BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

Universidad de Valladolid

Propagación del sonido en bosques. Análisis comparativo de las medidas *in situ*, en laboratorio y de los valores predichos por un modelo.

Ana Isabel Tarrero Fernández

Tesis de Doctorado

Facultad de Ciencias

Directores: Dr. D. Julio González Suárez
Dra. Dª. María Ángeles Martín Bravo

2002

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

Departamento de Termodinámica y Física Aplicada
Escuela Universitaria Politécnica de Valladolid

TESIS DOCTORAL

"PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN BOSQUES. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS MEDIDAS IN SITU, EN LABORATORIO Y DE LOS VALORES PREDICHOS POR UN MODELO"

Ana Isabel Tarrero Fernández

Valladolid, Abril de 2002

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DEPARTAMENTO DE TERMODINÁMICA Y FÍSICA APLICADA

BIBLIOTECA VIRTUAL

"PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN BOSQUES. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS MEDIDAS IN SITU, EN LABORATORIO Y DE LOS VALORES PREDICHOS POR UN MODELO"

Directores: Julio González Suárez

María Ángeles Martín Bravo

Tesis presentada por **Ana Isabel Tarrero Fernández** para optar al grado de Doctor por la Universidad de Valladolid.

Valladolid, Abril de 2002

A mi familia

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

El genio comienza grandes obras,
pero sólo el trabajo las acaba.
Joubert Joseph

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

Agradecimientos:

Muchas personas e Instituciones me han ayudado de una forma u otra en la realización de este trabajo, pero especialmente, mis directores de Tesis a quienes agradezco profundamente sus consejos, su ánimo y su apoyo en todo momento. También quiero agradecer al Ciba, al Vivero de la Junta de Castilla y León, al LTI, a la DTU, a Delta Acoustic and Vibration, a la CICYT y a la Universidad de Valladolid, por su colaboración, y a mis compañeros de departamento por su apoyo.

No quiero olvidarme de María Machimbarrena, Susana Quirós, Vicente Cutanda, Manuel Arenal y Ángel Abascal, con los que he compartido muchos momentos y me han ayudado en la toma de medidas, programas, traducciones,.....

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 - Consideraciones generales 05

1.2 - Mecanismos principales que intervienen en la propagación del sonido en exteriores 11

1.2.1 - La divergencia geométrica 12

1.2.2 - La atmósfera como medio de propagación 13

1.2.3 - El suelo 15

1.2.4 - La presencia de obstáculos 16

1.3 - Resumen de las publicaciones más significativas relacionadas con la propagación del sonido a través de bosques 17

1.4 - Objetivos específicos 23

1.5 - Programación de los distintos capítulos 24

1.6 - Bibliografía 26

CAPÍTULO 2: PROPAGACIÓN DE SONIDO EN EXTERIORES

2.1 - Ecuación diferencial de onda. Ecuación de Helmholz 33

2.2 - Métodos de resolución de la ecuación de Helmholz 35

2.3 - Métodos de predicción en la propagación del sonido en exteriores 38

2.3.1 - Teoría de rayos 39

2.3.1.1 - Propagación del sonido en un medio homogéneo 39

2.3.1.2 - Propagación del sonido en un medio no homogéneo 40

2.3.1.3 - Inconvenientes de la teoría acústica de rayos 43

2.3.2 - Soluciones analíticas 43

2.3.2.1 - Refracción descendente 45

2.3.2.2 - Refracción ascendente 46

2.3.3 - Modelos híbridos 47

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

2.4 - Bibliografía 51

CAPÍTULO 3: MODELOS ANALÍTICOS DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN LA ATMÓSFERA CONSIDERANDO EL SUELO

