior, si el usuario no está seguro sobre que tipos de vehículos agrupa cada categoría, este puede hacer clic sobre el botón con el signo de interrogación y se mostrará una imagen a la derecha del formulario donde se muestran varios modelos de vehículos que ilustran la categoría en cuestión (ver figura 5.18). Nótese que en la barra se ha activado la segunda pestaña con el texto “Datos del Tráfico”. Si el usuario desea regresar a la etapa anterior puede hacerlo por medio de la barra o usando haciendo clic en datos iniciales.

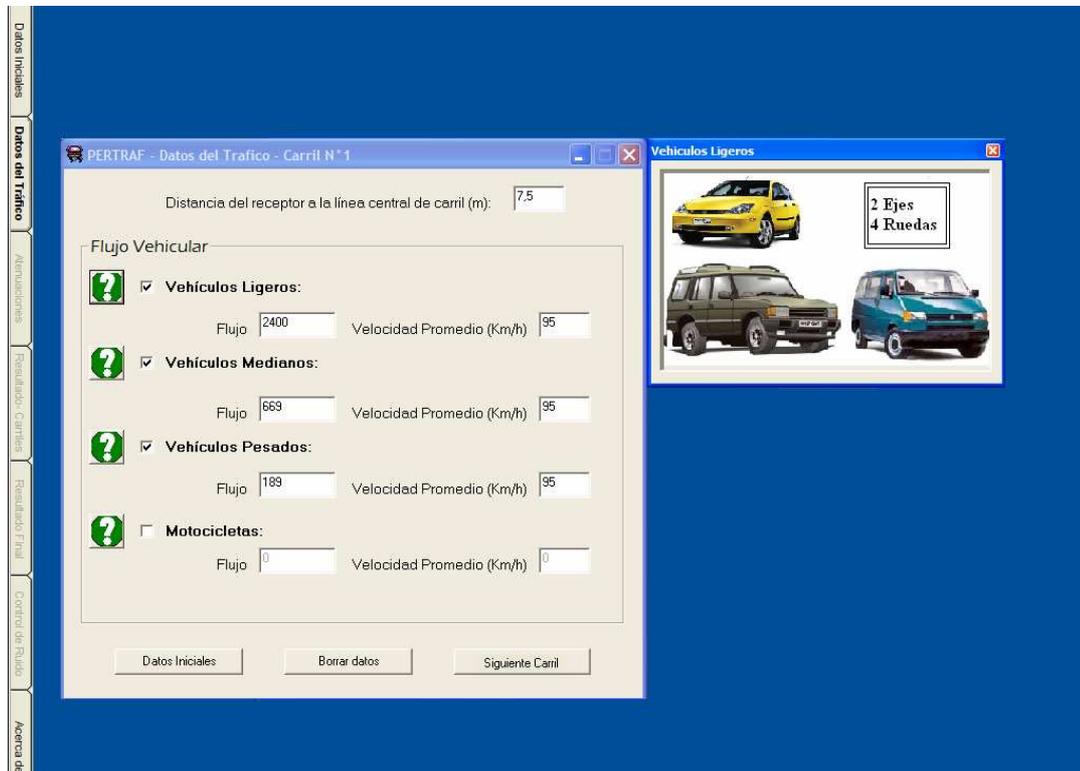


Fig. 5.18 Plantilla para introducir datos del tráfico carril uno, con imagen de ayuda.
(Fuente: elaboración propia).

De igual manera se introducen los datos para el segundo carril como se muestra en la figura 5.19, nótese que en este formulario el botón del extremo derecho no tiene el texto “Siguiete Carril” sino “Cálculo de atenuaciones”, debido a que en el ejemplo en cuestión la vía tiene solo dos canales.

Fig. 5.19 Plantilla para introducir datos del tráfico carril dos.
(Fuente: elaboración propia).

La siguiente fase del programa es la introducción de los datos para el cálculo de atenuaciones mediante la plantilla mostrada en la figura 5.20, en este caso sólo se considera la atenuación por absorción atmosférica y la debida al tipo de suelo, por tal motivo solo se introduce la temperatura ambiental en Kelvin, la humedad atmosférica, la topografía del terreno y el porcentaje de suelo poroso (arena, nieve, tierra no muy compacta).

En caso de considerar otro tipo de atenuaciones solo debe hacer clic sobre la caja de chequeo, y los objetos para la introducción de la información se activaran automáticamente.

The screenshot shows a software window titled "PERTRAF - Datos Para el Calculo de Atenuaciones". The interface is divided into several sections for data entry:

- Absorción Atmosférica:** Includes input fields for "Humedad Relativa (%)" (value: 43) and "Temperatura del ambiente (°K)" (value: 287).
- Atenuación Por la Superficie del Suelo:** Features a radio button selection for "Seleccione la Topografía del terreno:" with options: "Área Plana" (selected), "Corte Bajo", "Receptor Elevado", "Corte Inclinado", and "Separado por brecha". Below this is a diagram showing a car and a person on a road. Further down are input fields for "Porcentaje de suelo poroso:" (value: 50), "Altura del Corte 'Hc' (m):", "Distancia al corte (m):", and "Longitud horizontal del corte (m):".
- Atenuación por Vegetación:** Includes a radio button selection for "Indique el tipo de vegetación:" with options: "Arbustos de altura baja y media, césped, grama", "Arbustos de gran altura, bosques, maleza frondosa", and "Ambos tipos". Below are input fields for "Capa Vegetal de baja altitud (m):" and "Capa Vegetal de gran altitud (m):".
- Atenuación por edificaciones:** Includes input fields for "Altura de Promedio de los edificios (m):" and "Porción de longitud con edificaciones (m):". Below is a section for "Indique las distancia del receptor a los extremos de la porción con edificios (m):" with fields for "D1:", "D2:", and "D3:".
- Checkboxes:** On the right side, there are checkboxes for "Atenuación del suelo" (checked), "Atenuación por vegetación", and "Atenuación Por edificaciones".
- Buttons:** At the bottom right, there are buttons for "Borra datos", "Mostrar Resultados Por Carril", and "Salir".

A vertical sidebar on the left contains the following menu items: "Datos Iniciales", "Datos del Trafico", "Atenuaciones", "Resultado Carril", "Resultado Franja", "Control de ruido", and "Ayuda de".

Fig. 5.20 Plantilla para introducir datos del tráfico carril dos.
(Fuente: elaboración propia).

Al hacer clic sobre el botón con el texto “Mostrar resultados por carril” el programa muestra la plantilla de resultados para el canal uno (ver figura 5.21), la cual esta dividida en tres sectores, valores que dependen de la frecuencia, valores independientes de la frecuencia y los niveles de presión sonora totales para cada frecuencia entre 25 Hz y 10000 Hz. Si el usuario desea ver el gráfico del espectro de frecuencia para este carril, entonces debe hacer clic sobre el botón con texto “Mostrar Gráfico” y aparece en pantalla dicho gráfico (ver figura 5.22), en donde se puede activar o desactivar cada una las curvas que se muestran (Nivel de presión sonora de cada categoría de vehiculo, el total generado por este carril y el total percibido por el receptor) y cambiar la unidad para medir el nivel de presión sonora, dB o dBA. Del mismo modo se expresan los resultados para el carril dos, los cuales se muestran en las figuras 5.23 y 5.24.

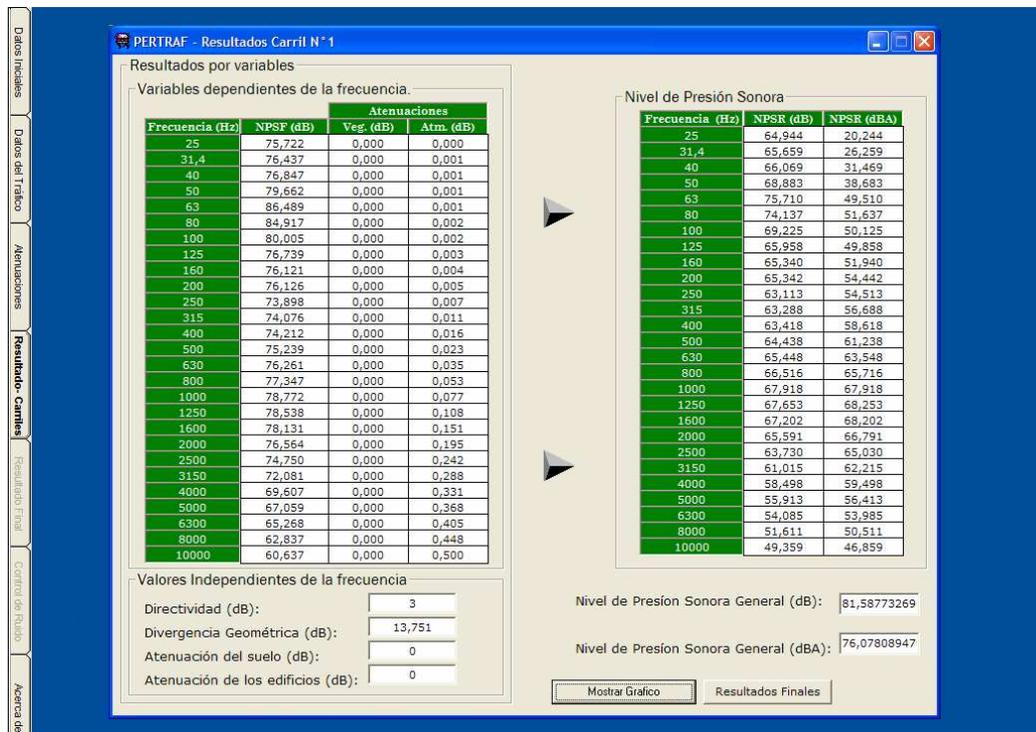


Fig. 5.21 Plantilla de resultados del carril uno. (Fuente: elaboración propia)

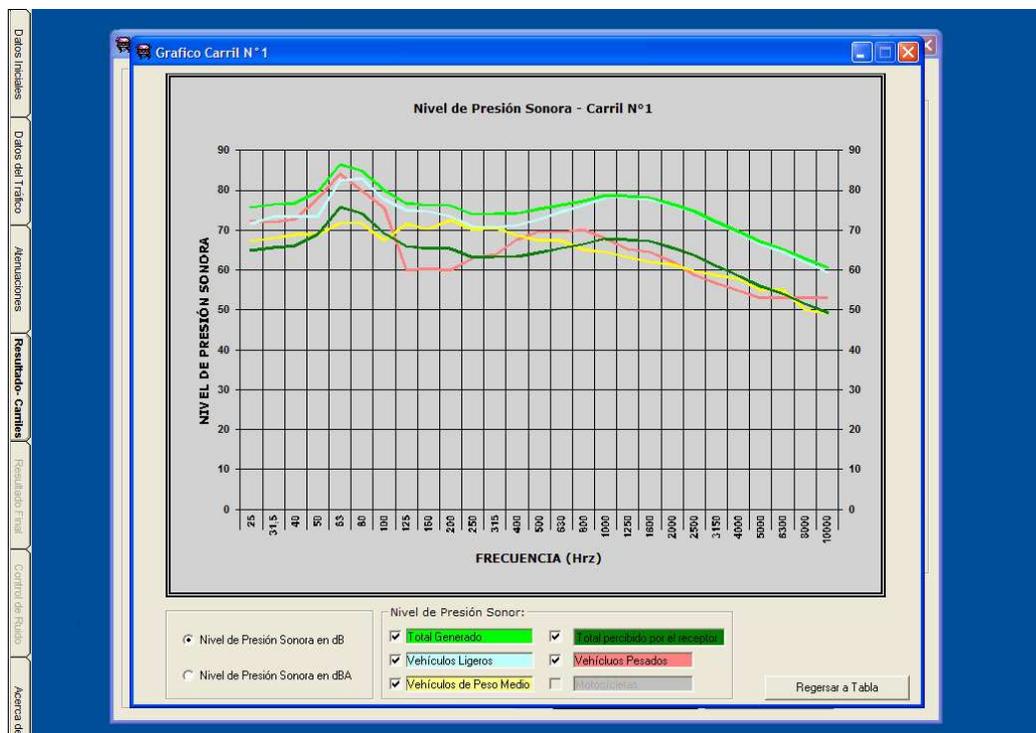


Fig 5.22 Gráfico de resultados del carril uno. (Fuente: elaboración propia)

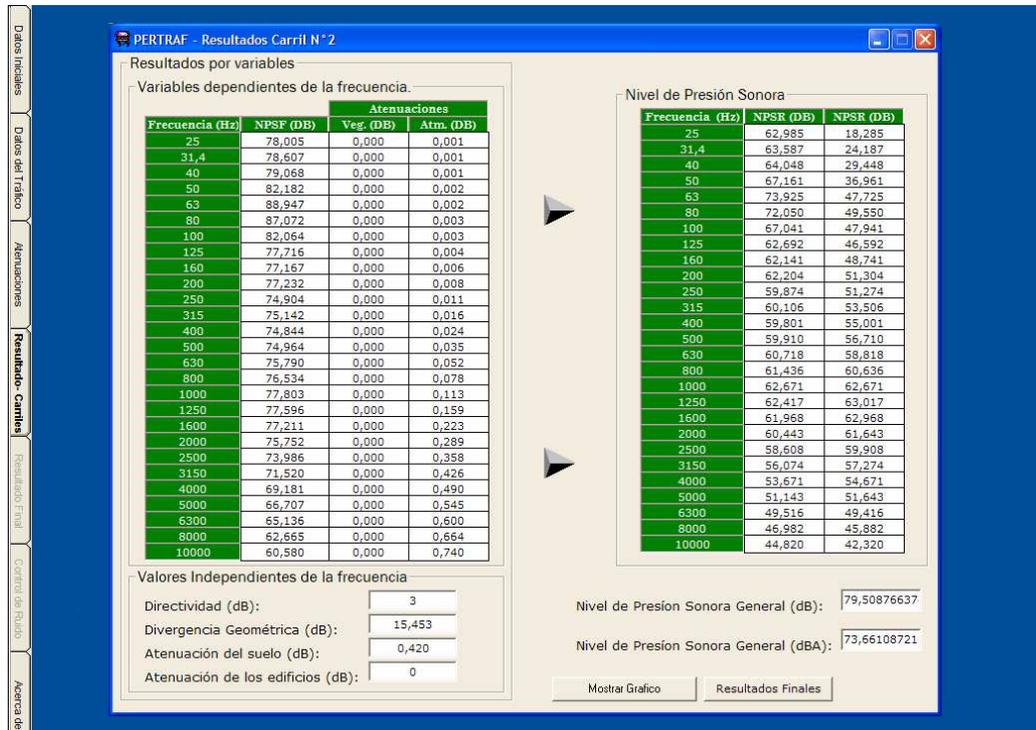


Fig. 5.23 Plantilla de resultados del tráfico carril dos. (Fuente: elaboración propia)

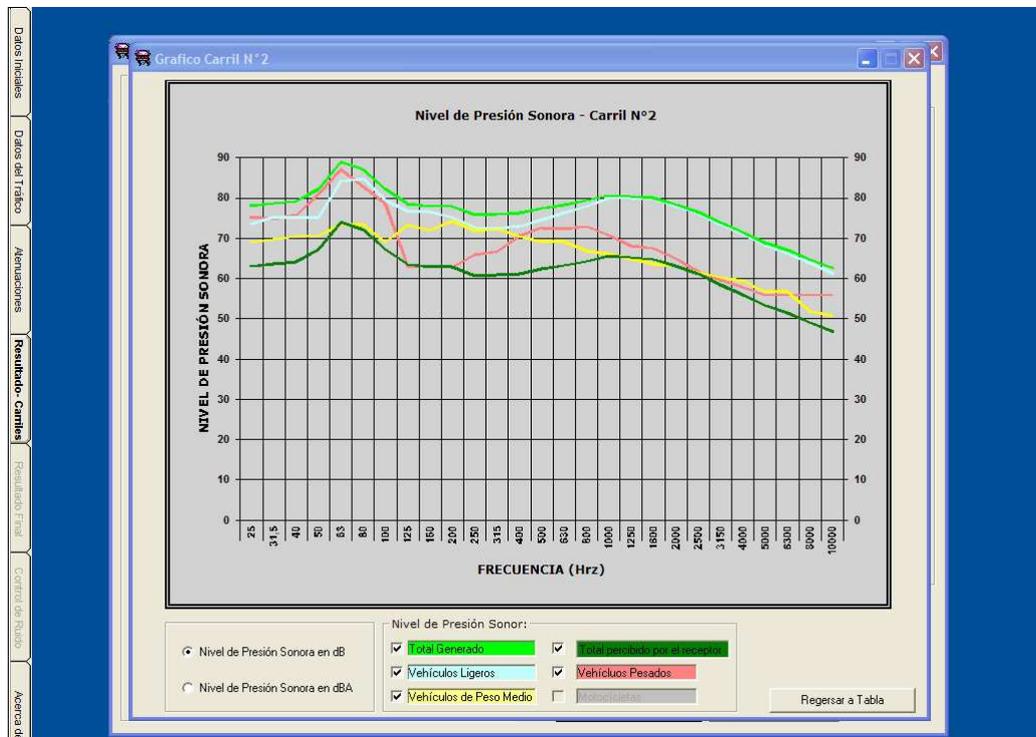


Fig. 5.24 Gráfico de resultados del carril dos. (Fuente: elaboración propia)

El formulario siguiente presenta los resultados finales del estudio de generación y propagación de ruido, este se encuentra dividido en tres secciones, los resultados de la presión sonora y los niveles de presión sonora por frecuencia entre 25 Hz y 10000 Hz, sin ponderar y en ponderación “A”. Igualmente se muestran los NPS globales, es decir, la medición que daría un sonómetro si fuese usado en la situación en cuestión. Con el objetivo de ejemplificar de manera mas adecuada los resultados mostrados en la tabla también se presenta un gráfico, el cual por medio de los botones de opción se puede ajustar a las necesidades del usuario, gráfico en dos o tres dimensiones, en dB o en dBA, mostrar solo la curva de interés, etc. (ver figura 5.25).

El PERTARF le proporciona al usuario una herramienta para realizar un estudio de control de ruido por medio de una pantalla acústica sobre los resultados obtenidos, a la cual se accede por medio del formulario de resultados finales en el botón con texto control de ruido. El usuario debe colocar las características de la barrera. La altura y la distancia al receptor son datos obligatorios; sin embargo para lograr un resultado más ajustado a la realidad se ofrece la posibilidad de considerar el material de la pantalla, ofreciendo los más usados (concreto, vidrio, madera, acero, aluminio) y además el perfil para esta aplicación (ver figura 5.26).

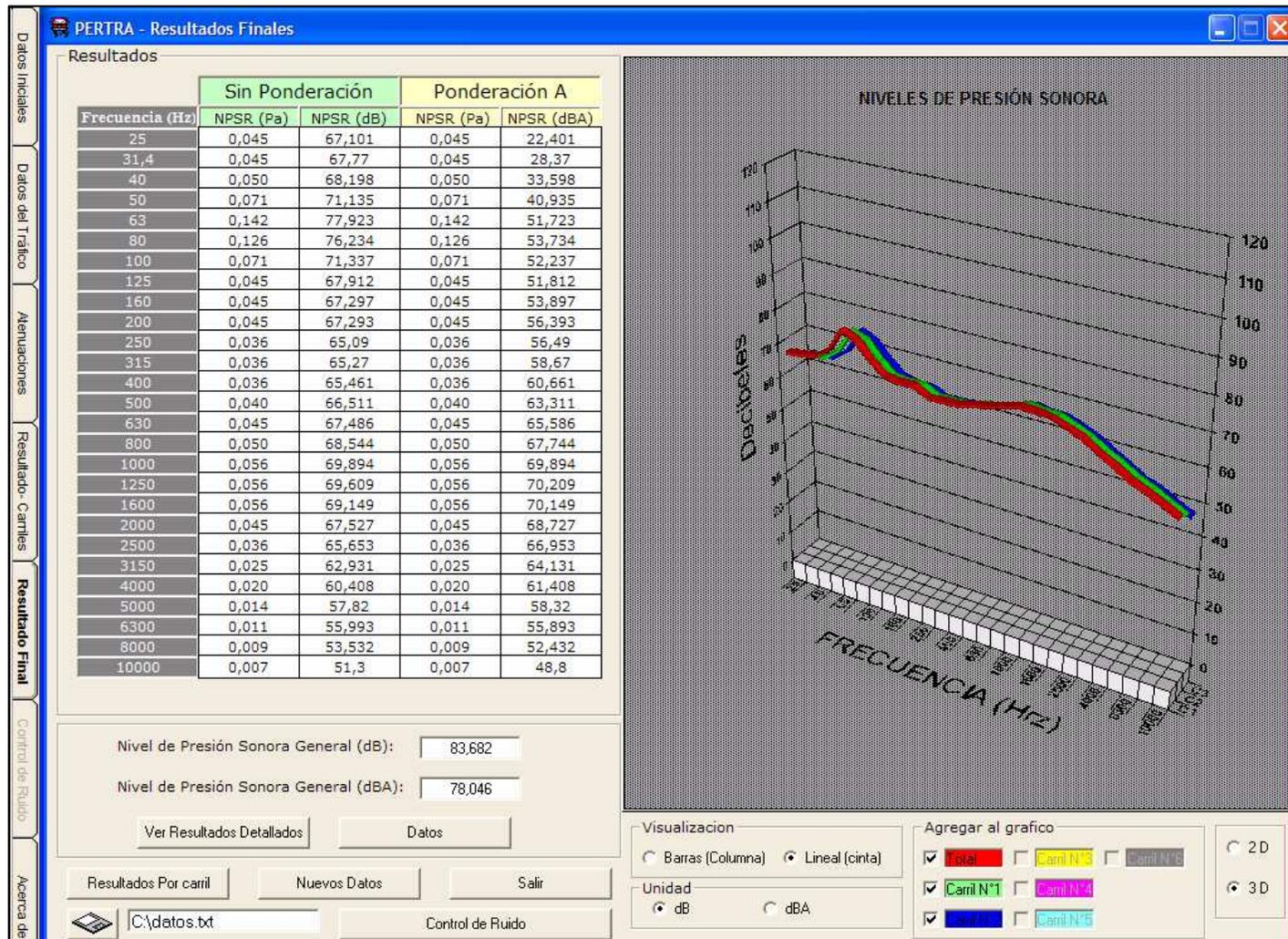


Fig. 5.25 Plantilla de resultados finales.
 (Fuente: Elaboración Propia)