3.1 - Introducción 57

3.2 - Modelo de suelo para una atmósfera homogénea 58

3.3 - Impedancia acústica específica 64

3.3.1 - Definición 64

3.3.2 - Superficies de reacción local y reacción extendida 66

3.3.3 - Modelos de impedancia 67

3.3.3.1 - Modelo de un parámetro 68

3.3.3.2 - Modelo de 2 parámetros 69

3.3.3.3 - Modelo de 4 parámetros 69

3.4 - Bibliografía 73

CAPÍTULO 4: CÁLCULO DE IMPEDANCIAS

4.1 - Introducción 77

4.2 - Determinación de Z por métodos indirectos 77

4.3 - Descripción de los suelos estudiados 80

4.4 - Montaje experimental y estrategia de medida 82

4.5 - Resultados obtenidos 85

4.5.1 - Valores de la resistividad al flujo en los distintos suelos 89

4.5.2 - Análisis comparativo entre los distintos suelos 93

4.6 - Discusiones 98

4.7 - Métodos directos para obtener la impedancia de un suelo 99

4.8 - Bibliografía 102

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 5: RESULTADOS DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN UN BOSQUE DE PINOS

5.1 - Introducción 107
5.2 - Estudio comparativo de los valores obtenidos en un suelo con árboles y otro sin árboles 107
5.2.1 - Descripción del lugar de medida 108
5.2.2 - Procedimiento de medida 108
5.2.3 - Resultados experimentales 110
5.2.3.1 - Valores obtenidos en la primera campaña 111
5.2.3.2 - Valores obtenidos en la segunda campaña 116
5.2.3.3 - Análisis comparativo entre ambas situaciones 118
5.2.4 - Discusiones 125
5.3 - Influencia de la densidad de vegetación 125
5.4 - Influencia de la temperatura 128
5.5 - Bibliografía 131

CAPÍTULO 6: MODELOS DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE BOSQUES

6.1 - Introducción 135
6.2 - Dispersión 136
6.3 - Modelos de dispersión 138
6.3.1 - Modelo de dispersión de Foldy 138
6.3.2 - Modelo de dispersión múltiple de Embleton 142
6.3.3 - Modelo de Bullen y Fricke 145
6.3.4 - Modelo de Leschnik 146
6.4 - Modelo de propagación de sonido en exteriores Nord 2000 147
6.5 - Bibliografía 155

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 7: VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

7.1 - Introducción 161

7.2 - Modelo teórico. Influencia de los parámetros del bosque en el modelo 162

7.2.1 - Diámetro de los troncos de los árboles 164

7.2.2 - Altura de los árboles 165

7.2.3 - Densidad de árboles 165

7.3 - Medidas experimentales 166

7.3.1 - Equipo utilizado 166

7.3.2 - Procedimiento de medida 166

7.4 - Descripción de los lugares de medida y resultados 169

7.4.1 - Bosques regulares 170

7.4.1.1 - Bosque de chopos 170

7.4.1.2 - Bosque de catalpas 190

7.4.1.3 - Bosque de plátanos 203

7.4.1.4 - Bosque de chopos de 2 años 208

7.4.2 - Bosques irregulares 216

7.4.2.1 - Bosque de pinos 216

7.4.2.2 - Bosque de encinas 229

7.4.3 - Valores del parámetro nQ para los diferentes bosques 233

7.5 - Discusiones generales 234

CAPÍTULO 8: MODELO A ESCALA

8.1 - Introducción 243

8.2 - Equipo de medida 245

8.3 - Descripción de las características de los bosques 246

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

8.4 - Metodología de muestreo 248
8.5 - Resultados experimentales 251
8.6 - Comparación de los valores experimentales y los obtenidos con el modelo teórico Nord 2000 255
8.7 - Comparación de los valores obtenidos en los bosques reales y los del laboratorio 266
8.8 - Bibliografía 268

CONCLUSIONES 273
PROPUESTAS DE MEJORA AL MODELO NORD 2000 281
TRABAJOS FUTUROS 281
ANEXOS 285

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

1.1 - Consideraciones generales

1.2 - Mecanismos principales que intervienen en la propagación del sonido en exteriores