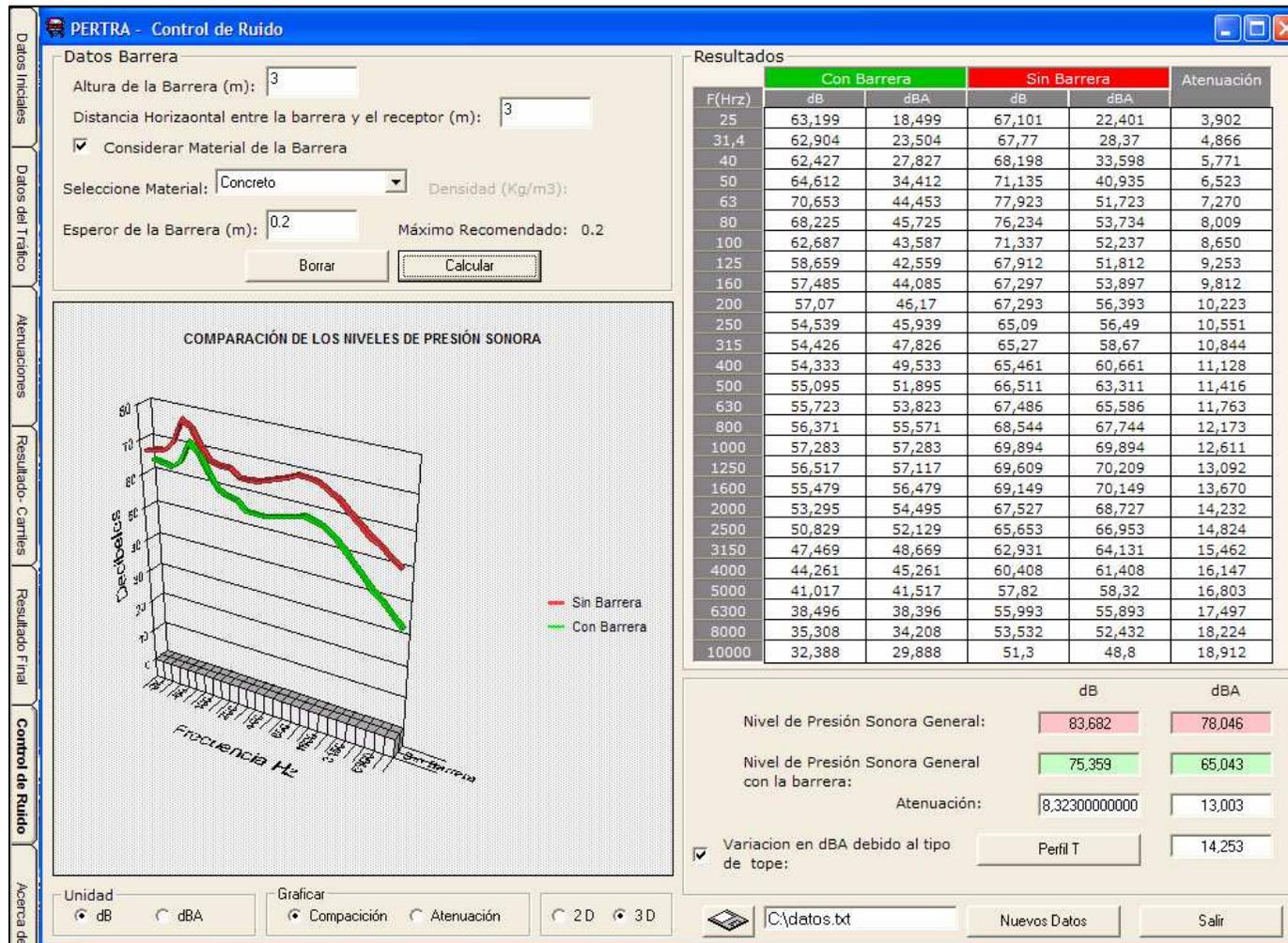


Fig. 5.26 Plantilla de control de ruido.
(Fuente: Elaboración Propia).

En la plantillas de resultados finales y control de ruido se generan archivos .txt, en los cuales se coloca los datos suministrados al programa, así como un resumen de los resultados obtenidos tanto para la generación como para el control, en el anexo (A.8) se muestra los archivos generados para el ejemplo anterior.

5.3.5 VALIDACIÓN.

Manteniendo los datos del ejemplo anterior y sólo variando la altura del receptor y la distancia a la carretera, en el siguiente cuadro se muestra los niveles de presión sonora general obtenidos por el modelo simplificado, el modelo C.o.R.T.N. y por medio de mediciones de campo efectuadas por la FHWA, publicadas por la Federal Highway administration del Departamento del Transporte de los Estados Unidos, en la página Web <http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/measure/appdd.htm#sec4>.

Tabla 5.8 Comparación de los resultados Obtenidos por mediciones de campo, el PERTRAF y el Modelo CoRTN

Altura del receptor (m)	Distancia a la línea central del carril uno (m).	Distancia a la línea central del carril dos (m).	Mediciones efectuadas por FHWA (dBA).	Modelo Simplificado (dBA)	CoRTN (dBA)
1,5	7,5	11,1	80,264	78,046	76,322
1,5	30	33,6	64,825	69,472	68,074
4,5	30	33,6	71,626	69,472	70,174
7,5	30	33,6	78,0285	77,390	71.311

(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa que los resultados obtenidos por el modelo simplificado son considerablemente cercanos a los medidos, con un error promedio con respecto a estos valores, de 2 dBA. También es notorio que para los receptores de 1,5 y 4,5 m de altura se obtiene el mismo nivel de presión sonora, según el modelo simplificado, esto se debe a que la atenuación del suelo para estas dos situaciones es la misma

(Anexo A.6). En lo referente al modelo CoRTN la diferencia varía entre 1 dBA y 6 dBA, lo cual se traduce en un error de entre 1% y 9%.

Otra comparación se puede realizar partiendo de una situación donde el nivel de presión sonora por metro de longitud de la fuente para una vía con dos canales para el PERTRAF y el modelo Harmonoise es dado por la tabla 5.9. Correspondiente con un flujo del tráfico para cada carril de 3000 vehículos ligeros, 100 vehículos pesados medios y 50 vehículos pesados por hora, todos a 50 km/h en una superficie de camino de referencia (DAC⁴¹ 0/11 - SMA 0/11) a una temperatura ambiente de 15 °C y con un receptor ubicado a 4 m de alto.

En la tabla 5.9 se observa que a las mismas condiciones de disposición de la fuente, receptor y demás variables, existe cierta diferencia entre las frecuencias de cada 1/3 banda de octava en un rango aproximadamente entre 7dB y 2dB, lo cual se traduce en un resultado aceptable. Adicionalmente se tomó en cuenta en el modelo simplificado, la humedad relativa del entorno (50%), y la distancia del receptor a la línea central de 7 m, por lo que esta última contribuye de alguna forma a la diferencia de frecuencias entre modelos, además de los ángulos que forman el vector que va desde el receptor hasta el inicio del tramo de estudio (60°) y el vector que va desde el receptor hasta el final del tramo de estudio (-60°)

⁴¹ DAC = dense asphalt concrete = concreto asfáltico denso

Tabla 5.9 Nivel de presión sonora por metro de longitud de fuente

Frecuencia (Hz)	Harmonoise	PERTRAF
25	71.1	64.53
32	71.4	65.77
40	72.2	66.00
50	74.5	67.07
63	79.7	74.55
80	76.9	74.38
100	72.5	68.96
125	72.5	66.25
160	71.2	65.72
200	74.5	66.04
250	73.3	62.99
315	73.7	63.35
400	71.3	62.90
500	68.7	63.26
630	68.3	64.04
800	66.3	64.26
1000	66.6	64.16
1250	66.3	62.97
1600	66.4	62.44
2000	66.1	60.95
2500	64.6	58.95
3150	62.8	56.75
4000	61.3	54.50
5000	59.0	52.04
6300	57.8	50.92
8000	55.2	48.40
10000	54.1	46.67

(Fuente: Performance of the Harmonoise WP 3 Engineering method in urban situations - test cases, 2005)

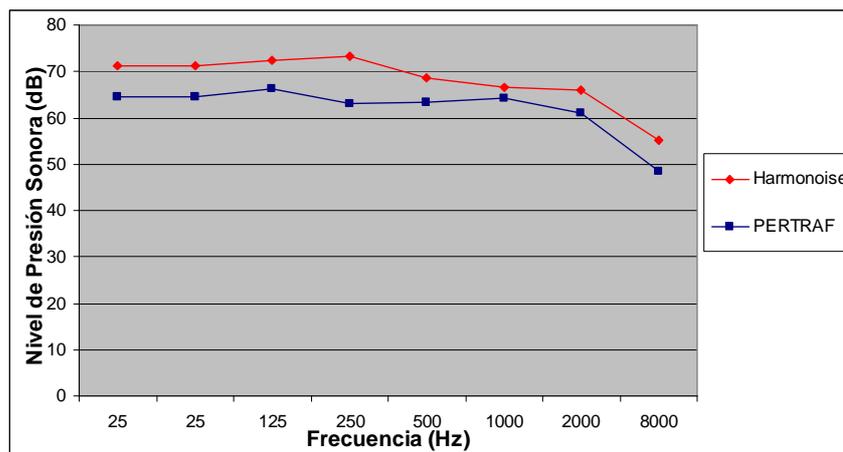


Fig. 5.27 Nivel de presión sonora por metro de longitud de fuente (Fuente: Elaboración Propia).

Para dar una validación más completa, se considero la generación de ruido a partir de un receptor a una altura de 7.5m y a una distancia a la línea central de la vía de 13.5m, con un flujo vehicular de 1261 vehículos por hora (1031 vehículos ligeros, 61 vehículos medianos, 169 vehículos pesados), una humedad relativa de 44%, temperatura de 293°K, y una superficie de la vía impermeable, con una propagación sin obstrucciones, obteniendo como resultado un nivel de presión sonora general de 84.41dB, y de 81.34 dB en el modelo diseñado.

fre	(DB)	Nivel de Presión Sonora General (dB)
25	86,57825384	
63	74,61985573	
125	96,94535979	
250	68,11231022	
500	74,12449600	
1000	80,01902643	
2000	77,21062492	
8000	95,40148074	

84.4181684127593

Fig. 5.28 Resultado modelo Holandés
(Fuente: Elaboración propia).

Adicionalmente considerando un flujo de motocicletas en ambos modelos se aprecia que para un flujo de 300 motos / hora a la velocidad promedio de 96 km/h se obtiene un nivel de presión sonora general de 84,4184 dB y de 81,56 dB para el modelo del trabajo especial de grado, por lo que se destaca una diferencia de décimas con la adición del flujo de motocicletas en comparación del modelo sin tomar en cuenta dicho flujo.

fre	(DB)	Nivel de Presión Sonora General (dB) 84,4184633698127
25	86,57828619	
63	74,62388687	
125	96,94546284	
250	68,25334076	
500	74,14050502	
1000	80,02344713	
2000	77,21448289	
8000	95,40149479	

Fig. 5.29 Resultado modelo Holandés con el flujo de motocicletas
(Fuente: Elaboración propia).

La situación siguiente se da para el caso del nomograma, cuyas variables que intervienen son: el receptor esta a 150 m de la vía de una autopista infinitamente largo llevando un flujo de 2400 vehículos por hora a una velocidad de 97 km/h, conteniendo un 5% de camiones pesados del total, a una temperatura de 293°K y humedad relativa de 40%

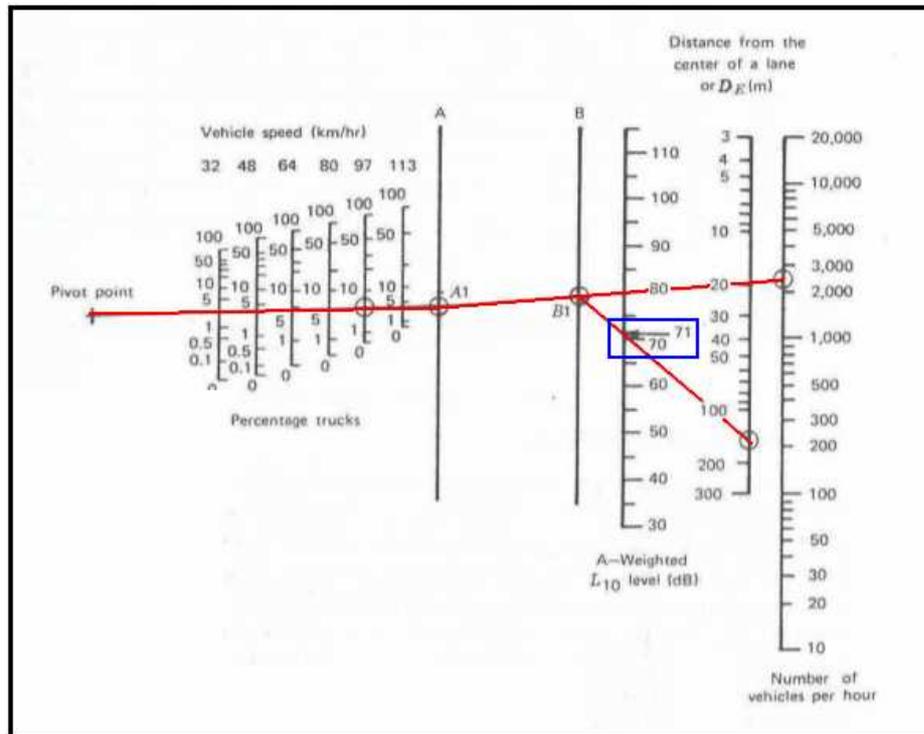


Fig. 5.30 Método del nomograma para predecir la generación de ruido en autopista
(Fuente: Magrab).

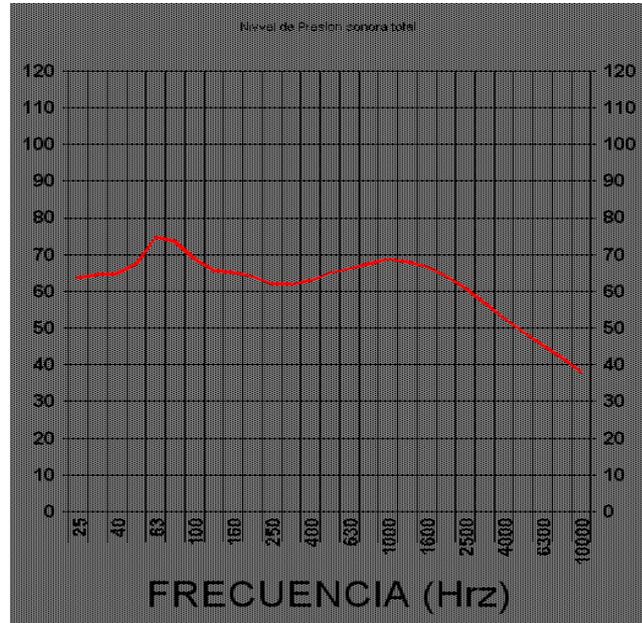


Fig. 5.31 Datos de frecuencia de banda 1/3 octava del modelo diseñado (Fuente: Elaboración propia).

El nivel de presión sonora del nomograma como se observa en la Fig 5.30 fue de 71dBA, que en comparación con el modelo diseñado, se registró una diferencia de 4dBA aproximadamente (75,72 dBA en el Modelo del Trabajo de Grado).

En lo que respecta a barreras anti-ruido se propone la siguiente: Un carril en el que pasen 3000 vehículos ligeros en una hora a una velocidad promedio de 90Km/h se decide instalar una pantalla de 3 m de altura a 15.2 m de dicha vía, estando el receptor a 22.9 m de la pantalla. Para el método del nomograma el uso de barreras anti-ruido registró cierta diferencia en la atenuación de 2dB (10.227 dBA – modelo propuesto / 12.5 dBA – nomograma) con respecto al modelo de este Trabajo Especial de Grado. Esto puede ser consecuencia de la imprecisión inherente de un método gráfico frente a las ecuaciones matemáticas del modelo simplificado.

	dB	dBA
Nivel de Presión Sonora General:	76,041	69,065
Nivel de Presion Sonora General con la barrera:	71,052	58,838
Atenuación:	4,98899999999	10,227

Fig. 5.32 Modelo Propuesto. Atenuación de la barrera (Elaboración propia).

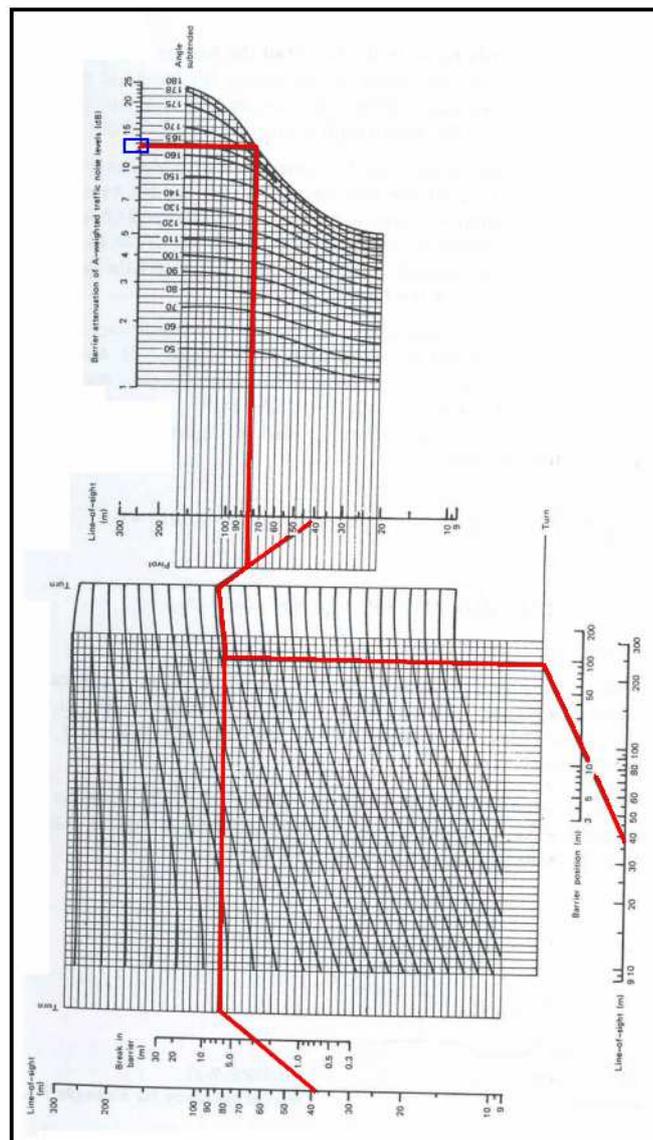


Fig. 5.33 Método del nomograma para predecir el control de ruido en autopista (Fuente: Magrab).

Además tomando los dato anteriores se comparo los resultados del PERTRAF con el nomograma variando la altura barrera, así como la distancia entre este y el receptor.

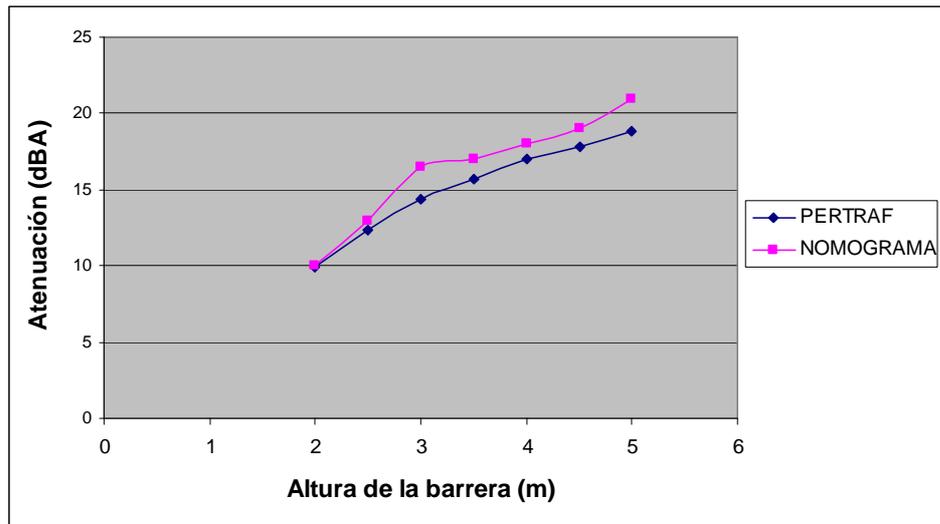


Fig 5.34 Comparación entre el PERTRAF y el Nomograma variando la altura de la barrera (Fuente: Elaboración Propia)

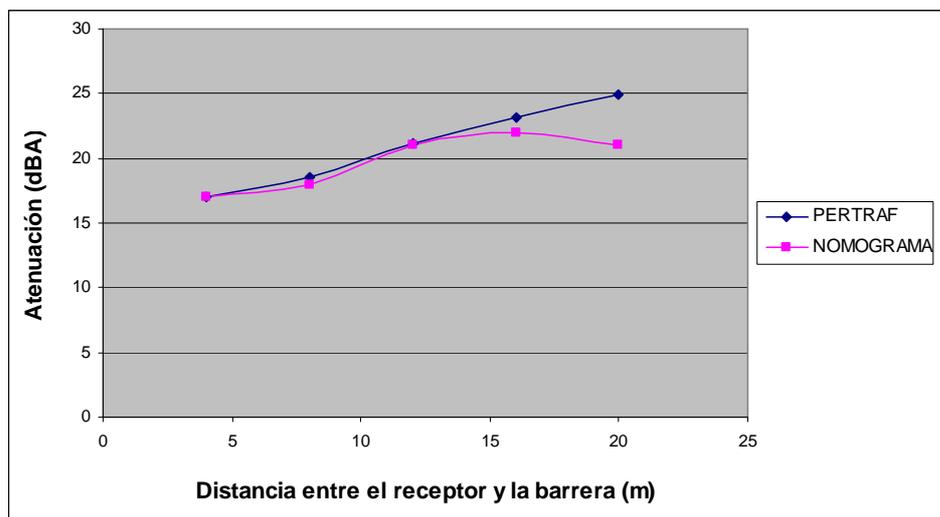


Fig 5.35 Comparación entre el PERTRAF y el Nomograma variando la distancia entre la barrera y el receptor (Fuente: Elaboración Propia)

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos por el programa desarrollado en este Trabajo Especial de Grado tiene un error promedio de 6 % en lo que a generación y propagación se refiere. Con respecto al modelo de control de ruido por pantallas acústicas el error promedio fue de 5%, esto según todas las comparaciones realizadas en el apartado de validación. Los resultados pueden considerarse como aceptables tomando en cuenta el tiempo de desarrollo y el equipo técnico de los modelos mencionados anteriormente.
2. El factor que condiciona la eficiencia de barrera acústica es la difracción en el Tope. Los rayos sonoros sufren un cambio de trayectoria afectando el nivel de presión sonora en la zona de sombra. Sin embargo, también influyen otros factores como, su longitud, la topografía del terreno, posición del receptor, posición de la pantalla, entre otros.
3. La pérdida de transmisión y su influencia en la pérdida de inserción es un asunto de interés para muchos diseñadores de barreras anti-ruido de carretera, a causa de que en materiales de poca densidad masiva, la pérdida de transmisión contrarrestará la pérdida de inserción. Es decir, las ondas sonoras viajarán a través de la barrera y reducirán el efecto protector de la barrera entre el receptor y la fuente sonora. Sin embargo, la transmisión a través de las barreras puede ser ignorada si la masa de superficie de la barrera es mayor a 20 kg/m^2 .
4. Los espesores de diseños para barreras acústicas tiene un límite, por lo cual al exceder este, no habrá ningún cambio en la atenuación de la pantalla, es decir, que se presenta la situación planteada en la teoría de Maekawa, donde

las pérdidas de transmisión son suficientemente altas como para evitar que las ondas sonoras pasen a través de la barrera.

5. La disposición de una barrera anti-ruido depende en su mayoría del acuerdo que se obtenga con la comunidad afectada por el ruido de autopista, ya que es ella la que conoce realmente la localización más adecuada de la barrera en las zonas aledañas en donde se requiera la atenuación del ruido de tráfico automotor.
6. Al ejecutar una situación de tráfico en autopista en el modelo propuesto se concluyó que a unas condiciones dadas, a mayor nivel de presión sonora general es mayor la velocidad promedio de los vehículos y viceversa, es decir, la velocidad promedio de los vehículos en general es directamente proporcional al nivel de presión sonora general. Este fenómeno se debe a que el ruido a propulsión tiene una mayor contribución a bajas velocidades.
7. En general, el tope de una barrera anti-ruido proporciona un rango de atenuación de entre 1 – 3dBA, dependiendo de la forma del perfil. Por esta razón no debe restársele importancia en el diseño de la barrera. Debido a que con la contribución de este factor puede disminuirse la altura, sin afectar el rendimiento.
8. Cuando se considera el flujo de motocicletas en las mediciones de ruido, se puede apreciar ciertos valores pico del NPS tanto en la generación como en el control de ruido. Esto es debido a que sólo se fijaron frecuencias específicas para su estudio por el hecho de que el ruido de este tipo de vehículo sólo tiene contribución de importancia en estas zonas del espectro, siendo también fuertemente apreciables en nivel de presión sonora general.

RECOMENDACIONES

Emplear el programa desarrollado en este Trabajo Especial de Grado o cualquier otro disponible en el mercado para elaborar un mapa de ruido de las autopistas de Caracas, sobre todo las más cercanas a áreas urbanas, como por ejemplo la autopista Valle-Coche o la autopista Francisco Fajardo. Los mapas de ruido son una importante herramienta para el diagnóstico, zonificación y planeamiento, los cuales deberían proporcionar la mayor información posible sobre el ruido existente en un área determinada.

En el modelo simplificado se hace el análisis de generación y propagación de ruido para una vía con alto nivel de flujo vehicular y sin interrupciones en el mismo. En futuros trabajos debe estudiarse y determinarse si es incidente ó de importancia en el nivel de ruido generado, el aporte que producen los vehículos detenidos pero con el sistema de propulsión en funcionamiento, situación que se produce, por ejemplo, en el área de parada de los semáforos. Según estudios previos de Harmonoise, este factor sí es de importancia y debe ser considerado.

Considerar otra clase de vehículos como son los híbridos, los eléctricos y los que funcionan transformando la energía solar, aunque en Venezuela prácticamente no existe tráfico de este tipo. Con esto se busca ampliar aun más el rango de aplicación tanto del modelo como del programa. Además emplear otros lenguajes de programación en la compilación y ejecución del modelo simplificado, como Matlab, MathCad, Maple, Mathematica, TurboPascal, etc, lo cual ayudaría a un gran número de potenciales usuarios a emplear, utilizar y mejorar lo desarrollado en este Trabajo Especial de Grado, además de llevarlo a distintas plataformas computacionales.

En el Trabajo Especial de Grado se han estudiado algunos modelos de generación y propagación de ruido del tráfico vehicular (Harmonoise, SCM, CoRTN, etc.), modelos versátiles, precisos y prácticos. Sin embargo, existen otros modelos que también estudian este fenómeno (bajo otras metodologías y enfoques), los cuales permitirían mejorar la comprensión de dicho fenómeno y posiblemente reestructurar el modelo simplificado propuesto por el Trabajo Especial de Grado.

Llevar a cabo el análisis del ruido en intersecciones, donde el estudio se desvía de las fuentes lineales como se trata en este Trabajo Especial de Grado. Por la importancia que conlleva el tráfico que se desarrolla en los cruces e intersecciones, donde los vehículos pueden estar detenidos pero encendidos, por tal motivo se generan un conjunto de situaciones donde el ruido de propulsión es de gran importancia.

En el Programa desarrollado en este Trabajo Especial de Grado no podrán ser alterados los valores y condiciones iniciales propuestos, luego de pasar a la etapa siguiente. Por lo que sería ideal alterar dichos datos durante la ejecución del Programa y de este modo hacer más cómodo su uso.

BIBLIOGRAFÍA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. ALT, N, 2004; “**Acoustic behavior of new combustion process concepts for gasolines engines**” Inter Noise 2004, República Checa.
2. AZZURRO. A, 2000; “**Una revisión de los modelos predictivos de ruido urbano**”, Tecni-Acústica, España.
3. BERANEK, Leo, 1.971; “**Noise and Vibration Control**”, Editorial Mc Graw Hill, Estados Unidos.
4. BERANEK, Leo, 1.954; “**Acoustics**”, Editorial Mc Graw Hill, Estados Unidos.
5. BEUVING, Margreet, 2004 “**Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment**”, Imagine Project, Holanda.
6. BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL CERVANTES, “**El aislamiento acústico y la normativa existente**”, España.
7. BLOM, Ron, 2004 “**Generation mechanisms, influence of tyre parameters and experiment on belt resonances**” Dynamics and Control Technology Group, Eindhoven, Holanda.
8. BOOTHBY, Thomas, 1994, “**Development of Wood Highway Sound Barriers**” Forest Product Laboratory, Estados Unidos.
9. BRADLEY, J.S, 2002; “**A Mathematical model for a single screen barrier in open-plan offices**” Nacional Research Council Canada, Canada.
10. CROKER M. J., 1975; “**Noise and noise control**”, C.R.C. Press, , Lafayette, Indiana.
11. CRTN, 2000; “**Enviromental noise control – Lecture 6**”, University of Bradford, Reino Unido.
12. EVEREST, F.Alton, 2.001; “**The Master Handbook of Acoustic**”, Editorial Mc Graw Hill, Estados Unidos.

13. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2003; “**Making Sound Decisions About Highway Noise Abatement**” PENNDOT Publication, Estados Unidos.
14. GACETA 4418, abril de 1992: “**Bases para el plan nacional de conservación, defensa y mejoramiento del ambiente**”, diciembre, 1998, ministerio de ambiente y recursos naturales renovables. Venezuela
15. GOVERNMENT OF THE HONG KONG SAR, 2003, “**Guidelines on design of Noise Barrier**”, Enviromental Protection Department, Hong Kong.
16. HENDRIKS, Rudy, 1.998; “**Technical Noise Supplement**”, California Department of Transportation, Estados Unidos.
17. HORINOUCI, Nariaki, 2001; “**COSMO-V, an Aerodynamic Noise Simulator**” R & D Review Toyota CRDL, Japón.
18. IMMA, 1996; “**Motorcycle Noise: The Curious Silence**”, Unión Europea.
19. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, “**ISO 9613-1:1996 Accoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere**”, ISO, Estados Unidos.
20. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, “**ISO 9613-2:1996 Accoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 2: General method of calculation**”, ISO, Estados Unidos.
21. JEBASISNKI, Rolf, 2000; “**Calculation of the tail-pipe noise of exhaust system with wave**” Eberspächer, Alemania.
22. JONASSON, Hans / WATTS Greg, 2004; “**Source Modelling of road vehicles**” IST.
23. KEULEMANS, Christina, 2005; “**Sound power measurements on heavy vehicles to study propulsion noise**” Imagine Project, Holanda.
24. KEULEN, W van, 2005; “**Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise**” IPG, Holanda.
25. KINSLER, Lawrence E. / FREY Austin R, 1.962; “**Fundamentals of Acoustic**”, John Wiley & Son, Inc, Londres, Inglaterra.

26. KOGAN “**Análisis de la Eficiencia de la Ponderación “A” para evaluar efectos de ruido en el ser humano**”, Valdivia Chile, 2004
27. LAM, Y.W, 1995; “**Sabine and Random Incidence Absortion Coefficient**” University of Salford, Reino Unido.
28. LAMANCUSA, John, 2.000; “**Noise Control**”, Penn State Publications, Estados Unidos.
29. LAROUSSE, 2003; “**El pequeño Larousse**” Ediciones Larousse S.A, México.
30. MAGRAB, Edward, 1975; “**Enviromental Noise Control**”, A Wiley – Intersciense Publication, Canada.
31. McCALLUM-CLARK, Matthew, 2006; “**Transportation and noise: land use planning options for a quieter New Zealand**”, Land Transport New Zealand Research Report 299, Nueva Zelanda.
32. NOISE IMPACT OF LAND TRANSPORT, 2.000; “**Framework Development**”, Malcolm Hunt Associates, Reino Unido.
33. OLALLA, Eloy Pita, 1994; “**Las pantallas antiruido y sus presentaciones**” Ciencia y técnica de la ingeniería civil, España
34. PEETERS, Bert, 2004; “**Review of data needs for road noise source modelling**” Imagine Project, Holanda.
35. PETERS, Bert, 2.006; “**Assessment Programme for Parameters of the "general" European vehicle fleet**”, Imagine Project, Holanda
36. PHILLIPS, S, 2003; “**Study of medium and high speed tyre/road noise**” TRL, Reino Unido.
37. RUSSELL, Ivana, 2005; “**Resonadores de Helmholtz de boca rectangular y cuello de longitud pequeña**”, Tecni-Acústica, España.
38. SALOMONS, Erick, 2004; “**Deliverable 16 of the Harmonoise project**”, TNO, Holanda.
39. SANZ, Jorge M, 2006; “**Evaluación y medidas correctoras para reducir el ruido ambiental por infraestructura de transporte urbano**”, CEDEX, España.

40. SARIGUAL-KLIJN, Nesrin, 2000; **“Random and periodic square wave barriers in noise control”**, NOISE-CON 2000, Estados Unidos.
41. SE/SW FREEWAY, 2004; **“Noise Barrier Constructability Study”**, Parson Transportation Group, Estados Unidos
42. SHIGLEY, Joseph. *et al.*, 1.999; **“Diseño en Ingeniería Mecánica”**, Editorial Mc Graw Hill, 4ª edición, México.
43. SWART W.J.R, 2002; **“Experimental validation of a model for noise barrier attenuation”**, Inter-Noise, Estados Unidos
44. WATTS, G.R, 2000; **“Assessment of noise barrier diffraction using an in situ measurement technique”** TRL, Reino Unido
45. WATTS, Greg, 2005; **“Harmonoise prediction model for road traffic noise”** TRL, Reino Unido.
46. ZILL, Dennis, 1.997; **“Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado”**, International Thomson Editores, 6ª edición, México.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

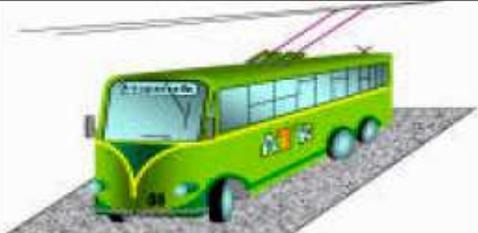
1. <http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/design/3.htm>
2. http://meweb.ecn.purdue.edu/~sqdh/SQDH2002_3/jtrp5%20w%20pics.html
3. http://meweb.ecn.purdue.edu/~sqdh/SQDH2002_3/jtrp5%20w%20pics.html
4. <http://www.cervantesvirtual.com/FichaObra.html?Ref=10811&ext=pdf&portal=0>
5. http://www.cerclebruit.ch/cerclebruit/publikat/publi_cb_pdf_bruit.html
6. <http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/measure/chap6.htm>
7. <http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/measure/chap6.htm>
8. http://www.dansmc.com/Exhaust_4.htm
9. <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/index.htm>

10. <http://www.monografias.com/trabajos14/impacto-ambiental/impacto-ambiental.shtml>
11. <http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/projects/>
12. http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/noise/guide_ref/design_barriers_content2.html
13. <http://www.fhwa.dot.gov/environment/probresp.htm#t6>
14. http://www.dot.state.oh.us/se/BDM/BDM2004/Section%20800/Text/Sec800_01-20-06.pdf
15. <http://www.gmavt.net/~mrna/ACT250/RSG050106C.pdf>
16. <http://www.soundplan.com/>
17. <http://www.imagine-project.org/artikel.php?ac=direct&id=289>
18. http://www.hmmh.com/rail_fta_manual/
19. <http://www.ia.uned.es/software/scientific/download/viewer/>
20. http://www.sportcompactcarweb.com/tech/9912scc_intake_exhaust_systems/
21. http://www.cmt.upv.es/I+D_Lineas_Inves_ruido.asp
22. <http://www.almuro.net/sitios/Mecanica/distribucion.asp?sw09=1>
23. <http://www.xs4all.nl/~rigolett/ENGELS/index.html>
24. http://www.fhwa.dot.gov/ENVIRonment/ab_noise.htm
25. http://www.pa.op.dlr.de/acoustics/essay1/emission_en.html
26. <http://www.aruvisa.net/aruvisa/cursol1a.htm>
27. <http://www.aruvisa.net/aruvisa/cursol1a.htm>
28. <http://www.inrets.fr/ur/lte/publications/publiacous.html>
29. http://www.carbibles.com/tyre_bible.html
30. <http://www.motorera.com/dictionary/car-dicr.htm>
31. http://www.search.com/reference/Noise_barrier
32. <http://www.piteraqa.dk/flight/muffler.html>
33. http://www.novibes.com/NoiseControl/tech_info/ntech.asp
34. <http://www.volpe.dot.gov/acoustics/pubs1.html>

ANEXOS
A.1 CATEGORIZACIÓN DE LOS VEHICULOS

Main type	No	Example of vehicle types	Illustration
Light vehicles	1a	Cars (incl MPV:s ≤ 7 seats)	
	1b	Vans, SUV, pickup trucks, RV, car+trailer or car+caravan ⁽¹⁾ , MPV:s with 8-9 seats	
	1c	Electric vehicles, and hybrid vehicles driven in electric mode	

<p>Medium heavy vehicles</p>	<p>2a Buses</p>	
	<p>2b Light trucks and heavy vans</p>	
	<p>2c Medium heavy trucks</p>	
	<p>2d Trolley buses</p>	

Heavy vehicles	3a	Buses	
	3b	Heavy trucks ¹	
	3c	Heavy trucks ¹	
	3d	Heavy trucks	
	3e	Trolley buses	
Two-wheelers	5a	Mopeds, scooters	
	5b	Motorcycles	

A.2 COEFICIENTES POR FRECUENCIAS PARA EL RUIDO POR RODADURA

Table 4.2. Rolling noise coefficients

freq [Hz]	Category 1		Category 2		Category 3	
	α_{RN}	β_{RN}	α_{RN}	β_{RN}	α_{RN}	β_{RN}
25	69.9	33.0	76.5	33.0	80.5	33.0
31.5	69.9	33.0	76.5	33.0	80.5	33.0
40	69.9	33.0	76.5	33.0	80.5	33.0
50	74.9	15.2	78.5	30.0	82.5	30.0
63	74.9	15.2	79.5	30.0	83.5	30.0
80	74.9	15.2	79.5	30.0	83.5	30.0
100	77.3	41.0	82.5	41.0	86.5	41.0
125	77.5	41.2	84.3	41.2	88.3	41.2
160	78.1	42.3	84.7	42.3	88.7	42.3
200	78.3	41.8	84.3	41.8	88.3	41.8
250	78.9	38.6	87.4	38.6	91.4	38.6
315	77.8	35.5	88.2	35.5	92.2	35.5
400	78.5	31.7	92.0	31.7	96.0	31.7
500	81.9	21.5	94.1	21.5	98.1	21.5
630	84.1	21.2	93.8	21.2	97.8	21.2
800	86.5	23.5	94.4	23.5	98.4	23.5
1000	88.6	29.1	93.2	29.1	97.2	29.1
1250	88.2	33.5	90.6	33.5	94.6	33.5
1600	87.6	34.1	91.9	34.1	95.9	34.1
2000	85.8	35.1	86.5	35.1	90.5	35.1
2500	82.8	36.4	83.1	36.4	87.1	36.4
3150	80.2	37.4	81.1	37.4	85.1	37.4
4000	77.6	38.9	79.2	38.9	83.2	38.9
5000	75.0	39.7	77.3	39.7	81.3	39.7
6300	72.8	39.7	77.3	39.7	81.3	39.7
8000	70.4	39.7	77.3	39.7	81.3	39.7
10000	67.9	39.7	77.3	39.7	81.3	39.7

A.3 COEFICIENTES POR FRECUENCIAS PARA EL RUIDO A PROPULSIÓN

Table 4.3. Traction noise coefficients

freq [Hz]	Category 1		Category 2		Category 3	
	α_T	β_T	α_T	β_T	α_T	β_T
25	90.0	0.0	94.0	0.0	97.7	0.0
31.5	92.0	0.0	94.7	0.0	97.3	0.0
40	89.0	0.0	95.5	0.0	98.2	0.0
50	91.0	0.0	95.5	0.0	103.3	0.0
63	92.4	0.0	98.5	0.0	109.5	0.0
80	94.8	0.0	98.4	0.0	104.3	0.0
100	90.8	0.0	94.0	0.0	99.8	0.0
125	86.8	0.0	93.5	0.0	100.2	0.0
160	86.2	0.0	92.2	0.0	98.9	0.0
200	84.5	0.0	92.6	0.0	99.5	0.0
250	84.5	9.4	93.7	11.7	100.7	11.7
315	84.8	9.4	94.0	11.7	101.2	11.7
400	83.5	9.4	94.3	11.7	100.6	11.7
500	81.8	9.4	91.2	11.7	100.2	11.7
630	81.4	9.4	89.4	11.7	97.4	11.7
800	79.0	9.4	89.1	11.7	97.1	11.7
1000	79.2	9.4	90.8	11.7	97.8	11.7
1250	81.4	9.4	91.3	11.7	97.3	11.7
1600	85.5	9.4	92.2	11.7	95.8	11.7
2000	85.8	9.4	91.9	11.7	94.9	11.7
2500	85.2	9.4	90.3	11.7	92.7	11.7
3150	82.9	9.4	88.2	11.7	90.6	11.7
4000	81.0	9.4	86.3	11.7	89.9	11.7
5000	78.2	9.4	84.3	11.7	87.9	11.7
6300	77.2	9.4	82.3	11.7	85.9	11.7
8000	75.2	9.4	81.3	11.7	83.8	11.7
10000	74.2	9.4	80.3	11.7	82.2	11.7

The noise emission coefficients α and β apply to cruising vehicles on a dry reference road surface and at a reference road surface temperature. For deviations from these conditions, the corrections C_{dc} and C_{surf} are to be calculated. If specific data on the average sound power output of the local car fleet is available by measurement, this may be incorporated in terms of the regional correction C_{region} . Such a correction should be endorsed by measurements that meet the requirements in [REF 1]

A.4 INFLUENCIA DEL TIPO DE PAVIMENTO EN EL NIVEL DE PRESIÓN SONORA, POR 1/3 DE OCTAVA PARA CADA CATEGORÍA DE VEHÍCULO

Table 6.12 Corrections for paving surfaces, Polish data

	Paving stones		Block pavings
	Category 1	Category 3	Category 1
100	1,9	4,5	-5,4
125	7,8	6,7	-1,1
160	9,8	8,5	0,4
200	8,6	3,7	0,8
250	9,1	1,1	2,3
315	9,0	1,2	1,0
400	8,4	5,9	-1,2
500	11,3	9,8	0,9
630	10,7	9,7	-0,9
800	9,2	6,5	0,1
1000	7,8	3,1	1,5
1250	4,7	1,7	1,4
1600	1,5	0,5	0,2
2000	1,2	0,3	-0,9
2500	0,2	1,0	-2,1
3150	-0,2	0,3	-2,6
4000	0,2	-0,9	-2,2
5000	0,1	0,2	-1,7
6300	-0,6	-0,4	-2,7
8000	-0,4	1,1	-2,5
10000	-0,9	0,3	-3,0



Figure 6.2 Block paving



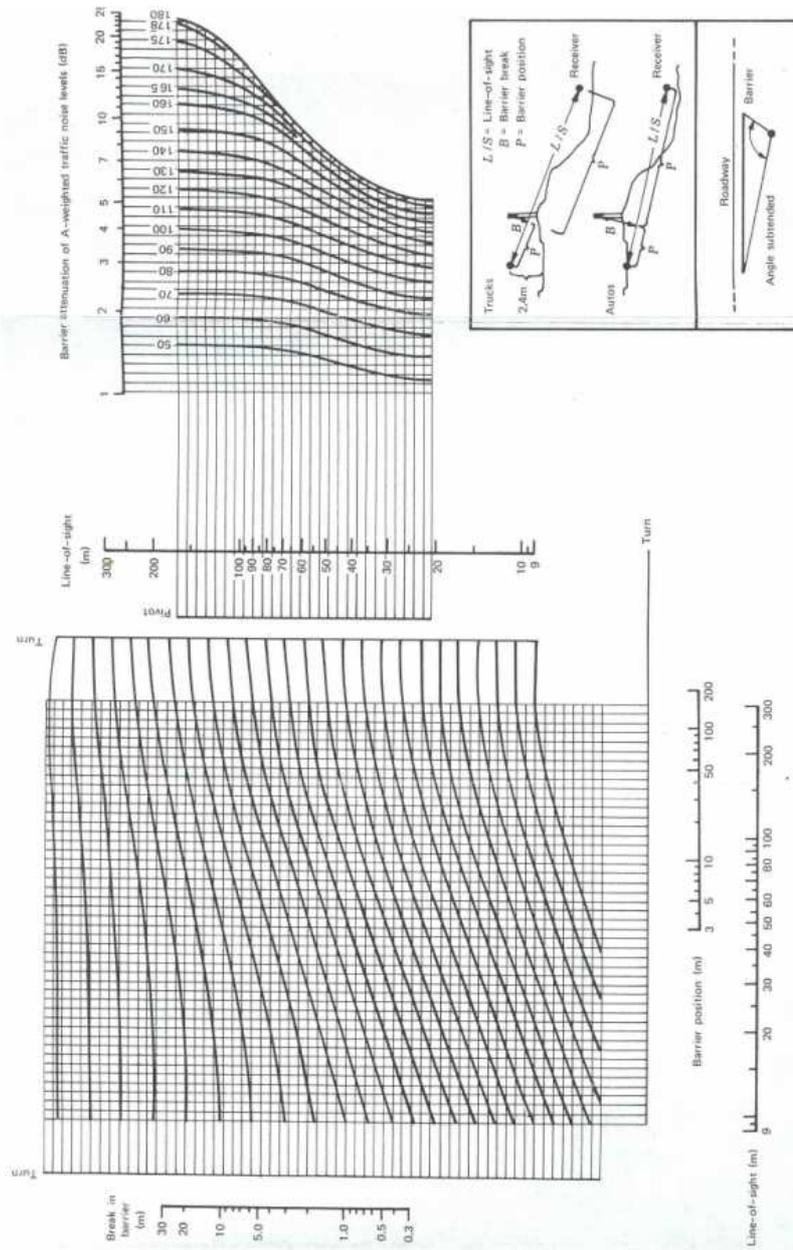
Figure 6.3 Paving stones

A.5 ALTURAS EFECTIVAS

<p>IN GENERAL: H_{eff} = sum of average path heights on either side of barrier</p>	
	$H_{eff} = \frac{H_s + 2H_b + H_r}{2} \quad (1)$
<p>Example 1: Source in shallow cut</p>	<p>For $B \leq A/2$,</p> $H_{eff} = \frac{H_s + 2H_b + H_c + H_r}{2}$ <p>* Otherwise use Equation (1)</p>
<p>Example 2: Receiver elevated</p>	<p>For $H_b \geq H_c$,</p> $H_{eff} = \frac{H_s + 2H_b - H_c + H_r}{2}$ <p>For $H_b \leq H_c$,</p> $H_{eff} = \frac{H_s + H_c + H_r}{2}$
<p>Example 3: Source in sloped cut</p>	<p>For $A \leq B/2$, use equation (1)</p> <p>For $A \geq B/2$,</p> $H_{eff} = \frac{H_s + 2H_b + H_c + H_r}{2}$
<p>Example 4: Source and receiver separated by trench</p>	<p>For $A \geq B/2$,</p> $H_{eff} = \frac{H_s + 2H_c + H_r}{2}$ <p>For $A \leq B/2$,</p> $H_{eff} = \frac{H_s + H_r}{2}$
<p>Source Heights:</p> <ul style="list-style-type: none"> $H_s = 8$ ft, trains with diesel-electric locomotives 2 ft, trains without diesel-electric locomotives 0 ft, automobiles 3 ft, 2-axle city buses 8 ft, 3-axle commuter buses <p>Note: Equations for H_{eff} remain valid even when $H_b = 0$.</p>	<p>Ground Factor</p> <p>For soft ground:</p> $G = \begin{cases} 0.66 & H_{eff} \leq 5 \\ 0.75 \left(1 - \frac{H_{eff}}{42} \right) & 5 \leq H_{eff} \leq 42 \\ 0 & H_{eff} \geq 42 \end{cases}$ <p>For hard ground: $G=0$</p>

Figure 6-5. Computation of Ground Factor G for Ground Attenuation

A.6 NOMOGRAMA DE BARRERAS



E.7-25 Nomograph to estimate the attenuation by a barrier of the A-weighted sound level of highway traffic noise. (From Reference 19.)