1.2.1 - La divergencia geométrica

1.2.2 - La atmósfera como medio de propagación

1.2.3 - El suelo

1.2.4 - La presencia de obstáculos

1.3 - Resumen de las publicaciones más significativas relacionadas con la propagación del sonido a través de bosques

1.4 - Objetivos específicos

1.5 - Programación de los distintos capítulos

1.6 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 - CONSIDERACIONES GENERALES

Una de las características que encontramos en los tiempos actuales es la presencia de elementos no deseados en los ambientes habituales donde se desarrolla la vida de las personas, como es el caso de los contaminantes, tanto en formas de materia como de energía, que "habitan" nuestra atmósfera y que perturban considerablemente los ambientes exteriores e interiores. La constante incorporación de focos contaminantes en el Medio Ambiente están produciendo unos efectos perniciosos, ciertamente preocupantes, que es necesario conocer, evaluar, vigilar y corregir, si no queremos agudizar el riesgo de originar un ambiente no apto para el desarrollo de nuestras actividades. Estas consideraciones hacen que el ruido adquiera un papel relevante entre los problemas que se plantean en la sociedad actual y por tanto algo que es preciso contemplar y resolver. Una de las formas de luchar contra el ruido es interferir en su propagación, por lo cual, la acústica de exteriores ha recibido una atención especial en los últimos años. Es necesario tomar conciencia del ruido, y nuestros conocimientos y nuestras habilidades deben hacer frente a estos problemas.

El ruido es uno de los factores que contribuyen considerablemente a perturbar nuestro entorno, sobre todo en los núcleos urbanos e industriales, como consecuencia del incremento de la población, del desarrollo industrial, del aumento de los medios de transporte, etc, que han dado lugar a un incremento espectacular a lo largo de las últimas décadas. Es como si el progreso tuviera que llevar aparejado un déficit en la calidad de los ambientes como consecuencia de

la aparición de nuevos focos de ruido cada vez más intensos y más abundantes. Por otra parte, el ciudadano ha adquirido un nivel de vida en el que ya no cuenta solamente la posibilidad de disponer de cierta "cantidad" de cosas básicas para su uso y disfrute, sino que también ha tomado conciencia de la importancia que tiene "la calidad" y exige que se adopten soluciones o medidas para mejorarla, tanto si se trata de los recintos interiores (vivienda, lugar de trabajo, lugares de ocio, etc.) como en el exterior, espacios urbanísticos.

En relación al ruido, que es el tema que nos ocupa, diremos que es un agente que deteriora considerablemente el confort de nuestros espacios vitales y en [1] se define como "cualquier sonido no deseado". En el ruido intervienen tres agentes: fuente, medio de propagación y receptor. De esta forma para reducir el ruido se puede incidir sobre alguno de estos agentes o sobre todos ellos.

Según se expone en [28] el control de ruido inicialmente se centró en incidir en la propagación y una posible solución a los problemas existentes era considerar la incorporación de barreras. Pero pronto se pensó que la mejor solución, y la más barata, era tratar de controlar la generación del ruido. En nuestros tiempos conocer el impacto del ruido en distintos espacios urbanísticos es esencial en la planificación de zonas urbanas, y por tanto, es necesario desarrollar modelos fiables que permitan predecir el ruido para poder obrar en consecuencia.

En la actualidad se están haciendo numerosos estudios y estableciendo diversas iniciativas, tanto desde el punto de vista teórico, como tecnológico y normativo, para disminuir el número de fuentes y sus emisiones, y para evitar que el ruido se propague en el espacio, con el fin de proteger al receptor. Una de las posibilidades de actuación que se ha estimado de cierta eficacia, como medio de protección ante el ruido, es la utilización de las barreras contra el ruido, entendiendo por barrera todo obstáculo que interpuesto en la propagación del

sonido, disminuye la intensidad acústica que llega a un punto determinado procedente de una fuente. De esta forma distinguimos dos tipos de barreras: artificiales y naturales.