A.7 MATRIZ DE EVALUACION DEL TIPO DE TOPE DE BARRERA

<u>Barrier Type</u>	<u>Acoustic Performance</u>			<u>Availability / Economic Considerations</u>		<u>Constructability Considerations</u>		
	<u>Added IL* (dBA)</u>	<u>Potential reduced height (Range)</u>	<u>Potential reduced height (Average)</u>	<u>Special or proprietary material?</u>	<u>Additional cost</u>	<u>Foundation requirements</u>	<u>Structural issues</u>	<u>Drainage issues</u>
T-top barrier design	1 - 1.5	2 - 3	2.5	no	3	3	3	3
T-top design with absorptive material	2 - 3	4 - 6	5	no / yes	4	3	3	3
Y-top barrier design	0.5 - 1	1 - 2	1.5	no	4	3	3	4
Jagged-top barrier design	0 - 6	0 - 3	1.5	no	3	3	3	3
Cylindrical top treatment	2 - 3	3 - 4	3.5	yes	5	3	4	3
Mushroom-shaped top treatment	0.5 - 1	1 - 2	1.5	yes	4	3	4	3
Multiple-edge top treatments	1.9 - 4	3 - 5	4	no / yes	4	3	4	4
Active noise control top treatment	2 - 4	4 - 6	5	yes	5	3	3	3
Angled barrier design	0	0	0	no	4	5	5	4
Absorptive barrier material	1 - 3	2 - 5	3.5	yes	4	3	3	3
Transparent barrier material	0	0	0	no / yes	3	3	3	3
Woven metal barrier material	0	0	0	yes	5	4	3	3

IL = Insertion Loss

Rating Scale

- 1 Substantially better than conventional barrier
- 2 Somewhat better than conventional barrier
- 3 Similar to conventional barrier
- 4 Somewhat worse than conventional barrier
- 5 Substantially worse than conventional barrier

Figure 3. Evaluation Matrix

A.8 REGISTRO DE DATOS RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO

```

***** RESULTADOS FINALES DEL PROGRAMA PERTRAF *****

Altura del receptor: 1,5
Tipo de Pavimento: Concreto liso
Angulo 1: 63,5
Angulo 2: -63,5

*****

DATOS DEL TRAFICO CARRIL #1
Distancia a la línea central de la Carretera(m): 7,5

veh/h      velocidad(km/h)
vehículos Ligeros: 2424      95
vehículos Medianos: 69      95
vehículos Pesados: 189      95
Motocicletas: 0      0

*****

DATOS DEL TRAFICO CARRIL #2
Distancia a la línea central de la Carretera(m): 11,1

veh/h      velocidad(km/h)
vehículos Ligeros: 2400      95
vehículos Medianos: 67      95
vehículos Pesados: 242      95
Motocicletas: 0      0

*****

DATOS PARA EL CALCULO DE ATENUACIÓN
Atenuación de suelo: si se consideró
Topografica del Terreno: Área Plana
Porcentaje de suelo suave: 50

Atenuación por la presencia de edificaciones: No se consideró
Atenuación la presencia vegetación: No se consideró

*****
***** RESULTADOS EN dB *****
*****

F (Hz)      Carril #1      Carril #2      Carril #3      Carril #4      Carril #5      Carril #6      Total
25          64,944        63,029        0,000        0,000        0,000        0,000        67,101
31,4        65,659        63,626        0,000        0,000        0,000        0,000        67,77
40          66,069        64,083        0,000        0,000        0,000        0,000        68,198
50          68,883        67,204        0,000        0,000        0,000        0,000        71,135
63          75,710        73,935        0,000        0,000        0,000        0,000        77,923
80          74,137        72,065        0,000        0,000        0,000        0,000        76,234
100         69,225        67,191        0,000        0,000        0,000        0,000        71,337
125         65,958        63,503        0,000        0,000        0,000        0,000        67,912
160         65,340        62,895        0,000        0,000        0,000        0,000        67,297
200         65,342        62,879        0,000        0,000        0,000        0,000        67,293
250         63,113        60,723        0,000        0,000        0,000        0,000        65,09
315         63,288        60,909        0,000        0,000        0,000        0,000        65,27
400         63,418        61,204        0,000        0,000        0,000        0,000        65,461
500         64,438        62,303        0,000        0,000        0,000        0,000        66,511
630         65,448        63,222        0,000        0,000        0,000        0,000        67,486
800         66,516        64,261        0,000        0,000        0,000        0,000        68,544
1000        67,918        65,524        0,000        0,000        0,000        0,000        69,894
1250        67,653        65,203        0,000        0,000        0,000        0,000        69,609
1600        67,202        64,728        0,000        0,000        0,000        0,000        69,149
2000        65,591        63,086        0,000        0,000        0,000        0,000        67,527
2500        63,730        61,189        0,000        0,000        0,000        0,000        65,653
3150        61,015        58,455        0,000        0,000        0,000        0,000        62,931
4000        58,498        55,921        0,000        0,000        0,000        0,000        60,408
5000        55,913        53,325        0,000        0,000        0,000        0,000        57,82
6300        54,085        51,501        0,000        0,000        0,000        0,000        55,993
8000        51,611        49,065        0,000        0,000        0,000        0,000        53,532
10000       49,359        46,869        0,000        0,000        0,000        0,000        51,3

Nivel de Presión Sonora General(dBA): 83,682

```

 RESULTADOS EN dBA

F (Hz)	Carril #1	Carril #2	Carril #3	Carril #4	Carril #5	Carril #6	Total
25	20,244	18,329	0,000	0,000	0,000	0,000	22,401
31,4	26,259	24,226	0,000	0,000	0,000	0,000	28,37
40	31,469	29,483	0,000	0,000	0,000	0,000	33,598
50	38,683	37,004	0,000	0,000	0,000	0,000	40,935
63	49,510	47,735	0,000	0,000	0,000	0,000	51,723
80	51,637	49,565	0,000	0,000	0,000	0,000	53,734
100	50,125	48,091	0,000	0,000	0,000	0,000	52,237
125	49,858	47,403	0,000	0,000	0,000	0,000	51,812
160	51,940	49,495	0,000	0,000	0,000	0,000	53,897
200	54,442	51,979	0,000	0,000	0,000	0,000	56,393
250	54,513	52,123	0,000	0,000	0,000	0,000	56,49
315	56,688	54,309	0,000	0,000	0,000	0,000	58,67
400	58,618	56,404	0,000	0,000	0,000	0,000	60,661
500	61,238	59,103	0,000	0,000	0,000	0,000	63,311
630	63,548	61,322	0,000	0,000	0,000	0,000	65,586
800	65,716	63,461	0,000	0,000	0,000	0,000	67,744
1000	67,918	65,524	0,000	0,000	0,000	0,000	69,894
1250	68,253	65,803	0,000	0,000	0,000	0,000	70,209
1600	68,202	65,728	0,000	0,000	0,000	0,000	70,149
2000	66,791	64,286	0,000	0,000	0,000	0,000	68,727
2500	65,030	62,489	0,000	0,000	0,000	0,000	66,953
3150	62,215	59,655	0,000	0,000	0,000	0,000	64,131
4000	59,498	56,921	0,000	0,000	0,000	0,000	61,408
5000	56,413	53,825	0,000	0,000	0,000	0,000	58,32
6300	53,985	51,401	0,000	0,000	0,000	0,000	55,893
8000	50,511	47,965	0,000	0,000	0,000	0,000	52,432
10000	46,859	44,369	0,000	0,000	0,000	0,000	48,8

Nivel de Presión Sonora General(dBA): 78,046

***** RESULTADOS PARA LA COLOCACION DE UNA BARRERA *****

Altura de la Barrera: 3
 Distancia entre la barrera y el receptor: 3
 Material: Concreto
 Espesor (m): 0.2
 Tipo de Tono: Perfil T

 RESULTADOS

F (Hz)	dB	dBA	Atenuación
25	67,101	22,401	3,902
31,4	67,770	28,370	4,866
40	68,198	33,598	5,771
50	71,135	40,935	6,523
63	77,923	51,723	7,270
80	76,234	53,734	8,009
100	71,337	52,237	8,650
125	67,912	51,812	9,253
160	67,297	53,897	9,812
200	67,293	56,393	10,223
250	65,090	56,490	10,551
315	65,270	58,670	10,844
400	65,461	60,661	11,128
500	66,511	63,311	11,416
630	67,486	65,586	11,763
800	68,544	67,744	12,173
1000	69,894	69,894	12,611
1250	69,609	70,209	13,092
1600	69,149	70,149	13,670
2000	67,527	68,727	14,232
2500	65,653	66,953	14,824
3150	62,931	64,131	15,462
4000	60,408	61,408	16,147
5000	57,820	58,320	16,803
6300	55,993	55,893	17,497
8000	53,532	52,432	18,224
10000	51,300	48,800	18,912

Nivel de Presión Sonora General con Barrera (dB): 75,359
 Nivel de Presión Sonora General con Barrera (dBA): 65,043
 Atenuación (dB): 8,32300000000001
 Atenuación (dBA): 13,003
 Variación debido al tope de la barrera (dBA): 14,253

A.9 NORMAS SOBRE EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN GENERADA POR RUIDO.

Los casos de ruido generado por actividades comerciales, domésticas y sociales, tales como: fiestas, uso de equipos de sonido, artefactos eléctricos, equipos de aire acondicionado, hidroneumáticos, etc., que causen molestias en el vecindario, están considerados como alteración del orden público y serán sometidos al conocimiento de las jefaturas civiles y autoridades municipales, según su competencia.

CAPÍTULO II. De los niveles de ruido ambiental

Artículo 5.

Se consideran niveles de ruido tolerables, los que se indican a continuación:

a) Ruido continuo equivalente (Leq):

<i>Periodo Diurno</i>	<i>Periodo Nocturno</i>
6:30 am-9:30 pm	9:31 pm-6:29 am
Zona I 55 dBA	45 dBA
Zona II 60 dBA	50 dBA
Zona III 65 dBA	55 dBA
Zona IV 70 dBA	60 dBA
Zona V 75 dBA	65 dBA

b) Ruido que no podrá ser excedido durante más del 10% del lapso de medición (L10):

<i>Periodo Diurno</i>	<i>Periodo Nocturno</i>
Zona I 60 dBA	50 dBA
Zona II 65 dBA	55 dBA
Zona III 70 dBA	60 dBA
Zona IV 75 dBA	65 dBA
Zona V 80 dBA	70 dBA

A.10 LISTADO DEL PROGRAMA

A Continuación se expone el código desarrollado para cada formulario numerado en el orden de aparición:

Formulario de presentación:

```
Dim seg As Integer
Dim Entrada As Integer

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)

frmPre.Hide      `frmPre es el nombre del formulario de presentación.
frmPes.Show      `frmPes es el nombre del formulario con las pestañas del proceso.
Form3.Show       `frmPre es el nombre del formulario para introducir datos iniciales.
End Sub

Private Sub Form_Load()
    lblVersion.Caption = "Versión " & App.Major & "." & App.Minor & "." & App.Revision
    Entrada = Entrada + 1
End Sub

Private Sub Frame1_Click()
If Entrada = 1 Then
    frmSplash.Hide
    frmPes.Show
    frmPre.Show
End If
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
If Entrada = 1 Then
    seg = seg + 1
    If seg = 3 Then
        frmSplash.Hide
        frmPes.Show
        frmPre.Show
    End If
End If
End Sub
```

Formulario para introducir datos iniciales:

```

Dim Entrada As Integer

Private Sub ChkAng_Click()
    'ChkAng es el check box para determinar se van a
    'tomar los valores máximos para los ángulos.
    If ChkAng.Value = 1 Then
        txtAng2.Text = 63.5
        'txtAng2 es una caja de texto para introducir los
        'valores de  $\theta_2$ .
        txtAng1.Text = -63.5
        'txtAng1 es una caja de texto para introducir los
        'valores de  $\theta_1$ .
        txtAng2.Locked = True
        txtAng1.Locked = True
    Else
        txtAng2.Text = ""
        txtAng1.Text = ""
        txtAng2.Locked = False
        txtAng1.Locked = False
    End If
End Sub

Private Sub Form_Load()
    CboCanales.AddItem "Un Canal"
    'CboCanales es la lista para seleccionar el
    'número de canales
    CboCanales.AddItem "Dos Canales"
    CboCanales.AddItem "Tres Canales"
    CboCanales.AddItem "Cuatro Canales"
    CboCanales.AddItem "Cinco Canales"
    CboCanales.AddItem "Seis Canales"
    CboPavimento.AddItem "Asfalto Poroso"
    'CboPavimento es la lista para seleccionar el
    'material del suelo de la carretera.
    CboPavimento.AddItem "Concreto liso"
    CboPavimento.AddItem "Stone mastic Asphalt (SMA)"
    CboPavimento.AddItem "Asfalto Empedrado"
    frmPes.SSTabl.TabEnabled(0) = True
End Sub

Private Sub CmdInt_Click()
    'CmdInt es el botón con texto introducir datos.
    Unload FrmAyu
    If txtAlt.Text = "" Or txtAng2.Text = "" Or txtAng1.Text = "" Or CboCanales.Text = ""
    Or CboPavimento.Text = "" Then
        'txtAlt es una caja de texto para introducir la
        'altura.
        GoTo fin
    End If
    Da_entra = Da_entra + 1
    If Da_entra > 1 Then
        If textPavimento <> CboPavimento.Text Or textcarriles <> CboCanales.Text Or
        Angulo2 <> txtAng2.Text Or Angulo1 <> txtAng1.Text Or h <> Val(txtAlt.Text) Then
            cambio = 1
        End If
        If cambio = 1 Then
            Resp = MsgBox("A cambiado los datos Iniciales ¿Dese Continuar?", vbQuestion +
            vbYesNo, "Cuidado")
            If Resp <> 6 Then
                CboPavimento.Text = textPavimento
                txtAlt.Text = h
                txtAng2.Text = Angulo2
                txtAng1.Text = Angulo1
                GoTo fin
            End If
        End If
    End If
End Sub

```

```

Select Case CboPavimento.Text
  Case Is = "Asfalto Poroso"
    Surf = 1
    textPavimento = "Asfalto Poroso"
  Case Is = "Concreto liso"
    Surf = 2
    textPavimento = "Concreto liso"
  Case Is = "Stone mastic Asphalt (SMA)"
    Surf = 3
    textPavimento = "Stone mastic Asphalt (SMA)"
  Case Is = "Asfalto Empedrado"
    Surf = 4
    textPavimento = "Asfalto Empedrado"
End Select
Select Case CboCanales.Text
  Case Is = "Un Canal"
    Carriles = 1
    textcarriles = "Un Canal"
  Case Is = "Dos Canales"
    Carriles = 2
    textcarriles = "Dos Canales"
  Case Is = "Tres Canales"
    Carriles = 3
    textcarriles = "Tres Canales"
  Case Is = "Cuatro Canales"
    Carriles = 4
    textcarriles = "Cuatro Canales"
  Case Is = "Cinco Canales"
    Carriles = 5
    textcarriles = "Cinco Canales"
  Case Is = "Seis Canales"
    Carriles = 6
    textcarriles = "Seis Canales"
End Select
Angulo2 = txtAng2.Text
Angulo1 = txtAng1.Text
h = Val(txtAlt.Text)
frmPes.SSTabl.Tab = 1
frmpes.SSTabl.SetFocus
frmDatosIni.Hide
frmDatosTra.Show
fin: End Sub

Private Sub CmdBorrar_Click() 'CmdBorrar es el botón con texto Borrar Datos.
Unload Me
frmDatoaIni.Show
End Sub
Private Sub CmdSalir_Click() 'CmdSalir es el botón con texto salir.
End
End Sub

Private Sub CmdInt_Click() 'CmdInt es el botón con el signo de interrogación.
If Entrada Mod 2 = 0 Then
  FrmAyu.Show 'FrmAyu es el formulario de ayuda .
  frmDatosIni.Left = 3165
End If
If Entrada Mod 2 <> 0 Then
  Unload FrmAyu
  frmDatosIni.Left = 4395
End If
Entrada = Entrada + 1
End Sub
Private Sub txtAlt_LostFocus()
If txtAlt.Text <> "" Then
  If IsNumeric(txtAlt.Text) = False Then

```

```

    MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
    txtAlt.Text = ""
End If
End Sub

Private Sub txtAng2_LostFocus()
If txtAng2.Text <> "" Then
    If Val(txtAng2.Text) < Val(txtAng1.Text) Or Val(txtAng2.Text) = Val(txtAng1.Text)
    Then
        MsgBox "Este Angulo Debe ser Menor que el Anterior", vbInformation, "Alerta"
        Text2.Text = ""
    End If
    If IsNumeric(txtAng2.Text) = False Then
        MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
        txtAng2.Text = ""
    End If
End If
End Sub

Private Sub txtAng1_LostFocus()
If txtAlt.Text <> "" Then
    If Val(txtAng2.Text) > Val(txtAng1.Text) Or Val(txtAng2.Text) = Val(txtAng1.Text)
    Then
        MsgBox "Este Angulo Debe ser Mayor que el Anterior", vbInformation, "Alerta"
        txtAng1.Text = ""
    End If
    If IsNumeric(txtAng1.Text) = False Then
        MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
        txtAng1.Text = ""
    End If
End If
End Sub

```

Formulario con imágenes de ayuda.

```

Private Sub Form_Load()
If frmDatosIni.Visible = True Then
    frmAyu.Left = 10110
    frmAyu.Top = 2505
    frmAyu.Height = 3480
    frmAyu.Width = 5025
    pctVeh(0).Visible = False
    pctVeh(1).Visible = False
    pctVeh(2).Visible = False
    pctVeh(3).Visible = False
Else
    frmAyu.Left = 10000
    frmAyu.Top = 1935
    If veh(0) = 1 Then
        frmAyu.Caption = "Vehiculos Ligeros"
        pctVeh(0).Visible = True
        pctVeh(1).Visible = False
        pctVeh(2).Visible = False
        pctVeh(3).Visible = False
        veh(0) = 0
    End If
    If veh(1) = 1 Then
        frmAyu.Caption = "Vehiculos de peso Medio"
        pctVeh(0).Visible = False
        pctVeh(1).Visible = True
        pctVeh(2).Visible = False
        pctVeh(3).Visible = False
        veh(1) = 0
    End If

```

```

If veh(2) = 1 Then
    frmAyu.Caption = "Vehiculos Pesados"
    pctVeh(0).Visible = False
    pctVeh(1).Visible = False
    pctVeh(2).Visible = True
    pctVeh(3).Visible = False
    veh(2) = 0
End If
If veh(3) = 1 Then
    frmAyu.Caption = "Motocicletas"
    pctVeh(0).Visible = False
    pctVeh(1).Visible = False
    pctVeh(2).Visible = False
    pctVeh(3).Visible = True
    veh(3) = 0
End If
End If
End Sub

```

Formularios para introducir datos del tráfico, (se coloca el código de formulario del carril uno, como ejemplo):

```

Private Sub Form_Load()
Dim i As Integer
'MATRIZ de frecuencias
fre(1) = 25: fre(2) = 31.4: fre(3) = 40: fre(4) = 50: fre(5) = 63: fre(6) = 80: fre(7)
= 100:fre(8) = 125: fre(9) = 160: fre(10) = 200: fre(11) = 250
fre(12) = 315: fre(13) = 400:fre(14) = 500: fre(15) = 630: fre(16) = 800
fre(17) = 1000: fre(18) = 1250: fre(19) = 1600:fre(20) = 2000: fre(21) = 2500 fre(22)
= 3150: fre(23) = 4000: fre(24) = 5000: fre(25) = 6300:fre(26) = 8000 fre(27) = 10000
'MATRIZ Ar vehículos ligeros
Ar(1, 1) = 69.9: Ar(2, 1) = 69.9: Ar(3, 1) = 69.9: Ar(4, 1) = 74.9
Ar(5, 1) = 74.9:Ar(6, 1) = 74.9: Ar(7, 1) = 79.3: Ar(8, 1) = 82.5
Ar(9, 1) = 81.3: Ar(10, 1) = 80.9:Ar(11, 1) = 78.9: Ar(12, 1) = 78.8
Ar(13, 1) = 80.5: Ar(14, 1) = 85.7: Ar(15, 1) = 87.7: Ar(16, 1) = 89.2
Ar(17, 1) = 90.6: Ar(18, 1) = 89.9: Ar(19, 1) = 89.4: Ar(20, 1) = 87.6
Ar(21, 1) = 85.6: Ar(22, 1) = 82.5: Ar(23, 1) = 79.6: Ar(24, 1) = 76.8
Ar(25, 1) = 74.5:Ar(26, 1) = 71.9: Ar(27, 1) = 69
'MATRIZ Ar vehículos medianos
Ar(1, 2) = 76.5: Ar(2, 2) = 76.5: Ar(3, 2) = 76.5: Ar(4, 2) = 78.5
Ar(5, 2) = 79.5:Ar(6, 2) = 79.5: Ar(7, 2) = 82.5: Ar(8, 2) = 84.3
Ar(9, 2) = 84.7: Ar(10, 2) = 84.3:Ar(11, 2) = 87.4: Ar(12, 2) = 88.2
Ar(13, 2) = 92: Ar(14, 2) = 94.1: Ar(15, 2) = 93.8:Ar(16, 2) = 94.4
Ar(17, 2) = 92.2: Ar(18, 2) = 89.6: Ar(19, 2) = 88.9: Ar(20, 2) = 86.5
Ar(21, 2) = 83.1: Ar(22, 2) = 81.1: Ar(23, 2) = 79.2: Ar(24, 2) = 77.3
Ar(25, 2) = 77.3:Ar(26, 2) = 77.3: Ar(27, 2) = 77.3
'MATRIZ Ar vehículos Pesados
Ar(1, 3) = 79.5: Ar(2, 3) = 79.5: Ar(3, 3) = 79.5: Ar(4, 3) = 81.5
Ar(5, 3) = 82.5:Ar(6, 3) = 82.5: Ar(7, 3) = 82.5: Ar(8, 3) = 87.3
Ar(9, 3) = 87.7: Ar(10, 3) = 87.3: Ar(11, 3) = 90.4: Ar(12, 3) = 91.2
Ar(13, 3) = 95: Ar(14, 3) = 97.1: Ar(15, 3) = 96.8:Ar(16, 3) = 97.4
Ar(17, 3) = 95.2: Ar(18, 3) = 92.6: Ar(19, 3) = 91.9: Ar(20, 3) = 89.5
Ar(21, 3) = 86.1: Ar(22, 3) = 84.1: Ar(23, 3) = 82.2: Ar(24, 3) = 80.3
Ar(25, 3) = 80.3:Ar(26, 3) = 80.3: Ar(27, 3) = 80.3
'MATRIZ Br
Br(1, 1) = 33: Br(2, 1) = 33: Br(3, 1) = 33: Br(4, 1) = 30: Br(5, 1) = 30:
Br(6, 1) = 30: Br(7, 1) = 41: Br(8, 1) = 41.2: Br(9, 1) = 42.3: Br(10, 1) = 41.8
Br(11, 1) = 38.6: Br(12, 1) = 35.5: Br(13, 1) = 31.7: Br(14, 1) = 21.5
Br(15, 1) = 21.2:Br(16, 1) = 23.5: Br(17, 1) = 29.1: Br(18, 1) = 33.5
Br(19, 1) = 34.1: Br(20, 1) = 35.1:Br(21, 1) = 36.4: Br(22, 1) = 37.4
Br(23, 1) = 38.9: Br(24, 1) = 39.7: Br(25, 1) = 39.7:Br(26, 1) = 39.7
Br(27, 1) = 39.7
'MATRIZ Ap vehículos ligeros

```

```

Ap(1, 1) = 85.8: Ap(2, 1) = 87.6: Ap(3, 1) = 87.5: Ap(4, 1) = 87.5
Ap(5, 1) = 96.6: Ap(6, 1) = 97.2: Ap(7, 1) = 91.5: Ap(8, 1) = 86.7
Ap(9, 1) = 86.8: Ap(10, 1) = 84.9: Ap(11, 1) = 86: Ap(12, 1) = 86
Ap(13, 1) = 85.9: Ap(14, 1) = 80.6: Ap(15, 1) = 80.2: Ap(16, 1) = 77.8
Ap(17, 1) = 78: Ap(18, 1) = 81.4: Ap(19, 1) = 82.3: Ap(20, 1) = 82.6
Ap(21, 1) = 81.5: Ap(22, 1) = 80.7: Ap(23, 1) = 78.8: Ap(24, 1) = 77
Ap(25, 1) = 76: Ap(26, 1) = 74: Ap(27, 1) = 72
'MATRIZ Ap vehículos medianos
Ap(1, 2) = 97: Ap(2, 2) = 97.7: Ap(3, 2) = 98.5: Ap(4, 2) = 98.5
Ap(5, 2) = 101.5: Ap(6, 2) = 101.4: Ap(7, 2) = 97: Ap(8, 2) = 96.5
Ap(9, 2) = 95.2: Ap(10, 2) = 99.6: Ap(11, 2) = 100.7: Ap(12, 2) = 101
Ap(13, 2) = 98.3: Ap(14, 2) = 94.2: Ap(15, 2) = 92.4: Ap(16, 2) = 92.1
Ap(17, 2) = 93.8: Ap(18, 2) = 94.3: Ap(19, 2) = 95.2: Ap(20, 2) = 94.9
Ap(21, 2) = 93.3: Ap(22, 2) = 91.2: Ap(23, 2) = 89.3: Ap(24, 2) = 87.3
Ap(25, 2) = 85.3: Ap(26, 2) = 84.3: Ap(27, 2) = 83.3
'MATRIZ Ap vehículos Pesados
Ap(1, 3) = 97.7: Ap(2, 3) = 97.3: Ap(3, 3) = 98.2: Ap(4, 3) = 103.3
Ap(5, 3) = 109.5: Ap(6, 3) = 105.3: Ap(7, 3) = 100.8: Ap(8, 3) = 101.2
Ap(9, 3) = 99.9: Ap(10, 3) = 102.3: Ap(11, 3) = 103.5: Ap(12, 3) = 104
Ap(13, 3) = 101.6: Ap(14, 3) = 99.2: Ap(15, 3) = 99.4: Ap(16, 3) = 95.1
Ap(17, 3) = 95.8: Ap(18, 3) = 95.3: Ap(19, 3) = 93.8: Ap(20, 3) = 93.8
Ap(21, 3) = 92.7: Ap(22, 3) = 91.6: Ap(23, 3) = 90.9: Ap(24, 3) = 87.9
Ap(25, 3) = 87.9: Ap(26, 3) = 81.8: Ap(27, 3) = 80.2
'MATRIZ Bp vehículos ligeros'
Bp(1, 1) = 0: Bp(2, 1) = 0: Bp(3, 1) = 0: Bp(4, 1) = 0: Bp(5, 1) = 0
Bp(6, 1) = 0: Bp(7, 1) = 0: Bp(8, 1) = 0: Bp(9, 1) = 0: Bp(10, 1) = 0: Bp(11, 1) = 8.2: Bp(12, 1) = 8.2: Bp(13, 1) = 8.2
Bp(14, 1) = 8.2: Bp(15, 1) = 8.2: Bp(16, 1) = 8.2: Bp(17, 1) = 8.2
Bp(18, 1) = 8.2: Bp(19, 1) = 8.2: Bp(20, 1) = 8.2: Bp(21, 1) = 8.2
Bp(22, 1) = 8.2: Bp(23, 1) = 8.2: Bp(24, 1) = 8.2: Bp(25, 1) = 8.2
Bp(26, 1) = 8.2: Bp(27, 1) = 8.2
'MATRIZ Bp vehículos medianos y pesados
Bp(1, 2) = 0: Bp(2, 2) = 0: Bp(3, 2) = 0: Bp(4, 2) = 0: Bp(5, 2) = 0
Bp(6, 2) = 0: Bp(7, 2) = 0: Bp(8, 2) = 0: Bp(9, 2) = 0: Bp(10, 2) = 0: Bp(11, 2) = 8.5: Bp(12, 2) = 8.5: Bp(13, 2) = 8.5: Bp(14, 2) = 8.5: Bp(15, 2) = 8.5: Bp(16, 2) = 8.5: Bp(17, 2) = 8.5
Bp(18, 2) = 8.5: Bp(19, 2) = 8.5: Bp(20, 2) = 8.5: Bp(21, 2) = 8.5
Bp(22, 2) = 8.5: Bp(23, 2) = 8.5: Bp(24, 2) = 8.5: Bp(25, 2) = 8.5
Bp(26, 2) = 8.5: Bp(27, 2) = 8.5
'Matriz A para las motos
Am(5) = 26.7: Am(8) = 35.4: Am(11) = 41.8: Am(14) = 44.4: Am(17) = 40.9: Am(20) = 41.2: Am(23) = 37.8: Am(26) = 31.6
'MATRIZ DBA
DBA(1) = -44.7: DBA(2) = -39.4: DBA(3) = -34.6: DBA(4) = -30.2: DBA(5) = -26.2: DBA(6) = -22.5: DBA(7) = -19.1: DBA(8) = -16.1: DBA(9) = -13.4: DBA(10) = -10.9: DBA(11) = -8.6: DBA(12) = -6.6: DBA(13) = -4.8: DBA(14) = -3.2: DBA(15) = -1.9: DBA(16) = -0.8: DBA(17) = 0: DBA(18) = 0.6: DBA(19) = 1: DBA(20) = 1.2
DBA(21) = 1.3: DBA(22) = 1.2: DBA(23) = 1: DBA(24) = 0.5: DBA(25) = -0.1
DBA(26) = -1.1: DBA(27) = -2.5
a = 1
For i = 0 To 3
chkCat(i).Value = 1          'chkCat(i) es el vector de check box para determinar
                              cuales categorías de vehículos se van a considerar en
                              este carril

Next i
frmPes.SSTabl.TabEnabled(1) = True
If a = Carriles Then
    CmdCont.Caption = "Calculo de Atenuaciones"
Else
    CmdCont.Caption = "Siguiente Carril"
End If
For i = 0 To 3
    veh(i) = 0
Next i
End Sub

```

```

Private Sub CmdInt_Click(Index As Integer)      'CmdInt(i) es el vector de botones con
                                                el signo de interrogación.
Dim j As Integer: Dim i As Integer
Dim no(1 To 3) As Integer
Dim N(1 To 3) As Integer
For i = 0 To 3
  If i = Index Then
    veh(i) = 1
  Else
    j = j + 1
    N(j) = i
  End If
Next i
If IsFormLoaded(Form24) = False Then
  frmAyu.pctVeh(Index).Visible = True
  frmAyu.pctVeh(N(1)).Visible = False
  frmAyu.pctVeh(N(2)).Visible = False
  frmAyu.pctVeh(N(3)).Visible = False
  frmAyu.Show
  frmDatosTra.Left = 1700
Else
  If frmAyu.pctVeh(N(1)).Visible = True Or frmAyu.pctVeh(N(2)).Visible = True Or
  frmAyu.pctVeh(N(3)).Visible = True Then
    Unload frmAyu
    frmAyu.Show
    frmDatosTra.Left = 1700
  Else
    Unload frmAyu
    frmDatosTra.Left = 4395
  End If
End If
End Sub
Private Sub CmdDatosIni_Click() 'CmdDatosIni es el botón con el texto Datos
  iniciales.
  frmDatosTra.Hide
  frmDatosIni.Show
  frmPes.SSTabl.Tab = 0
  frmPes.SSTabl.SetFocus
End Sub

Private Sub chkCat_Click(Index As Integer)
Dim i As Integer
For i = 0 To 3
  If chkCat(i).Value = 1 Then
    txtFlu(i).Enabled = True      'txtFlu(i) es el vector de las caja de texto para
    txtVel(i).Enabled = True      'txtVel(i) es el vector de las caja de texto para
                                  introducir el flujo de vehículos.
                                  introducir la velocidad promedio.
  Else
    txtFlu(i).Enabled = False
    txtVel(i).Enabled = False
  End If
  If txtFlu(i).Enabled = False And chkCat(i).Value = 0 Then
    txtFlu(i).Text = 0
  End If
  If txtVel(i).Enabled = False And chkCat(i).Value = 0 Then
    txtVel(i).Text = 0
  End If
  If txtFlu(i).Enabled = True And Val(txtFlu(i).Text) = 0 Then
    txtFlu(i).Text = ""
  End If
  If txtVel(i).Enabled = True And Val(txtVel(i).Text) = 0 Then

```

```

        txtVel(i).Text = ""
    End If
Next i
End Sub

Private Sub CmdCont_Click() 'Command1 es el botón con texto siguiente carril o
                             atenuaciones dependiendo del numero de carriles

Dim lwr(1 To 27, 1 To 3) As Single
Dim lwp(1 To 27, 1 To 3) As Single
Dim lw(1 To 27, 1 To 4) As Double
Dim lwm(5 To 26, 4) As Double
Dim cs, i, j, p, c As Integer
Dim Resp As Integer
Dim cambio As Integer
Dim temp As Double: Dim temp1 As Double

txtDis.BackColor = vbWhite 'txtDis es la caja de texto para introducir la
                             distancia a la línea central.

For i = 0 To 3
    txtFlu(i).BackColor = vbWhite
    txtVel(i).BackColor = vbWhite
Next i
If txtDis.Text = "" Then
    txtDis.BackColor = vbRed
End If
For i = 0 To 3
    If txtFlu(i).Text = "" Or txtVel(i).Text = "" Then
        If txtFlu(i).Text = "" Then
            txtVel(i).BackColor = vbRed
        End If
        If txtVel(i).Text = "" Then
            txtVel (i).BackColor = vbRed
        End If
    End If
Next i
For i = 0 To 3
    If txtFlu(i).Text = "" Or txtVel(i).Text = "" Or txtDis.Text = "" Then
        MsgBox "Debe introducir un valor Numerico en los Cuadros Resaltados", vbCritical,
            "Alerta"
        GoTo fin
    End If
Next i
If Entra(1) > 1 Then
    For i = 0 To 3
        If fl(i, 1) <> txtFlu(i).Text Or ve(i, 1) <> txtVel(i).Text Or DistanciaLc(1) <>
            txtDis.Text Then
            cambio = 1
        End If
    Next i
    If cambio = 1 Then
        Resp = MsgBox("A cambiado los datos en este Carril ¿Desea Continuar?",
            vbQuestion + vbYesNo, "Cuidado")
        If Resp <> 6 Then
            For i = 0 To 3
                txtFlu(i).Text = fl(i, 1)
                txtVel(i).Text = ve(i, 1)
                txtDis.Text = DistanciaLc(1)
            Next i
            GoTo fin
        End If
    End If
End If
For i = 0 To 3
    If txtFlu(i).Text = "" Or txtVel(i).Text = "" Then
        fl(i, 1) = 0
    End If
Next i

```

```

    ve(i, 1) = 0
  Else
    fl(i, 1) = txtFlu(i).Text
    ve(i, 1) = txtVel(i).Text
  End If
Next i
For j = 1 To 3
  If Surf = 1 And Val(txtVel(j - 1).Text) < 50 Then
    cs = 0
  End If
  If Surf = 1 And Val(txtVel(j - 1).Text) >= 50 Then
    cs = -5
  End If
  If (Surf = 2 And Val(txtVel(j - 1).Text) < 50) Then
    cs = 0
  End If
  If (Surf = 2 And Val(txtVel(j - 1).Text) >= 50) Then
    cs = -2
  End If
  If (Surf = 3 And Val(txtVel(j - 1).Text) > 50) Then
    cs = 0
  End If
  If (Surf = 4 And Val(txtVel(j - 1).Text) < 100) Then
    cs = 3
  End If
  If (Surf = 4 And Val(txtVel(j - 1).Text) > 100) Then
    cs = 4
  End If
  For i = 1 To 27
    If Val(txtVel(j - 1).Text) = 0 Then
      lwr(i, j) = 0
    Else
      lwr(i, j) = Ar(i, j) + Br(i, j) * logd(Val(txtVel(j - 1).Text) / 70) + cs
    End If
    If j <= 2 Then
      p = j
    Else
      p = 2
    End If
    If Val(txtVel(j - 1).Text) = 0 Then
      lwp(i, j) = 0
    Else
      If Val(txtVel(j - 1).Text) = 70 Then
        lwp(i, j) = Ap(i, j)
      Else
        lwp(i, j) = Ap(i, j) + Bp(i, p) * logd(Abs(Val(txtVel(j - 1).Text) - 70) / 70)
      End If
    End If
  Next i
Next j
For j = 1 To 3
  For i = 1 To 27
    If lwr(i, j) = 0 And lwp(i, j) = 0 Then
      lw(i, j) = 0
    Else
      lw(i, j) = 10 * logd(10 ^ (lwr(i, j) / 10) + 10 ^ (lwp(i, j) / 10))
    End If
  Next i
Next j
For i = 5 To 26 Step 3
  If Val(txtVel(3).Text) = 0 Then
    lw(i, 4) = 0
  Else
    lw(i, 4) = Am(i) + 28.9 * logd(Val(txtVel(3).Text))
  End If

```

```

End If
Next i
For j = 1 To 4
For i = 1 To 27
If Val(txtVel(j - 1).Text) = 0 Or Val(txtVel(i).(j - 1).Text) = 0 Or lw(i, j) = 0
Then
lwf(i, j, 1) = 0
Else
lwf(i, j, 1) = lw(i, j) + 10 * logd(Val(txtVel(i).(j - 1).Text) / (1000 *
Val(txtVel(j - 1).Text)))
End If
Next i
Next j
For i = 1 To 27
templ = 0
Temp = 0
For j = 1 To 4
If lwf(i, j, 1) > 0 Then
temp = 10 ^ (lwf(i, j, 1) / 10)
Else
temp = 0
End If
templ = templ + temp
Next j
If templ <> 0 Then
lwc(i, 1) = 10 * logd(templ)
Else
lwc(i, 1) = 0
End If
Next i
DistanciaLc(1) = txtDis.Text
leg(1) = Abs(Tan((Angulo2 * 3.141519) / 180) * Val(Text3.Text) - Tan((Angulo1 *
3.141519) / 180) * (txtDis.Text))
If Angulo1 = 0 Then
lon(1) = Abs(Tan((Angulo2 * 3.141519) / 180) * txtDis.Text)
End If
If Angulo2 = 0 Then
lon(1) = Abs(Tan((Angulo1 * 3.141519) / 180) * txtDis.Text)
End If
If Abs(Angulo1) = Abs(Angulo2) Then
lon(1) = txtDis.Text
Else
If Angulo1 < 0 And Angulo2 > 0 Then
If Abs(Angulo1) > Abs(Angulo2) Then
lon(1) = Sqr((Tan((Angulo1 * 3.141519) / 180) * Val(txtDis.Text) - leg(1) / 2)
^ 2 + Val(txtDis.Text) ^ 2)
Else
lon(1) = Sqr((Tan((Angulo2 * 3.141519) / 180) * Val(txtDis.Text) - leg(1) / 2)
^ 2 + Val(txtDis.Text) ^ 2)
End If
End If
If Angulo2 < 0 Then
lon(1) = Sqr((leg(1) / 2 + Text3.Text * Tan((Angulo2 * 3.141519) / 180)) ^ 2 +
Val(txtDis.Text) ^ 2)
Else
If Angulo1 > 0 Then
lon(1) = Sqr((leg(1) / 2 + txtDis.Text * Tan((Angulo1 * 3.141519) / 180)) ^ 2 +
Val(txtDis.Text) ^ 2)
End If
End If
End If
Form1.Hide
If IsFormLoaded(frmAte) Then
a = 1
End If

```

```
If a = Carriles Then
    frmAte.Show
    a = 0
    frmPes.SSTabl.Tab = 2
    frmPes.SSTabl.SetFocus
Else
    frmDatosTra2.Show
End If
Unload frmAyu
fin: End Sub
Private Sub Text1_LostFocus(Index As Integer)
Dim i As Integer
For i = 0 To 3
    If txtFlu(i).Text <> "" Then
        If IsNumeric(txtFlu(i).Text) = False Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
            txtFlu(i).Text = ""
        End If
        If Val(txtFlu(i).Text) < 0 Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
            txtFlu(i).Text = ""
        End If
    End If
End If
Next i
End Sub

Private Sub txtVel_LostFocus(Index As Integer)
Dim i As Integer
For i = 0 To 3
    If txtVel(i).Text <> "" Then
        If IsNumeric(txtVel (i).Text) = False Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
            txtVel(i).Text = ""
        End If
        If Val(txtVel(i).Text) < 0 Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
            txtVel(i).Text = ""
        End If
    End If
End If

Next i
End Sub
Private Sub txtDis_LostFocus()
If Text3.Text <> "" Then

    If IsNumeric(txtDis.Text) = False Then

        MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
        txtDis.Text = ""
    End If
    If Val(txtDis.Text) < 0 Then
        MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
        txtDis.Text = ""
    End If
End If
End Sub
Private Sub CmdBorrar_Click()
Dim i As Integer
Text3.Text = ""
For i = 0 To 3
    txtFlu(i).Text = ""
    txtVel(i).Text = ""
    chkCat(i).Value = 1
```

```
Next i
End Sub
```