Dentro de las artificiales incluimos las actuaciones, construcciones, y demás acciones diseñadas y pensadas para impedir la libre propagación del ruido, con ello nos referimos a la incorporación de muros o pantallas específicas construidas con este fin. Sin embargo, la incorporación de barreras artificiales supone una intervención extraña en el medio, y por tanto, una agresión al entorno que es preciso aminorar todo lo posible.

Otra alternativa, más acorde con las necesidades de acondicionamiento del medio, son las barreras naturales, entendiendo por tal las que hacen referencia a la colocación de elementos naturales que interfieren favorablemente en el proceso de evitar la propagación del sonido. Es el caso, por ejemplo, de las zonas verdes, arboledas, montículos naturales, etc. El recurso a la interposición de barreras naturales es un instrumento urbanístico que se ha manifestado muy útil para este tipo de cometidos. Con respecto a esto habría que diferenciar entre el efecto real y el subjetivo pero en definitiva, se trata de conseguir espacios donde el ciudadano se sienta cómodo y sirvan realmente de goce y disfrute, y no los encuentre nocivos, o simplemente, molestos y desagradables. Lógicamente para estimar la influencia que tienen este tipo de barreras es necesario conocer cómo afectan tales elementos al fenómeno de la propagación.

En los últimos años un conocimiento más pormenorizado de los fenómenos físicos involucrados en los problemas del ruido, a la vez que un progresivo desarrollo tecnológico, como es la posibilidad del uso de los ordenadores cada vez más potentes y de manejo más fácil, han permitido abordar el estudio mediante la incorporación de modelos de predicción, como instrumentos útiles para describir y evaluar el proceso. Sin embargo, en muchas

ocasiones como sucede cuando aparecen turbulencias y éstas interactúan con otras complejidades, tales como colinas, arcenes,... la situación llega a ser realmente complicada.

El término Control del Ruido comprende una variedad de problemas de distinta índole y multidisciplinares, que abarcan aspectos derivados del campo de la física como fenómeno natural, hasta aspectos de tipo técnico, social, económico e incluso patológico. En el trabajo que presentamos nos ocuparemos de estudiar el fenómeno de la propagación en exteriores, en la línea de Control del Ruido, cuando se tienen en cuenta tres factores fundamentales: suelo, obstáculos y parámetros meteorológicos. En la propagación en estos medios exteriores aparece el suelo como elemento fundamental a considerar, y su presencia se suele estimar mediante una superficie con unas características determinadas explicitadas a través de un parámetro denominado impedancia acústica, término que se desarrollará posteriormente.

El primer tratamiento directamente relacionado con la propagación del sonido sobre una superficie de impedancia finita, se efectuó en 1909 cuando Sommerfeld [29] publicó una solución del dipolo de Hertz, es decir, un dipolo corto comparado con la longitud de onda, emitiendo ondas de radio en presencia de un plano conductor. Este es un resultado que podría ser directamente trasladado a un problema de acústica de una fuente puntual, monopolo, sobre el suelo. Esta publicación marcó el comienzo de un inusual y largo desarrollo de soluciones para el caso fundamental de una fuente simple sobre una superficie plana. Esta parte del desarrollo comenzó en el campo del electromagnetismo y dio lugar a importantes estudios y debates sobre la interpretación de ondas de superficie. Un debate similar en el mundo científico se produce en el campo de la acústica unos pocos años después.

Las publicaciones específicas de acústica sobre la propagación de sonido desde una fuente puntual cuando existe una superficie de impedancia, se iniciaron alrededor del año 1940. A partir de este momento la necesidad de incrementar la precisión en temas acústicos, hace que el campo sonoro no pueda ser descrito siempre con aproximaciones de ondas planas. Alguna de las teorías publicadas fueron clasificadas por "War-oriented Research Work" en los Estados Unidos durante la segunda guerra mundial, y posteriormente se publicaron varios trabajos como [17] [18] [19] que contribuyeron en gran medida a desarrollar esta materia.