Formulario para introducir datos sobre atenuaciones.

```
Dim i As Integer

Private Sub Form_Load()
fraSuelo.Enabled = False 'fraSuelo es el Marco de los objetos para el cálculo de la
                           atenuación del suelo
fraEdif.Enabled = False 'fraEdif es el Marco de los objetos para el cálculo de la
                           atenuación de los edificios.
fraVeg.Enabled = False 'fraVeg es el Marco de los objetos para el cálculo de la
                           atenuación de la vegetación.

For i = 0 To 4
OptTop(i).Enabled = False 'OptTop(i) es el vector de los botones de opcion para el
                           tipo de topografía.
Next i
For i = 0 To 4
txtEdif(i).Visible = False 'txtEdif(i) es el vector de cuadros de texto para el
                           cálculo de atenuación de edificaciones.
Next i
For i = 1 To 4
txtSuelo(i).Visible = False 'txtsuelo(i) es el vector de cuadros de texto para el
                           cálculo de atenuación del suelo.
Next i
txtVeg(0).Visible = False: txtVeg(1).Visible = False
Label11.Enabled = False: Label12.Enabled = False: Label13.Enabled = False
Label15.Enabled = False: Label18.Enabled = False: Label19.Enabled = False
Label111.Enabled = False: Label112.Enabled = False: Label18.Enabled = False
Label16.Enabled = False: Label19.Enabled = False: Label17.Enabled = False
Label10.Enabled = False: Label14.Enabled = False:
Optveg1.Enabled = False: OptVeg2.Enabled = False: OptVeg3.Enabled = False
chkSuelo.Value = False: chkVeg.Value = False: chkEdif3.Value = False
pctBarrera.Visible = False
CmdInt.Visible = False
For i = 0 To 4
pctTop(i).Visible = False
Next i
frmPes.SSTab1.TabEnabled(2) = True
End Sub

Private Sub chkSuelo_Click()
If chkSuelo.Value = 1 Then
For i = 0 To 4
OptTop(i).Enabled = True
Next i
Label11.Enabled = True: Label12.Enabled = True: Label13.Enabled = True
Label15.Enabled = True: Label18.Enabled = True
fraSuelo.Enabled = True

For i = 1 To 4
txtSuelo(i).Visible = True
Next i
Else
For i = 0 To 4
OptTop(i).Enabled = False
pctTop(i).Visible = False
Next i
For i = 1 To 4
txtSuelo(i).Visible = False
Next i
End If
End Sub
```

```

Label11.Enabled = False: Label12.Enabled = False: Label13.Enabled = False
Label15.Enabled = False: Label18.Enabled = False
fraSuelo.Enabled = False
End If
End Sub
Private Sub chkVeg_Click()
If Check2.Value = 1 Then
fraVeg.Enabled = True
OptVeg1.Enabled = True: OptVeg2.Enabled = True: OptVeg3.Enabled = True
txtVeg(0).Visible = True: txtVeg(1).Visible = True
Label11.Enabled = True: Label12.Enabled = True: Label19.Enabled = True
Else
fraVeg.Enabled = False
OptVeg1.Enabled = False: OptVeg2.Enabled = False: OptVeg3.Enabled = False
txtVeg(0).Visible = False: txtVeg(1).Visible = False
Label11.Enabled = False: Label12.Enabled = False: Label19.Enabled = False
End If
End Sub

Private Sub chkEdif_Click()
If chkEdif.Value = 1 Then
fraEdif.Enabled = True
For i = 0 To 4
txtEdif(i).Visible = True
Next i
Label8.Enabled = True: Label6.Enabled = True: Label9.Enabled = True
Label7.Enabled = True: Label10.Enabled = True: Label4.Enabled = True
CmdInt.Visible = True
Else
fraEdif.Enabled = False
For i = 0 To 4
txtEdif(i).Visible = False
Next i
Label8.Enabled = False: Label6.Enabled = False: Label9.Enabled = False
Label7.Enabled = False: Label10.Enabled = False: Label4.Enabled = False
CmdInt.Visible = False
End If
End Sub

Private Sub CmdRes_Click()
Dim c As Integer
Dim Cl, h, fn, fo, cs As Double
Dim he(1 To 6) As Double
Dim lre(1 To 6) As Double
Dim Dp As Double
Dim De As Double
txtAbs(0).BackColor = vbWhite
txtAbs(1).BackColor = vbWhite
For i = 1 To 4
txtSuelo(i).BackColor = vbWhite
Next i
For i = 0 To 1
txtVeg(i).BackColor = vbWhite
Next i
For i = 0 To 4
txtEdif(i).BackColor = vbWhite
Next i
If txtAbs(0).Text = "" Then
txtAbs(0).BackColor = vbRed
End If
If txtAbs(1).Text = "" Then
txtAbs(1).BackColor = vbRed
End If
If fraSuelo.Enabled = True Then

```

```
For i = 1 To 4
  If txtSuelo(i).Text = "" Then
    txtSuelo(i).BackColor = vbRed
  End If
Next i
End If
If fraVeg.Enabled = True Then
  For i = 0 To 1
    If txtVeg(i).Text = "" Then
      txtVeg(i).BackColor = vbRed
    End If
  Next i
End If
If fraEdif.Enabled = True Then
  For i = 0 To 4
    If txtEdif(i).Text = "" Then
      txtEdif(i).BackColor = vbRed
    End If
  Next i
End If
For i = 0 To 1
  If txtAbs(i).Text = "" Then
    MsgBox "Debe introducir un valor Numerico en los Cuadros Resaltados", vbCritical,
    "Alerta"
    GoTo fin
  End If
Next i
If fraSuelo.Enabled = True Then
  For i = 1 To 4
    If txtSuelo(i).Text = "" And txtSuelo(i).Visible = True Then
      MsgBox "Debe introducir un valor Numerico en los Cuadros Resaltados",
      vbCritical, "Alerta"
      GoTo fin
    End If
  Next i
End If
If fraVeg.Enabled = True Then
  For i = 0 To 1
    If txtVeg(i).Text = "" And txtVeg(i).Visible = True Then
      MsgBox "Debe introducir un valor Numerico en los Cuadros Resaltados",
      vbCritical, "Alerta"
      GoTo fin
    End If
  Next i
End If
If fraEdif.Enabled = True Then
  For i = 0 To 4
    If txtEdif(i).Text = "" Then
      MsgBox "Debe introducir un valor Numerico en los Cuadros Resaltados",
      vbCritical, "Alerta"
    GoTo fin
    End If
  Next i
End If
If fraSuelo.Enabled = True Then
  If optTop(0).Value = False And optTop(1).Value = False And optTop (2).Value = False
  And optTop(3).Value = False And optTop(4).Value = False Then
    MsgBox "Debe Seleccioner la Topografia del Terreno", vbCritical, "Alerta"
    GoTo fin
  End If
End If
If fraVeg.Enabled = True Then
  If OptVeg1.Value = False And OptVeg2.Value = False And OptVeg3.Value = False Then
    MsgBox "Debe Seleccioner el Tipo de Vegetacion", vbCritical, "Alerta"
    GoTo fin
  End If
End If
```

```

End If
End If
C1 = -6.8643 * (293.15 / Val(txtAbs(1).Text)) ^ 1.261 + 4.6151
h = txtAbs(0).Text * 10 ^ C1
fn = Sqr(273.16 / Val(txtAbs(1).Text)) * (9 + 280 * h * 2.718281828 ^ (-4.17 *
((273.16 / Val(txtAbs(1).Text)) ^ (1 / 3) - 1)))
fo = 24 + 4.04 * 10 ^ 4 * h * ((0.02 + h) / (0.391 + h))
For c = 1 To Carriles
  For i = 1 To 27
    ab(i, c) = (869 * fre(i) ^ 2 * (1.86 * 10 ^ -11 * Sqr(Val(txtAbs(1).Text) /
293.15) + (293.15 / Val(txtAbs(1).Text)) ^ 5 / 2 * ((0.01275 * 2.718281828 ^ (-2239.1
/ Val(txtAbs(1).Text))) / (fo + fre(i) ^ 2 / fo) + (0.1068 * 2.718281828 ^ (-3352 /
Val(txtAbs(1).Text))) / (fn + fre(i) ^ 2 / fn))) * lon(c) / 100
  Next i
Next c
If fraSuelo.Enabled = True Then
  For c = 1 To Carriles
    If OptTop(0).Value = True Then
      he(c) = (0.8 + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
    End If
    If OptTop(1).Value = True Then
      If Val(txtSuelo(3).Text) <= (DistanciaLc(c) - txtSuelo(3).Text) / 2 Then
        he(c) = (0.8 + txtSuelo(2).Text + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
      Else
        he(c) = (0.8 + DistanciaLc(c)) / 2
      End If
    End If
    If OptTop(2).Value = True Then
      he(c) = (0.8 + txtSuelo(2).Text + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
    End If
    If OptTop(3).Value = True Then
      If Val(txtSuelo(4).Text) <= DistanciaLc(c) / 2 Then
        he(c) = (0.8 + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
      Else
        he(c) = (0.8 + txtSuelo(2).Text + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
      End If
    End If
    If OptTop(4).Value = True Then
      If Val(txtSuelo(4).Text) >= DistanciaLc(c) / 2 Then
        he(c) = (0.8 + 2 * txtSuelo(2).Text + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
      Else
        he(c) = (0.8 + frmDatosIni.txtAlt.Text) / 2
      End If
    End If
    If he(c) <= 3 Then
      cs = 3
    Else
      If 3 < he(c) And he(c) <= 18 Then
        cs = 0.6 * (1 - he(c) / 18)
      Else
        cs = 0
      End If
    End If
    sul(c) = -Val(txtSuelo(1).Text) / 100 * cs * 10 * logd(7.5 / lon(c))
  Next c
Else
  For c = 1 To Carriles
    sul(c) = 0
  Next c
End If
If fraVeg.Enabled = True Then
  If OptVeg1.Value = True Then
    For i = 1 To 27
      Labell19.Enabled = False
    Next i
  End If

```

```

        Text3(1).Visible = False
        veg(i) = (0.18 * logd(fre(i)) - 0.31) * Val(txtVeg(0).Text)
    Next i
End If
If OptVeg2.Value = True Then
    For i = 1 To 27
        Label12.Enabled = False
        Text3(0).Visible = False
        veg(i) = 0.01 * fre(i) ^ (1 / 3) * Val(txtVeg 1).Text)
    Next i
End If
If OptVeg.Value = True Then
    For i = 1 To 27
        veg(i) = 0.01 * fre(i) ^ (1 / 3) * Val(txtVeg(1).Text) + (0.18 *
logd(fre(i)) - 0.31) * Val(txtVeg(0).Text)
    Next i
End If
Else
    For i = 1 To 27
        veg(i) = 0
    Next i
End If
If fraEdif.Enabled = True Then
    If Val(txtEdif(1).Text) > 90 Then
        Dp = 0
    Else
        Dp = -10 * logd(1 - Val(txtEdif(1).Text) / 100)
    End If
    De = 1 - logd(10 ^ (0.1 * Val(txtEdif(4).Text)) + 10 ^ (0.1 * Val(txtEdif(2).Text))
+ 10 ^ (0.1 * Val(txtEdif(3).Text)))
    Dg = -10 * Log(10 ^ (-1 * Dp) + 10 ^ (-0.1 * De))
For c = 1 To Carriles
    For i = 1 To 27
        lre(c) = Sqr(lon(c) ^ 2 + Abs(h - 1) ^ 2)
        lwt(i, c) = lwc(i, c) + 10 * logd(leg(c)) + 3 - 10 * logd(lre(c)) - 5 - veg(i) -
sul(c) - ab(i, c) + Dg
    Next i
Next c
frmPes.SSTab1.Tab = 3
frmPes.SSTab1.SetFocus
frmAte.Hide
frmRes1.Show
fin: End Sub

Private Sub CmdSalir_Click()
End
End Sub

Private Sub CmdInt_Click()
If pctBarrera.Visible = False Then
    pctBarrera.Visible = True
Else
    pctBarrera.Visible = False
End If
End Sub

```

Formulario de resultados por carril (se coloca el código de formulario para el carril uno, como ejemplo):

```

Private Sub Form_Load()
Dim i As Integer
Dim sg As Double
Dim s As Double
Dim sa As Double

```

```

Dim sga As Double
r = 1
For i = 1 To 27
    Frecuencia(i).Text = fre(i)
    Frecuencia2(i).Text = fre(i)
    NPSF(i).Text = Format(lwc(i, 1) + 10 * logd(log(1)), "0.000")
    txtVeg(i).Text = Format(veg(i), "0.000")
    txtAbs(i).Text = Format(ab(i, 1), "0.000")
    NPSR(i).Text = Format(lwt(i, 1), "0.000")
    NPSRA(i).Text = Format(lwt(i, 1) + DBA(i), "0.000")
Next i
txtDir.Text = 3
TtxtLon.Text = Format(10 * logd(lon(1)) + 5, "0.000")
TxtSuelo.Text = sul(1)
txtEdif.Text = Dg
For i = 1 To 27
    s = s + 10 ^ ((lwt(i, 1)) / 10)
    sa = sa + 10 ^ ((lwt(i, 1) + DBA(i)) / 10)
Next i
sg = 10 * logd(s)
sga = 10 * logd(sa)
txtNPST.Text = sg
txtNPSTA.Text = sga
If r = Carriles Then
    CmdCont.Caption = "Resultados Finales"
Else
    CmdCont.Caption = "Siguiente Carril"
End If
framPes.SSTabl.TabEnabled(3) = True
End Sub

Private Sub CmdGra_Click()
frmgra.Show
End Sub

Private Sub Command2_Click()
frmRes.Hide
r = 1
If r = Carriles Then
    frmfinal.Show
    framPes.SSTabl.Tab = 4
    framPes.SSTabl.SetFocus
Else
    frmRes2.Show
End If
End Sub

```

Formulario para Graficar los resultados de cada Carril (se coloca el código de formulario para el carril uno, como ejemplo):

```

Dim data3(1 To 27, 0 To 5)
Dim i As Integer

Private Sub Form_Load()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim lrev(1 To 27) As Double
Option1.Value = True
Check0.Value = 1
Check3.Value = 1
With MSChart1.Title.VtFont

```

```

    .Size = 9
End With
For i = 1 To 27
    lrev(i) = lwf(i, 4, 1)
Next i
If revisar(lrev()) = False Then
    Check5.Enabled = False
    Label3(4).Enabled = False
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 5) = 0
    Next i
End If
For i = 1 To 27
    lrev(i) = lwf(i, 1, 1)
Next i

If revisar(lrev()) = False Then
    Check1.Enabled = False
    Label3(0).Enabled = False
End If
For i = 1 To 27
    lrev(i) = lwf(i, 2, 1)
Next i
If revisar(lrev()) = False Then
    Check2.Enabled = False
    Label3(1).Enabled = False
End If
For i = 1 To 27
    lrev(i) = lwf(i, 3, 1)
Next i
If revisar(lrev()) = False Then
    Check4.Enabled = False
    Label3(3).Enabled = False
End If
End Sub

Private Sub Check0_Click()
    Dim i As Integer
    If Check0.Value = 1 Then
        If Option1.Value = True Then
            For i = 1 To 27
                data3(i, 1) = lwc(i, 1) + 10 * logd(log(1))
            Next i
        Else
            For i = 1 To 27
                If lwc(i, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i) < 0 Then
                    data3(i, 1) = 0
                Else
                    data3(i, 1) = lwc(i, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
                End If
            Next i
        End If
    End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 1) = 0
    Next i
End If
MSChart1.ChartData = data3
MSChart1.Row = 1: MSChart1.RowLabel = "25"
MSChart1.Row = 2: MSChart1.RowLabel = "31,5"
MSChart1.Row = 3: MSChart1.RowLabel = "40"
MSChart1.Row = 4: MSChart1.RowLabel = "50"
MSChart1.Row = 5: MSChart1.RowLabel = "63"

```

```
MSChart1.Row = 6: MSChart1.RowLabel = "80"
MSChart1.Row = 7: MSChart1.RowLabel = "100"
MSChart1.Row = 8: MSChart1.RowLabel = "125"
MSChart1.Row = 9: MSChart1.RowLabel = "160"
MSChart1.Row = 10: MSChart1.RowLabel = "200"
MSChart1.Row = 11: MSChart1.RowLabel = "250"
MSChart1.Row = 12: MSChart1.RowLabel = "315"
MSChart1.Row = 13: MSChart1.RowLabel = "400"
MSChart1.Row = 14: MSChart1.RowLabel = "500"
MSChart1.Row = 15: MSChart1.RowLabel = "630"
MSChart1.Row = 16: MSChart1.RowLabel = "800"
MSChart1.Row = 17: MSChart1.RowLabel = "1000"
MSChart1.Row = 18: MSChart1.RowLabel = "1250"
MSChart1.Row = 19: MSChart1.RowLabel = "1600"
MSChart1.Row = 20: MSChart1.RowLabel = "2000"
MSChart1.Row = 21: MSChart1.RowLabel = "2500"
MSChart1.Row = 22: MSChart1.RowLabel = "3150"
MSChart1.Row = 23: MSChart1.RowLabel = "4000"
MSChart1.Row = 24: MSChart1.RowLabel = "5000"
MSChart1.Row = 25: MSChart1.RowLabel = "6300"
MSChart1.Row = 26: MSChart1.RowLabel = "8000"
MSChart1.Row = 27: MSChart1.RowLabel = "10000"
End Sub

Private Sub Check1_Click()
Dim i As Integer
If Check1.Value = 1 Then
    If Option1.Value = True Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 2) = lwf(i, 1, 1) + 10 * logd(log(1))
        Next i
    Else
        For i = 1 To 27
            data3(i, 2) = lwf(i, 1, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
        Next i
    End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 2) = 0
    Next i
End If
MSChart1.ChartData = data3
End Sub

Private Sub Check2_Click()
If Check2.Value = 1 Then
    If Option1.Value = True Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 3) = lwf(i, 2, 1) + 10 * logd(log(1))
        Next i
    Else
        For i = 1 To 27
            data3(i, 3) = lwf(i, 2, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
        Next i
    End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 3) = 0
    Next i
End If
MSChart1.ChartData = data3
End Sub

Private Sub Check3_Click()
Dim i As Integer
```

```

If Check3.Value = 1 Then
  If Option1.Value = True Then
    For i = 1 To 27
      data3(i, 0) = lwt(i, 1)
    Next i
  Else
    For i = 1 To 27
      If lwt(i, 1) + DBA(i) < 0 Then
        data3(i, 0) = 0
      Else
        data3(i, 0) = lwt(i, 1) + DBA(i)
      End If
    Next i
  End If
Else
  For i = 1 To 27
    data3(i, 0) = 0
  Next i
End If
MSChart1.ChartData = data3
End Sub

Private Sub Check4_Click()
  Dim i As Integer
  If Check4.Value = 1 Then
    If Option1.Value = True Then
      For i = 1 To 27
        data3(i, 4) = lwf(i, 3, 1) + 10 * logd(log(1))
      Next i
    Else
      For i = 1 To 27
        data3(i, 4) = lwf(i, 3, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
      Next i
    End If
  Else
    For i = 1 To 27
      data3(i, 4) = 0
    Next i
  End If
  MSChart1.ChartData = data3
End Sub

Private Sub Check5_Click()
  Dim i As Integer
  If Check5.Value = 1 Then
    If Option1.Value = True Then
      For i = 5 To 26 Step 3
        data3(i, 5) = lwf(i, 4, 1) + 10 * logd(log(1))
      Next i
    Else
      For i = 5 To 26 Step 3
        If lwf(i, 4, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i) > 0 Then
          data3(i, 5) = lwf(i, 4, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
        Else
          data3(i, 5) = 0
        End If
      Next i
    End If
  Else
    For i = 1 To 27
      data3(i, 5) = 0
    Next i
  End If

```

```

End If
MSChart1.ChartData = data3

Private Sub Command1_Click()
Form9.Show
Unload Me
Set Form11 = Nothing
End Sub

Private Sub Option1_Click()
Dim i As Integer
If Option1.Value = True Then
If Check0.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
data3(i, 1) = lwc(i, 1) + 10 * logd(log(1))
Next i
End If
If Check1.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
data3(i, 2) = lwf(i, 1, 1) + 10 * logd(log(1))
Next i
End If
If Check2.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
data3(i, 3) = lwf(i, 2, 1) + 10 * logd(log(1))
Next i
End If
If Check3.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
data3(i, 0) = lwt(i, 1)
Next i
End If
If Check4.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
data3(i, 4) = lwf(i, 3, 1) + 10 * logd(log(1))

Next i
End If
If Check5.Value = 1 Then
For i = 5 To 26 Step 3
data3(i, 5) = lwf(i, 4, 1) + 10 * logd(log(1))
Next i
End If
End If
MSChart1.ChartData = data3
End Sub

Private Sub Option2_Click()
Dim i As Integer
If Option2.Value = True Then
If Check0.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
If lwc(i, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1)) < 0 Then
data3(i, 1) = 0
Else
data3(i, 1) = lwc(i, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1))
End If
Next i
End If
If Check1.Value = 1 Then
For i = 1 To 27
If lwf(i, 1, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1)) < 0 Then
data3(i, 2) = 0
Else
data3(i, 2) = lwf(i, 1, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1))

```

```

        End If
    Next i
End If
If Check2.Value = 1 Then
    For i = 1 To 27
        If lwf(i, 2, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1)) < 0 Then
            data3(i, 3) = 0
        Else
            data3(i, 3) = lwf(i, 2, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
        End If
    Next i
End If
If Check3.Value = 1 Then
    For i = 1 To 27
        If lwt(i, 1) + DBA(i) < 0 Then
            data3(i, 0) = 0
        Else
            data3(i, 0) = lwt(i, 1) + DBA(i)
        End If
    Next i
End If
If Check4.Value = 1 Then
    For i = 1 To 27
        If lwf(i, 3, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1)) < 0 Then
            data3(i, 4) = 0
        Else
            data3(i, 4) = lwf(i, 3, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
        End If
    Next i
End If
If Check5.Value = 1 Then
    For i = 5 To 26 Step 3
        If lwf(i, 4, 1) + DBA(i) + 10 * logd(log(1)) < 0 Then
            data3(i, 5) = 0
        Else
            data3(i, 5) = lwf(i, 4, 1) + 10 * logd(log(1)) + DBA(i)
        End If
    Next i
End If
End If

```

```

MSChart1.ChartData = data3
End Sub

```

Formulario de resultados finales

```

Dim data(1 To 27, 0 To 0) As Double
Dim data2(1 To 27, 0 To 0) As Double
Dim data3() As Double

```

```

Private Sub Command9_Click()

```

```

    Dim lwta(1 To 27, 1 To 6) As Double

```

```

    If Existe(Text5.Text) Then

```

```

        Resp = MsgBox("Ya existe un Archivo con ese nombre ¿Desea Continuar?", vbQuestion +
vbYesNo, "Cuidado")

```

```

        If Resp <> 6 Then

```

```

            GoTo fin

```

```

        Else

```

```

            borrararchivo (Text5.Text)