Al plantear el estudio que presentamos en este trabajo nos propusimos dos objetivos fundamentales: abundar en el conocimiento del fenómeno de propagación del sonido, desde el punto de vista meramente físico, cuando en el medio existe un tipo de obstáculos, los árboles en este caso, y como segundo objetivo, poder aportar nuevos datos que puedan ser útiles para planificar y diseñar espacios urbanísticos que puedan servir para optimizar, avalar o contrastar la respuesta de los modelos que se están proponiendo en este tipo de estudios.

El enfoque que nos proponemos seguir pretende recoger las pautas indicadas en el Libro Verde (DO C 200, de 30-6-1997, p.28) sobre política futura de la lucha contra el ruido (COM(96)final). Este libro verde sirve como referencia de partida de diversas iniciativas, y en este sentido se enmarca el dictamen favorable del Parlamento Europeo sobre ese Libro Verde y la reacción positiva de más de 200 partes interesadas (Estados miembros incluidos). La Comisión ha elaborado una Directiva sobre Ruido Ambiental, [1] con la que pretende sentar las bases de un planteamiento más coherente y eficaz en relación con este fenómeno.

Según esta Directiva la población de la Unión Europea que sufre molestias por el ruido ambiental, se sitúa entorno a los 100 millones de personas. De las cuales, por lo menos 20 millones padecen graves alteraciones del sueño y pueden llegar a sufrir distintos tipos de enfermedades inducidas por el ruido. Por ello la Directiva propuesta [1] sienta las bases de un planteamiento más eficaz y rentable para ser aplicado por las autoridades locales, los Estados miembros y la Comunidad. El grado real de reducción del número de personas afectadas por el ruido dependerá de las medidas que tomen los Estados miembros.

La parte que más nos afecta, desde el punto de vista de este trabajo, es lo relativo a Evaluación y Gestión del ruido ambiental y los objetivos principales se especifican al indicar que:

La presente Directiva tiene por objeto establecer un planteamiento común para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos que la exposición al ruido ambiental tiene sobre la salud humana. Este planteamiento consiste en:

a) La evaluación del ruido ambiental en los Estados miembros, sobre la base de métodos comunes.

b) La información a la población sobre el ruido ambiental y sus efectos.

c) Se adoptarán medidas para reducir el ruido cuando resulte necesario y para mantener la calidad del entorno acústico cuando esta sea buena.

En esta Directiva se insiste en que es preferible concentrar los esfuerzos en tratar de evitar que existan fuentes, más que en poner remedios cuando las fuentes aparecen. De esta forma dice que la experiencia de los estados miembros indica que se puede reducir notablemente el número de personas afectadas por el ruido, con medidas de un coste inferior al 10% del coste de los daños

correspondientes, y considera como aspecto fundamental del planteamiento comunitario el perfeccionamiento de la política que regula las fuentes emisoras del ruido. En general, esa política presenta una relación coste-eficacia mucho mejor que las medidas que se centran en la transmisión del sonido (pantallas acústicas, aislamiento de fachadas, usos del suelo, etc.). Sin embargo, tal y como entendemos la evolución de nuestra sociedad, parece casi imposible, al menos a medio plazo, evitar la presencia de fuentes de ruido. Por este motivo resulta relevante el procedimiento que consiste en interferir sobre la propagación del sonido con pantallas, acondicionamiento del suelo, etc., y es en este sentido en el que encuadramos nuestro trabajo.