```

```

        End If

```

```

    End If

```

```

Open Text5.Text For Append As 1
Print #1, "***** RESULTADOS FINALES DEL PROGRAMA MSV1
*****"
Print #1, " "
Print #1, "Altura del receptor: " & Form3.Text1.Text
Print #1, "Tipo de Pavimento: " & Form3.Combo2.Text
Print #1, "Angulo 1: " & Form3.Text2.Text
Print #1, "Angulo 2: " & Form3.Text3.Text
Print #1, " "
Print #1,
"*****"
****"
For i = 1 To Carriles
Print #1, " "
Print #1, "
DATOS DEL TRAFICO" & " CARRIL #" & i
Print #1,
"*****"
****"
Print #1, " Distancia a la linea central de la Carretera(m): " & DistanciaLc(i)
Print #1, "
Print #1, " Veh/h Velocidad(km/h) "
Print #1, "

Select Case fl(0, i)
Case Is < 10
Print #1, " Vehiulos Ligeros:" & " " & fl(0, i) & " " & ve(0, i)
Case Is >= 10 < 100
Print #1, " Vehiulos Ligeros:" & " " & fl(0, i) & " " & ve(0, i)
Case Is >= 100 < 1000
Print #1, " Vehiulos Ligeros:" & " " & fl(0, i) & " " & ve(0, i)
Case Is >= 1000 < 10000
Print #1, " Vehiulos Ligeros:" & " " & fl(0, i) & " " & ve(0, i)
Case Is >= 10000
Print #1, " Vehiulos Ligeros:" & " " & fl(0, i) & " " & ve(0, i)

End Select

Select Case fl(1, i)

Case Is < 10
Print #1, " Vehiulos Medianos:" & " " & fl(1, i) & " " & ve(1, i)
Case Is >= 10 < 100
Print #1, " Vehiulos Medianos:" & " " & fl(1, i) & " " & ve(1, i)
Case Is >= 100 < 1000
Print #1, " Vehiulos Medianos:" & " " & fl(1, i) & " " & ve(1, i)
Case Is >= 1000 < 10000
Print #1, " Vehiulos Medianos:" & " " & fl(1, i) & " " & ve(1, i)
Case Is >= 10000
Print #1, " Vehiulos Medianos:" & " " & fl(1, i) & " " & ve(1, i)

End Select

Select Case fl(2, i)

Case Is < 10
Print #1, " Vehiulos Pesados:" & " " & fl(2, i) & " " & ve(2, i)
Case Is >= 10 < 100
Print #1, " Vehiulos Pesados:" & " " & fl(2, i) & " " & ve(2, i)
Case Is >= 100 < 1000
Print #1, " Vehiulos Pesados:" & " " & fl(2, i) & " " & ve(2, i)
Case Is >= 1000 < 10000
Print #1, " Vehiulos Pesados:" & " " & fl(2, i) & " " & ve(2, i)
Case Is >= 10000
Print #1, " Vehiulos Pesados:" & " " & fl(2, i) & " " & ve(2, i)

```

```

End Select

Select Case fl(3, i)

Case Is < 10
Print #1, "    Motocicletas:" & "          " & fl(3, i) & "          " & ve(3, i)
Case Is >= 10 < 100
Print #1, "    Motocicletas:" & "          " & fl(3, i) & "          " & ve(3, i)
Case Is >= 100 < 1000
Print #1, "    Motocicletas:" & "          " & fl(3, i) & "          " & ve(3, i)
Case Is >= 1000 < 10000
Print #1, "    Motocicletas:" & "          " & fl(3, i) & "          " & ve(3, i)
Case Is >= 10000
Print #1, "    Motocicletas:" & "          " & fl(2, i) & "          " & ve(2,
i)

End Select

Print #1, ""
Print #1,
"*****
****"

Next i
Print #1, "          DATOS PARA EL CALCULO DE ATENUACIÓN"
Print #1,
"*****
****"
Print #1, ""
If Form8.Frame1.Enabled = True Then

    Print #1, " Atenuacion de suelo: Si se consideró"
    For i = 0 To 4
    If Form8.Option1(i).Value = True Then
    Print #1, " Topografica del Terreno: " & Form8.Option1(i).Caption
    End If
    Next i
    Print #1, "Porcentaje de suelo Suave: " & Form8.Text1(1).Text
    Print #1, "Altura de Corte (m): " & Form8.Text1(2).Text & "          Distancia al corte
(m):" & Form8.Text1(3).Text
    Print #1, "Longitud horizontal del corte (m): " & Form8.Text1(4).Text
Else
    Print #1, " Atenuacion de suelo: No se consideró"
    End If
Print #1, ""

If Form8.Frame2.Enabled = True Then
Print #1, "Atenuación por la presencia de edificaciones: Si se consideró"
    Print #1, "Altura Promedio de los edificios (m):" & Form8.Text4(0).Text
    Print #1, "Porcentaje de longitud ocupada por edificaciones : " &
Form8.Text4(1).Text & "%"
    Print #1, "D1 (m): " & Form8.Text4(2).Text & "D2(m): " & Form4.Text1(3).Text
Else
    Print #1, " Atenuación por la presencia de edificaciones: No se consideró"
    End If
Print #1, ""

If Form8.Frame3.Enabled = True Then
Print #1, "Atenuación por la presencia vegetación: Si se consideró"
    If Form8.Option4.Value = True Then
    Print #1, " Tipo de vegetación: " & Form8.Option4.Caption
    Print #1, "Longitud de la capa vegetal (m): " & Form8.Text3(0).Text
    End If
    If Form8.Option5.Value = True Then

```

```

Print #1, " Tipo de vegetación: " & Form8.Option5.Caption
Print #1, "Longitud de la capa vegetal(m): " & Form8.Text3(1).Text
End If
If Form8.Option6.Value = True Then
Print #1, " Tipo de vegetación: " & Form8.Option6.Caption
Print #1, "Longitud de la capa vegetal de baja altitud (m): " & Form8.Text3(0)
Print #1, "Longitud de la capa vegetal de gran altitud (m): " & Form8.Text3(1)
End If
Else
Print #1, " Atenuación la presencia vegetación: No se consideró"
End If
Print #1, ""
Print #1,
"*****
Print #1, "
" & "RESULTADOS EN dB"
Print #1,
"*****
Print #1, " "
Print #1, " F (Hz)" & " Carril #1" & " Carril #2" & " Carril #3" & " Carril
#4" & " Carril #5" & " Carril #6" & " Total"
Print #1, " "
Print #1, " " & fre(1) & " " & Format(lwt(1, 1), "0.000") & " " &
Format(lwt(1, 2), "0.000") & " " & Format(lwt(1, 3), "0.000") & " " &
Format(lwt(1, 4), "0.000") & " " & Format(lwt(1, 5), "0.000") & " " &
Format(lwt(1, 6), "0.000") & " " & Text12(1).Text
Print #1, " " & fre(2) & " " & Format(lwt(2, 1), "0.000") & " " &
Format(lwt(2, 2), "0.000") & " " & Format(lwt(2, 3), "0.000") & " " &
Format(lwt(2, 4), "0.000") & " " & Format(lwt(2, 5), "0.000") & " " &
Format(lwt(2, 6), "0.000") & " " & Text12(2).Text
For i = 3 To 6
Print #1, " " & fre(i) & " " & Format(lwt(i, 1), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 2), "0.000") & " " & Format(lwt(i, 3), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 4), "0.000") & " " & Format(lwt(i, 5), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 6), "0.000") & " " & Text12(i).Text
Next i
For i = 7 To 16
Print #1, " " & fre(i) & " " & Format(lwt(i, 1), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 2), "0.000") & " " & Format(lwt(i, 3), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 4), "0.000") & " " & Format(lwt(i, 5), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 6), "0.000") & " " & Text12(i).Text
Next i
For i = 17 To 26
Print #1, " " & fre(i) & " " & Format(lwt(i, 1), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 2), "0.000") & " " & Format(lwt(i, 3), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 4), "0.000") & " " & Format(lwt(i, 5), "0.000") & " " &
Format(lwt(i, 6), "0.000") & " " & Text12(i).Text
Next i
Print #1, " " & fre(27) & " " & Format(lwt(27, 1), "0.000") & " " &
Format(lwt(27, 2), "0.000") & " " & Format(lwt(27, 3), "0.000") & " " &
Format(lwt(27, 4), "0.000") & " " & Format(lwt(27, 5), "0.000") & " " &
Format(lwt(27, 6), "0.000") & " " & Text12(27).Text
Print #1, ""
Print #1, " Nivel de Presión Sonora General(dBA): " & Text3.Text

For i = 1 To 27
For j = 1 To 6
If lwt(i, j) > 0 Then
lwta(i, j) = lwt(i, j) + DBA(i)
Else
lwta(i, j) = 0
End If
Next j
Next i

```

```

Print #1, ""
Print #1,
"*****"
Print #1, " " & "RESULTADOS EN dBA"
Print #1,
"*****"
Print #1, " "
Print #1, " F (Hz)" & " Carril #1" & " Carril #2" & " Carril #3" & " Carril
#4" & " Carril #5" & " Carril #6" & " Total"
Print #1, " "
Print #1, " " & fre(1) & " " & Format(lwta(1, 1), "0.000") & " " &
Format(lwta(1, 2), "0.000") & " " & Format(lwta(1, 3), "0.000") & " " &
Format(lwta(1, 4), "0.000") & " " & Format(lwta(1, 5), "0.000") & " " &
Format(lwta(1, 6), "0.000") & " " & Text14(1).Text
Print #1, " " & fre(2) & " " & Format(lwta(2, 1), "0.000") & " " &
Format(lwta(2, 2), "0.000") & " " & Format(lwta(2, 3), "0.000") & " " &
Format(lwta(2, 4), "0.000") & " " & Format(lwta(2, 5), "0.000") & " " &
Format(lwta(2, 6), "0.000") & " " & Text14(2).Text
For i = 3 To 6
Print #1, " " & fre(i) & " " & Format(lwta(i, 1), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 2), "0.000") & " " & Format(lwta(i, 3), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 4), "0.000") & " " & Format(lwta(i, 5), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 6), "0.000") & " " & Text14(i).Text
Next i
For i = 7 To 16
Print #1, " " & fre(i) & " " & Format(lwta(i, 1), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 2), "0.000") & " " & Format(lwta(i, 3), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 4), "0.000") & " " & Format(lwta(i, 5), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 6), "0.000") & " " & Text14(i).Text
Next i
For i = 17 To 26
Print #1, " " & fre(i) & " " & Format(lwta(i, 1), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 2), "0.000") & " " & Format(lwta(i, 3), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 4), "0.000") & " " & Format(lwta(i, 5), "0.000") & " " &
Format(lwta(i, 6), "0.000") & " " & Text14(i).Text
Next i
Print #1, " " & fre(27) & " " & Format(lwta(27, 1), "0.000") & " " &
Format(lwta(27, 2), "0.000") & " " & Format(lwta(27, 3), "0.000") & " " &
Format(lwta(27, 4), "0.000") & " " & Format(lwta(27, 5), "0.000") & " " &
Format(lwta(27, 6), "0.000") & " " & Text14(27).Text
Print #1, " Nivel de Presión Sonora General(dBA): " & Text4.Text
Close #1
fin: End Sub

Private Sub Form_Load()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim temp As Double
Dim temp1 As Double
Form23.SSTab1.TabEnabled(4) = True
Form21.Top = 0
Form21.Left = 370
Frame7.Visible = False
Frame10.Visible = False

If Carriles < 3 Then
Command7.Enabled = False
End If
For i = 1 To 27
Text1(i).Text = fre(i)
temp = 0
For j = 1 To Carriles
temp = 10 ^ (lwt(i, j) / 10) + temp

```

```

    Next j
    ldb(i) = Format(10 * logd(temp), "0.000")
    Text12(i).Text = ldb(i)
    lpa(i) = Format(10 * logd(temp) + DBA(i), "0.000")
    Text14(i).Text = lpa(i)
    Text8(i).Text = Format(10 ^ (Val(Text12(i).Text) / 20) * 0.00002, "0.000")
    Text7(i).Text = Format(10 ^ (Val(Text12(i).Text) / 20) * 0.00002, "0.000")
Next i
temp = 0
For i = 1 To 27
    temp = 10 ^ (Text12(i).Text / 10) + temp
    temp1 = 10 ^ (Text14(i).Text / 10) + temp1
Next i
Text3.Text = Format(10 * logd(temp), "0.000")
Text4.Text = Format(10 * logd(temp1), "0.000")
For i = 1 To 27
    data(i, 0) = ldb(i)
    data2(i, 0) = lpa(i)
Next i
MSChart1.ChartData = data
MSChart1.Row = 1: MSChart1.RowLabel = "25"
MSChart1.Row = 2: MSChart1.RowLabel = "31,5"
MSChart1.Row = 3: MSChart1.RowLabel = "40"
MSChart1.Row = 4: MSChart1.RowLabel = "50"
MSChart1.Row = 5: MSChart1.RowLabel = "63"
MSChart1.Row = 6: MSChart1.RowLabel = "80"
MSChart1.Row = 7: MSChart1.RowLabel = "100"
MSChart1.Row = 8: MSChart1.RowLabel = "125"
MSChart1.Row = 9: MSChart1.RowLabel = "160"
MSChart1.Row = 10: MSChart1.RowLabel = "200"
MSChart1.Row = 11: MSChart1.RowLabel = "250"
MSChart1.Row = 12: MSChart1.RowLabel = "315"
MSChart1.Row = 13: MSChart1.RowLabel = "400"
MSChart1.Row = 14: MSChart1.RowLabel = "500"
MSChart1.Row = 15: MSChart1.RowLabel = "630"
MSChart1.Row = 16: MSChart1.RowLabel = "800"
MSChart1.Row = 17: MSChart1.RowLabel = "1000"
MSChart1.Row = 18: MSChart1.RowLabel = "1250"
MSChart1.Row = 19: MSChart1.RowLabel = "1600"
MSChart1.Row = 20: MSChart1.RowLabel = "2000"
MSChart1.Row = 21: MSChart1.RowLabel = "2500"
MSChart1.Row = 22: MSChart1.RowLabel = "3150"
MSChart1.Row = 23: MSChart1.RowLabel = "4000"
MSChart1.Row = 24: MSChart1.RowLabel = "5000"
MSChart1.Row = 25: MSChart1.RowLabel = "6300"
MSChart1.Row = 26: MSChart1.RowLabel = "8000"
MSChart1.Row = 27: MSChart1.RowLabel = "10000"

If Carriles = 6 Then
    ReDim data3(1 To 27, 0 To 6)
End If
If Carriles = 5 Then
    ReDim data3(1 To 27, 0 To 5)
    Check6.Enabled = False
    Label3(5).Enabled = False
End If
If Carriles = 4 Then
    ReDim data3(1 To 27, 0 To 4)
    Check6.Enabled = False
    Label3(5).Enabled = False
    Check5.Enabled = False
    Label3(4).Enabled = False
End If

If Carriles = 3 Then

```

```
ReDim data3(1 To 27, 0 To 3)
Check6.Enabled = False
Label3(5).Enabled = False
Check5.Enabled = False
Label3(4).Enabled = False
Check4.Enabled = False
Label3(3).Enabled = False
End If
If Carriles = 2 Then
ReDim data3(1 To 27, 0 To 2)
Check6.Enabled = False
Check5.Enabled = False
Check4.Enabled = False
Check3.Enabled = False
For i = 5 To 2 Step -1
Label3(i).Enabled = False
Next i
End If
If Carriles = 1 Then
ReDim data3(1 To 27, 0 To 0)
Check6.Enabled = False
Check5.Enabled = False
Check4.Enabled = False
Check3.Enabled = False
Check2.Enabled = False
Check1.Enabled = False
Check0.Enabled = False
For i = 6 To 0 Step -1
Label3(i).Enabled = False
Next i
Frame1.Enabled = False
End If
Check0.Value = 1
Option5.Value = True
Option3.Value = True
Option2.Value = True
End Sub

Private Sub Command1_Click()
Form21.Hide
Form22.Show
Form23.SSTab1.Tab = 5
Form23.SSTab1.SetFocus
End Sub

Private Sub Command2_Click()
End
End Sub

Private Sub Command5_Click()
Frame7.Visible = False
Frame10.Visible = False
Frame4.Visible = True
End Sub

Private Sub Command6_Click()
Frame7.Visible = True
Frame10.Visible = False
Frame4.Visible = False
Text21(0).Text = h
Text21(1).Text = h
Text22(0).Text = leg(1)
Text22(1).Text = leg(1)
If Surf = 1 Then
Text20(0).Text = "Asfalto Poroso"
```

```
Text20(1).Text = "Asfalto Poroso"
End If
If Surf = 2 Then
Text20(0).Text = "Concreto liso"
Text20(1).Text = "Concreto liso"
End If
If Surf = 3 Then
Text20(0).Text = "Stone mastic Asphalt (SMA)"
Text20(1).Text = "Stone mastic Asphalt (SMA)"
End If
If Surf = 4 Then
Text20(0).Text = "Asfalto Empedrado"
Text20(1).Text = "Asfalto Empedrado"
End If
If Carriles < 3 Then
For i = 1 To 3
Frame8(i).Enabled = False
Text6(i).Visible = False
Text9(i).Visible = False
Text10(i).Visible = False
Text11(i).Visible = False
Text13(i).Visible = False
Text16(i).Visible = False
Text17(i).Visible = False
Text18(i).Visible = False
Text19(i).Visible = False
Label6(i).Enabled = False
Label7(i).Enabled = False
Label8(i).Enabled = False
Label9(i).Enabled = False
Label10(i).Enabled = False
Label22(i).Enabled = False
Label21(i).Enabled = False
Label23(i).Visible = False
Next i
For i = 1 To Carriles
Frame8(i).Enabled = True
Text6(i).Visible = True
Text9(i).Visible = True
Text10(i).Visible = True
Text11(i).Visible = True
Text13(i).Visible = True
Text16(i).Visible = True
Text17(i).Visible = True
Text18(i).Visible = True
Text19(i).Visible = True
Label6(i).Enabled = True
Label7(i).Enabled = True
Label8(i).Enabled = True
Label9(i).Enabled = True
Label10(i).Enabled = True
Label22(i).Enabled = True
Label21(i).Enabled = True
Label23(i).Visible = True
Next i
For i = 1 To Carriles
Text6(i).Text = fl(0, i)
Text9(i).Text = fl(1, i)
Text10(i).Text = fl(2, i)
Text11(i).Text = fl(3, i)
Text13(i).Text = ve(0, i)
Text16(i).Text = ve(1, i)
Text17(i).Text = ve(2, i)
Text18(i).Text = ve(3, i)
Text19(i).Text = DistanciaLc(i)
```

```
Next i
Else
  For i = 1 To 3
    Text6(i).Text = fl(0, i)
    Text9(i).Text = fl(1, i)
    Text10(i).Text = fl(2, i)
    Text11(i).Text = fl(3, i)
    Text13(i).Text = ve(0, i)
    Text16(i).Text = ve(1, i)
    Text17(i).Text = ve(2, i)
    Text18(i).Text = ve(3, i)
    Text19(i).Text = DistanciaLc(i)
  Next i
End If
End Sub

Private Sub Command7_Click()
  Frame10.Visible = True
  Text21(0).Text = h
  If Surf = 1 Then
    Text20(0).Text = "Asfalto Poroso"
  End If
  If Surf = 2 Then
    Text20(0).Text = "Concreto liso"
  End If
  If Surf = 3 Then
    Text20(0).Text = "Stone mastic Asphalt (SMA)"
  End If
  If Surf = 4 Then
    Text20(0).Text = "Asfalto Empedrado"
  End If
  If Carriles < 6 Then
    For i = 4 To 6
      Frame8(i).Enabled = False
      Text6(i).Visible = False
      Text9(i).Visible = False
      Text10(i).Visible = False
      Text11(i).Visible = False
      Text13(i).Visible = False
      Text16(i).Visible = False
      Text17(i).Visible = False
      Text18(i).Visible = False
      Text19(i).Visible = False
      Label6(i).Enabled = False
      Label7(i).Enabled = False
      Label8(i).Enabled = False
      Label9(i).Enabled = False
      Label10(i).Enabled = False
      Label22(i).Enabled = False
      Label21(i).Enabled = False
      Label23(i).Visible = False
    Next i
    For i = 4 To Carriles
      Frame8(i).Enabled = True
      Text6(i).Visible = True
      Text9(i).Visible = True
      Text10(i).Visible = True
      Text11(i).Visible = True
      Text13(i).Visible = True
      Text16(i).Visible = True
      Text17(i).Visible = True
      Text18(i).Visible = True
      Text19(i).Visible = True
      Label6(i).Enabled = True
      Label7(i).Enabled = True
    Next i
  End If
End Sub
```

```

Label8(i).Enabled = True
Label9(i).Enabled = True
Label10(i).Enabled = True
Label22(i).Enabled = True
Label21(i).Enabled = True
Label23(i).Visible = True
Next i
For i = 4 To Carriles
Text6(i).Text = fl(0, i)
Text9(i).Text = fl(1, i)
Text10(i).Text = fl(2, i)
Text11(i).Text = fl(3, i)
Text13(i).Text = ve(0, i)
Text16(i).Text = ve(1, i)
Text17(i).Text = ve(2, i)
Text18(i).Text = ve(3, i)
Text19(i).Text = DistanciaLc(i)
Next i
Else
For i = 4 To 6
Text6(i).Text = fl(0, i)
Text9(i).Text = fl(1, i)
Text10(i).Text = fl(2, i)
Text11(i).Text = fl(3, i)
Text13(i).Text = ve(0, i)
Text16(i).Text = ve(1, i)
Text17(i).Text = ve(2, i)
Text18(i).Text = ve(3, i)
Text19(i).Text = DistanciaLc(i)
Next i
End If
End Sub

Private Sub Check0_Click()
If Check0.Value = 1 Then
If Option5.Value = True Then
For i = 1 To 27
data3(i, 0) = data(i, 0)
Next i
MSChart1.ChartData = data3
MSChart1.Row = 1: MSChart1.RowLabel = "25"
MSChart1.Row = 2: MSChart1.RowLabel = "31,5"
MSChart1.Row = 3: MSChart1.RowLabel = "40"
MSChart1.Row = 4: MSChart1.RowLabel = "50"
MSChart1.Row = 5: MSChart1.RowLabel = "63"
MSChart1.Row = 6: MSChart1.RowLabel = "80"
MSChart1.Row = 7: MSChart1.RowLabel = "100"
MSChart1.Row = 8: MSChart1.RowLabel = "125"
MSChart1.Row = 9: MSChart1.RowLabel = "160"
MSChart1.Row = 10: MSChart1.RowLabel = "200"
MSChart1.Row = 11: MSChart1.RowLabel = "250"
MSChart1.Row = 12: MSChart1.RowLabel = "315"
MSChart1.Row = 13: MSChart1.RowLabel = "400"
MSChart1.Row = 14: MSChart1.RowLabel = "500"
MSChart1.Row = 15: MSChart1.RowLabel = "630"
MSChart1.Row = 16: MSChart1.RowLabel = "800"
MSChart1.Row = 17: MSChart1.RowLabel = "1000"
MSChart1.Row = 18: MSChart1.RowLabel = "1250"
MSChart1.Row = 19: MSChart1.RowLabel = "1600"
MSChart1.Row = 20: MSChart1.RowLabel = "2000"
MSChart1.Row = 21: MSChart1.RowLabel = "2500"
MSChart1.Row = 22: MSChart1.RowLabel = "3150"
MSChart1.Row = 23: MSChart1.RowLabel = "4000"
MSChart1.Row = 24: MSChart1.RowLabel = "5000"
MSChart1.Row = 25: MSChart1.RowLabel = "6300"

```

```
MSChart1.Row = 26: MSChart1.RowLabel = "8000"  
MSChart1.Row = 27: MSChart1.RowLabel = "10000"  
Else  
  For i = 1 To 27  
    data3(i, 0) = data2(i, 0)  
  Next i  
  MSChart1.ChartData = data3  
End If  
Else  
  For i = 1 To 27  
    data3(i, 0) = 0  
  Next i  
MSChart1.ChartData = data3  
End If  
  
End Sub  
  
Private Sub Check1_Click()  
If Check1.Value = 1 Then  
  If Option5.Value = True Then  
    For i = 1 To 27  
      data3(i, 1) = lwt(i, 1)  
    Next i  
    MSChart1.ChartData = data3  
  Else  
    For i = 1 To 27  
      data3(i, 1) = lwt(i, 1) + DBA(i)  
    Next i  
    MSChart1.ChartData = data3  
  End If  
Else  
  For i = 1 To 27  
    data3(i, 1) = 0  
  Next i  
  MSChart1.ChartData = data3  
End If  
End Sub  
  
Private Sub Check2_Click()  
If Check2.Value = 1 Then  
  If Option5.Value = True Then  
    For i = 1 To 27  
      data3(i, 2) = lwt(i, 2)  
    Next i  
    MSChart1.ChartData = data3  
  Else  
    For i = 1 To 27  
      data3(i, 2) = lwt(i, 2) + DBA(i)  
    Next i  
    MSChart1.ChartData = data3  
  End If  
Else  
  For i = 1 To 27  
    data3(i, 2) = 0  
  Next i  
  MSChart1.ChartData = data3  
End If  
End Sub  
  
Private Sub Check3_Click()  
If Check3.Value = 1 Then  
  If Option5.Value = True Then  
    For i = 1 To 27
```

```
        data3(i, 3) = lwt(i, 3)
    Next i
    MSChart1.ChartData = data3
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 3) = lwt(i, 3) + DBA(i)
    Next i
    MSChart1.ChartData = data3
End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 3) = 0
    Next i
    MSChart1.ChartData = data3
End If
End Sub

Private Sub Check4_Click()
If Check4.Value = 1 Then
    If Option5.Value = True Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 4) = lwt(i, 4)
        Next i
        MSChart1.ChartData = data3
    Else
        For i = 1 To 27
            data3(i, 4) = lwt(i, 4) + DBA(i)
        Next i

        MSChart1.ChartData = data3
    End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 4) = 0
    Next i
    MSChart1.ChartData = data3
End If
End Sub

Private Sub Check5_Click()
If Check5.Value = 1 Then
    If Option5.Value = True Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 5) = lwt(i, 5)
        Next i
        MSChart1.ChartData = data3
    Else
        For i = 1 To 27
            data3(i, 5) = lwt(i, 5) + DBA(i)
        Next i
        MSChart1.ChartData = data3
    End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 5) = 0
    Next i
    MSChart1.ChartData = data3
End If
End Sub

Private Sub Check6_Click()
If Check6.Value = 1 Then
    If Option5.Value = True Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 6) = lwt(i, 6)
```

```
        Next i
        MSChart1.ChartData = data3
    Else
        For i = 1 To 27
            data3(i, 6) = lwt(i, 6) + DBA(i)
        Next i
        MSChart1.ChartData = data3
        MSChart1.Row = 1: MSChart1.RowLabel = "25"
    End If
Else
    For i = 1 To 27
        data3(i, 6) = 0
    Next i
    MSChart1.ChartData = data3

End If
End Sub

Private Sub Option1_Click()
MSChart1.Left = 6840
MSChart1.Top = 120
MSChart1.Height = 8940
MSChart1.Width = 8175
If Option3.Value = True Then
    MSChart1.chartType = VtChChartType2dBar
Else
    MSChart1.chartType = VtChChartType2dLine
End If
End Sub

Private Sub Option2_Click()
MSChart1.Left = 6840
MSChart1.Top = 120
MSChart1.Height = 8940
MSChart1.Width = 8655
If Option3.Value = True Then
    MSChart1.chartType = VtChChartType3dBar
Else
    MSChart1.chartType = VtChChartType3dLine
End If
End Sub

Private Sub Option3_Click()
If Option1.Value = True Then
    MSChart1.chartType = VtChChartType2dBar
Else
    MSChart1.chartType = VtChChartType3dBar
End If
End Sub

Private Sub Option4_Click()
If Option1.Value = True Then
    MSChart1.chartType = VtChChartType2dLine
Else
    MSChart1.chartType = VtChChartType3dLine
End If
End Sub

Private Sub Option5_Click()
If Option5.Value = True Then
    If Check1.Value = 1 Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 1) = lwt(i, 1)
        Next i
    End If
    If Check2.Value = 1 Then
        For i = 1 To 27
            data3(i, 2) = lwt(i, 2)
```

```
Next i
End If
If Check3.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 3) = lwt(i, 3)
  Next i
End If
If Check4.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 4) = lwt(i, 4)
  Next i
End If
If Check5.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 5) = lwt(i, 5)
  Next i
End If
If Check6.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 6) = lwt(i, 6)
  Next i
End If
If Check0.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 0) = ldb(i)
  Next i
End If
MSChart1.ChartData = data3
End If
End Sub

Private Sub Option6_Click()
If Option6.Value = True Then
  If Check1.Value = 1 Then
    For i = 1 To 27
      data3(i, 1) = lwt(i, 1) + DBA(i)
    Next i
  End If
If Check2.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 2) = lwt(i, 2) + DBA(i)
  Next i
End If
If Check3.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 3) = lwt(i, 3) + DBA(i)
  Next i
End If
If Check4.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 4) = lwt(i, 4) + DBA(i)
  Next i
End If
If Check5.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 5) = lwt(i, 5) + DBA(i)
  Next i
End If
If Check6.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
    data3(i, 6) = lwt(i, 6) + DBA(i)
  Next i
End If
If Check0.Value = 1 Then
  For i = 1 To 27
```

```

        data3(i, 0) = ldb(i) + DBA(i)
    Next i
End If
MSChart1.ChartData = data3
End If
End Sub

```

Formulario de control de ruido.

```

Dim N(1 To 27, 1 To 6) As Single
Dim IL(1 To 27, 1 To 6) As Double
Dim TL(1 To 27) As Double
Dim data(1 To 27, 0 To 1) As Double
Dim data1(1 To 27, 0 To 0) As Double
Dim data2(1 To 27, 0 To 0) As Double
Dim data3(1 To 27, 0 To 1) As Double

Private Sub Check2_Click()
If Check2.Value = 1 Then
    Label13.Enabled = True
    Text17.Visible = True
    Command5.Enabled = True
End If
If Check2.Value = 0 Then
    Text17.Text = ""
    Label13.Enabled = False
    Text17.Visible = False
    Command5.Enabled = False
End If
End Sub

Private Sub Comb01_Click()
If Comb01.Text = "Nuevo Material" Then
    Label10.Enabled = True
    Text15.Visible = True
    Label14.Visible = False
    Label15.Visible = False
Else
    Label10.Enabled = False
    Text15.Visible = False
    Label14.Visible = True
    Label15.Visible = True
    Select Case Comb01.Text
    Case Is = "Concreto"
        Label15.Caption = "0.2"

    Case Is = "Acero"
        Label15.Caption = "0.05"
    Case Is = "Aluminio"
        Label15.Caption = "0.06"
    Case Is = "Vidrio"
        Label15.Caption = "0.04"
    Case Is = "Madera"
        Label15.Caption = "0.5"
    End Select
End If
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Dim i As Integer
Text2.Text = ""
Text3.Text = ""
Text4.Text = ""
Text5.Text = ""

```

```

Text6.Text = ""
Text9.Text = ""
Text10.Text = ""
Text11.Text = ""
Text17.Text = ""
Check1.Value = 0
Check2.Value = 0
For i = 1 To 27
    data(i, 0) = 0
    data(i, 1) = 0
Next i
MSChart1.ChartData = data
Frame6.Enabled = False
Frame5.Enabled = False
Frame3.Enabled = False
Frame2.Enabled = False
For i = 1 To 27
    Text1(i).Text = ""
    Text8(i).Text = ""
    Text7(i).Text = ""
    Text12(i).Text = ""
    Text14(i).Text = ""
    Text16(27 - i).Text = ""
Next i
End Sub

Private Sub Command5_Click()
Form25.Show
End Sub

Private Sub Command9_Click()
Dim i As Integer
Open Text18.Text For Append As 1
Print #1, ""
Print #1, "***** RESULTADOS PARA LA COLOCACION DE UNA BARRERA
*****"
Print #1, ""
Print #1, " Altura de la Barrera: " & Text2.Text
Print #1, " Distancia entre la barrera y el receptor: " & Text4.Text
If Check1.Value = 1 Then
    Print #1, " Material: " & Comb01.Text
    Print #1, " Espesro (m): " & Text13.Text
End If
If Check2.Value = 1 Then
    Print #1, " Tipo de Tope: " & Command5.Caption
End If
Print #1, ""
Print #1,
"*****"
Print #1, " " & "RESULTADOS"
Print #1,
"*****"
Print #1, " " & " F (Hz)" & " " & " dB" & " " & " dBA" & " "
Atenuación"
Print #1, ""
Print #1, " " & fre(1) & " " & Format(Text12(1).Text,
"0.000") & " " & Format(Text14(1).Text, "0.000") & " " &
Format(Text16(26).Text, "0.000")
Print #1, " " & fre(2) & " " & Format(Text12(2).Text,
"0.000") & " " & Format(Text14(2).Text, "0.000") & " " &
Format(Text16(25).Text, "0.000")
For i = 3 To 6

```

```

Print #1, "                " & fre(i) & "                " & Format(Text12(i).Text,
"0.000") & "                " & Format(Text14(i).Text, "0.000") & "                " & Format(Text16(27 -
i).Text, "0.000")
Next i
For i = 7 To 16
Print #1, "                " & fre(i) & "                " & Format(Text12(i).Text,
"0.000") & "                " & Format(Text14(i).Text, "0.000") & "                " & Format(Text16(27 -
i).Text, "0.000")
Next i
For i = 17 To 26
Print #1, "                " & fre(i) & "                " & Format(Text12(i).Text,
"0.000") & "                " & Format(Text14(i).Text, "0.000") & "                " & Format(Text16(27 -
i).Text, "0.000")
Next i
Print #1, "                " & fre(27) & "                " & Format(Text12(27).Text,
"0.000") & "                " & Format(Text14(27).Text, "0.000") & "                " &
Format(Text16(0).Text, "0.000")
Print #1, ""
Print #1, "Nivel de Presión Sonora General con Barrera (dB): " & Text9.Text
Print #1, "Nivel de Presión Sonora General con Barrera (dBA): " & Text3.Text
Print #1, "Atenuación (dB): " & Text10.Text
Print #1, "Atenuación (dBA): " & Text11.Text
If Check2.Value = 1 Then
Print #1, "Variación debido al tope de la barrera (dBA): " & Text17.Text
End If
Close #1
End Sub

Private Sub Form_Load()

Form22.Top = 0
Form22.Left = 370
Form23.SSTabl.TabEnabled(5) = True
Label8.Enabled = False: Label9.Enabled = False: Label10.Enabled = False:
Label13.Enabled = False: Label14.Enabled = False
Text13.Visible = False: Text15.Visible = False: Text17.Visible = False
Combo1.Visible = False
Command5.Enabled = False
Combo1.AddItem "Concreto"
Combo1.AddItem "Acero"
Combo1.AddItem "Aluminio"
Combo1.AddItem "Vidrio"
Combo1.AddItem "Madera"
Combo1.AddItem "Nuevo Material"
Option7.Value = True
Option1.Value = True
Option5.Value = True
Check2.Value = False
Frame2.Enabled = False
Dim i As Integer
For i = 1 To 27
    data(i, 0) = 0
    data(i, 1) = 0

Next i

MSChart1.ChartData = data

With MSChart1
.Column = 1
.ColumnLabel = "Sin Barrera"
.Column = 2
.ColumnLabel = "Com Barrera"
End With

```

```
End Sub

Private Sub Check1_Click()
If Check1.Value = 1 Then
    Label8.Enabled = True: Label9.Enabled = True: Label14.Enabled = True
    Label15.Visible = True
    Text13.Visible = True
    combol.Visible = True
Else
    Label8.Enabled = False: Label9.Enabled = False: Label14.Enabled = False
    Label15.Visible = False
    Text13.Visible = False
    Combol.Visible = False
End If
End Sub

Private Sub Command1_Click()
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim M As Single
Dim an(1 To 6) As Double
Dim d(1 To 6) As Double
Dim B As Double
Dim c As Integer
Dim at(1 To 27, 1 To 6) As Double
Dim late(1 To 27) As Double
Dim latea(1 To 27) As Double
Dim ltl(1 To 27, 1 To 6) As Double
Dim temp As Double
Dim temp1 As Double
Dim temp2 As Double
Dim temp3 As Double
Dim att(1 To 27, 1 To 6) As Double
Dim e As Integer

Option1.Value = True
Frame2.Enabled = True
If Check1.Value = 1 Then
    If Combol.Text = "" Then
        MsgBox "Debe seleccionar un material", vbCritical, "Alerta"
        GoTo fin
    End If
End If
If Text2.Text = "" Or Text4.Text = "" Then
    MsgBox "Faltan Datos", vbCritical, "Alerta"
GoTo fin
End If
If Check2.Value = 1 Then
    If Text13.Text = "" Then
        MsgBox "Faltan Datos", vbCritical, "Alerta"
        GoTo fin
    End If
    If Combol.Text = "Nuevo Material" Then
        If Text15.Text = "" Then
            MsgBox "Faltan Datos", vbCritical, "Alerta"
            GoTo fin
        End If
    End If
End If
Select Case Combol.Text
Case Is = "Concreto"
e = 2200
```

```

Case Is = "Acero"
e = 7800
Case Is = "Aluminio"
e = 2700
Case Is = "Vidrio"
e = 2500
Case Is = "Madera"
e = 900
Case Is = "Nuevo Material"
e = Text15.Text
End Select
For i = 1 To 27
  Text1(i).Text = fre(i)
Next i
B = Sqr(Val(Text4.Text) ^ 2 + (Text2.Text - h) ^ 2)
For c = 1 To Carriles
  an(c) = Sqr((DistanciaLc(c) - Val(Text4.Text)) ^ 2 + (0.8 - Text2.Text) ^ 2)
  d(c) = Sqr(DistanciaLc(c) ^ 2 + (0.8 - h) ^ 2)
  For i = 1 To 27
    N(i, c) = ((2 * fre(i)) / 341) * (an(c) + B - d(c))
    IL(i, c) = 15 * logd((2 * 3.141516 * N(i, c)) ^ (1 / 2)) / Htan((2 * 3.141516 *
N(i, c)) ^ (1 / 2)) + 5 - 10 * logd(2 * Exp(-(Val(Text2.Text) / (2 * (fre(i) / 341))))
+ 1)
    If Check1.Value = 1 Then
      TL(i) = -47.2 + 20 * logd(Val(Text13.Text) * e * fre(i))
      att(i, c) = IL(i, c) - 10 * logd(1.2 + 10 ^ -((TL(i) - IL(i, c)) / 10))
      at(i, c) = lwt(i, c) - att(i, c)
    Else
      at(i, c) = lwt(i, c) - IL(i, c)
    End If
  Next i
Next c
For i = 1 To 27
  temp = 0
  For j = 1 To Carriles
    temp = 10 ^ (at(i, j) / 10) + temp
  Next j
  late(i) = Format(10 * logd(temp), "0.000")
  Text8(i).Text = late(i)
  latea(i) = Format(10 * logd(temp) + DBA(i), "0.000")
  Text7(i).Text = latea(i)
  Text12(i).Text = ldb(i)
  Text14(i).Text = lpa(i)
Next i
For i = 1 To 27
  Text16(27 - i).Text = Format(Text12(i).Text - Text8(i).Text, "0.000")
Next i
temp = 0
For i = 1 To 27
  temp = 10 ^ (Text12(i).Text / 10) + temp
  temp1 = 10 ^ (Text8(i).Text / 10) + temp1
  temp2 = 10 ^ (Text7(i).Text / 10) + temp2
  temp3 = 10 ^ (Text14(i).Text / 10) + temp3
Next i
Text6.Text = Format(10 * logd(temp), "0.000")
Text9.Text = Format(10 * logd(temp1), "0.000")
Text3.Text = Format(10 * logd(temp2), "0.000")
Text5.Text = Format(10 * logd(temp3), "0.000")
Text10.Text = (Text6.Text) - (Text9.Text)
Text11.Text = (Text5.Text) - (Text3.Text)
For i = 1 To 27
  data(i, 0) = ldb(i)
  data(i, 1) = late(i)
  data3(i, 0) = lpa(i)
  data3(i, 1) = latea(i)

```

```
        data1(i, 0) = ldb(i) - late(i)
        data2(i, 0) = lpa(i) - latea(i)
Next i
MSChart1.ChartData = data

MSChart1.Row = 1: MSChart1.RowLabel = "25"
MSChart1.Row = 2: MSChart1.RowLabel = "31,5"
MSChart1.Row = 3: MSChart1.RowLabel = "40"
MSChart1.Row = 4: MSChart1.RowLabel = "50"
MSChart1.Row = 5: MSChart1.RowLabel = "63"
MSChart1.Row = 6: MSChart1.RowLabel = "80"
MSChart1.Row = 7: MSChart1.RowLabel = "100"
MSChart1.Row = 8: MSChart1.RowLabel = "125"
MSChart1.Row = 9: MSChart1.RowLabel = "160"
MSChart1.Row = 10: MSChart1.RowLabel = "200"
MSChart1.Row = 11: MSChart1.RowLabel = "250"
MSChart1.Row = 12: MSChart1.RowLabel = "315"
MSChart1.Row = 13: MSChart1.RowLabel = "400"
MSChart1.Row = 14: MSChart1.RowLabel = "500"
MSChart1.Row = 15: MSChart1.RowLabel = "630"
MSChart1.Row = 16: MSChart1.RowLabel = "800"
MSChart1.Row = 17: MSChart1.RowLabel = "1000"
MSChart1.Row = 18: MSChart1.RowLabel = "1250"
MSChart1.Row = 19: MSChart1.RowLabel = "1600"
MSChart1.Row = 20: MSChart1.RowLabel = "2000"
MSChart1.Row = 21: MSChart1.RowLabel = "2500"
MSChart1.Row = 22: MSChart1.RowLabel = "3150"
MSChart1.Row = 23: MSChart1.RowLabel = "4000"
MSChart1.Row = 24: MSChart1.RowLabel = "5000"
MSChart1.Row = 25: MSChart1.RowLabel = "6300"
MSChart1.Row = 26: MSChart1.RowLabel = "8000"
MSChart1.Row = 27: MSChart1.RowLabel = "10000"

With MSChart1
.Column = 1
.ColumnLabel = "Sin Barrera"
.Column = 2
.ColumnLabel = "Con Barrera"
End With
If Check2.Value = 1 Then
Dim T As Single
    Select Case Command5.Caption
        Case Is = "Simple"
            T = 0
        Case Is = "Perfil T"
            T = 1.25
        Case Is = "Perfil Y"
            T = 0.75
        Case Is = "Perfil Cilindrico"
            T = 2.5
        Case Is = "Perfil Dentado"
            T = 3
    End Select
    Text17.Text = Text11.Text + T
End If
fin: End Sub

Private Sub Command3_Click()
End
End Sub

Private Sub Option1_Click()
Option5.Enabled = True
Option6.Enabled = True
Frame6.Enabled = True
```

```
MSChart1.Title = "COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE PRESIÓN SONORA"  
MSChart1.ShowLegend = True  
If Option5.Value = True Then  
    MSChart1.ChartData = data  
End If  
If Option6.Value = True Then  
    MSChart1.ChartData = data3  
End If  
With MSChart1  
    .Column = 1  
    .ColumnLabel = "Sin Barrera"  
  
    .Column = 2  
    .ColumnLabel = "Con Barrera"  
End With  
End Sub  
  
Private Sub Option3_Click()  
MSChart1.ChartData = data1  
Option5.Enabled = False  
Option6.Enabled = False  
Frame6.Enabled = False  
MSChart1.Title = "ATENUACIÓN"  
MSChart1.ShowLegend = False  
With MSChart1  
    .Column = 1  
    .ColumnLabel = "Atenuación"  
End With  
End Sub  
  
Private Sub Option5_Click()  
If Option1.Value = True Then  
MSChart1.ChartData = data  
End If  
If Option3.Value = True Then  
    MSChart1.ChartData = data1  
End If  
With MSChart1  
    .Column = 1  
    .ColumnLabel = "Sin Barrera"  
    .Column = 2  
    .ColumnLabel = "Con Barrera"  
End With  
End Sub  
  
Private Sub Option6_Click()  
If Option1.Value = True Then  
    MSChart1.ChartData = data3  
End If  
If Option3.Value = True Then  
    MSChart1.ChartData = data2  
End If  
With MSChart1  
    .Column = 1  
    .ColumnLabel = "Sin Barrera"  
    .Column = 2  
    .ColumnLabel = "Con Barrera"  
End With  
End Sub  
  
Private Sub Option7_Click()  
MSChart1.chartType = VtChChartType3dLine  
End Sub  
  
Private Sub Option8_Click()
```

```
MSChart1.chartType = VtChChartType2dLine
End Sub

Private Sub Text13_LostFocus()
    If Text13.Text <> "" Then
        If IsNumeric(Text13.Text) = False Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
            Text13.Text = ""
        End If
        If Val(Text13.Text) < 0 Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
            Text13.Text = ""
        End If
    End If
End Sub

Private Sub Text15_LostFocus()
    If Text15.Text <> "" Then
        If IsNumeric(Text15.Text) = False Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
            Text15.Text = ""
        End If
        If Val(Text15.Text) < 0 Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
            Text15.Text = ""
        End If
    End If
End Sub

Private Sub Text2_LostFocus()
    If Text2.Text <> "" Then
        If IsNumeric(Text2.Text) = False Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
            Text2.Text = ""
        End If
        If Val(Text2.Text) < 0 Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
            Text2.Text = ""
        End If
    End If
End Sub

Private Sub Text4_LostFocus()
    If Text4.Text <> "" Then
        If IsNumeric(Text4.Text) = False Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico", vbCritical, "Alerta"
            Text4.Text = ""
        End If
        If Val(Text4.Text) < 0 Then
            MsgBox "Debe Introducir un Valor Numerico Mayor a Cero", vbCritical, "Alerta"
            Text4.Text = ""
        End If
    End If
End Sub
```