1.2 - MECANISMOS PRINCIPALES QUE INTERVIENEN EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EXTERIORES

La propagación del sonido en exteriores es un proceso verdaderamente complejo, donde concurren simultáneamente varios fenómenos físicos de índole muy diferente; teniendo en cuenta que, además, puede producirse interacción entre ellos. Con el fin de tener un mejor conocimiento de los mecanismos, que se ponen en juego al propagarse el sonido, diversos grupos de investigación han efectuado numerosos trabajos desde hace algún tiempo, dando como resultado un gran número de publicaciones editadas en distintos medios especializados (revistas, libros, congresos, etc.). A modo de resumen de las conclusiones más significativas se puede consultar la obra publicada en 1977 por M.E. Delany [10] con título “Sound Propagation in the Atmosphere: a Historical Review”, en la que el autor presenta una revisión histórica en esta materia. También son de destacar, en este sentido los estudios realizados, en el mismo año, por Piercy, Emblenton y Sutherland [26] que publican “Review of noise propagation in the atmosphere”

donde ponen de manifiesto los fenómenos físicos más importantes relacionados con la propagación del sonido en exteriores.

Los mecanismos dominantes en la propagación del sonido en la atmósfera los podemos agrupar en los siguientes apartados:

- La divergencia geométrica
- La atmósfera como medio de propagación
- El suelo
- La presencia de obstáculos

Al estar presentes simultáneamente tantos factores o variables, en la propagación del sonido en exteriores, se hace bastante complejo el conocimiento en detalle de este fenómeno. Podríamos decir que el fenómeno de la propagación es un compendio de un conjunto de fenómenos que interfieren entre sí, es decir, todos tienen que ser considerados simultáneamente en los cálculos.

1.2.1 - La divergencia geométrica

La divergencia geométrica pone de manifiesto que la energía sonora emitida por el foco, se reparte sobre superficies cada vez mayores, según avanza el frente de onda. Este reparto de la energía hace que la intensidad, en los puntos de las superficies, disminuya a medida que se alejan de la fuente. De esta forma, si el foco 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. Con esta propiedad se obtiene que la intensidad del sonido al propagarse se atenúa seis decibelios cada vez que se dobla la distancia debido a la divergencia esférica.

1.2.2 - La atmósfera como medio de propagación

La atmósfera, es esencialmente el medio de propagación del sonido y está compuesta por distintos gases, llevando además partículas en suspensión y otras sustancias. Estos elementos ofrecen diferentes respuestas ante la presencia de una onda sonora. Desde un punto de vista meramente intuitivo podría pensarse que el aire hace de transmisor de la información, o que ejerce solamente un efecto de absorción de energía; sin embargo, en este medio se producen otros fenómenos de suma trascendencia que es preciso conocer y valorar para poder describir con cierto rigor el fenómeno de la propagación, ya que pueden reflejar y dispersar la energía acústica. De esta forma encontramos, por ejemplo, que la velocidad del sonido en el aire es función de varios factores con distintos pesos (velocidad del aire, temperatura, etc.).

Partiendo de los estudios de Newton, y suponiendo que el aire es un gas ideal, homogéneo e isótropo, la velocidad del sonido, c, depende de la temperatura, T, fundamentalmente, a través de la expresión $c = (\gamma RT/M)^{1/2}$, donde M es la masa de un mol de gas, γ es la constante adiabática del gas y R es la constante de los gases ideales. Por tanto, si la temperatura fuera constante en todo el medio también lo sería la velocidad del sonido. Esta aproximación no se suele cumplir en espacios atmosféricos amplios, y tal hipótesis debe ser rechazada desde el principio. Lo que suele suceder es que, dependiendo de las situaciones de la atmósfera, y particularmente de la hora del día, la temperatura disminuye o aumenta conforme aumenta la altura; es decir, lo normal es que, en altura haya un gradiente de temperaturas, que puede ser positivo o negativo, que hace que el fluido sea un medio no homogéneo. También se pueden producir gradientes de temperatura no nulos en planos horizontales amplios, pero no suelen ser significativos en espacios reducidos. En definitiva, la atmósfera no es homogénea en temperatura, y por tanto, la velocidad del sonido tampoco.

Otro parámetro fundamental, a considerar en la propagación del sonido en el aire, es la velocidad del viento que, por ser una magnitud vectorial, sus efectos pueden deberse a variaciones en el módulo, la dirección y el sentido.

En relación con el módulo de la velocidad del viento, dado que el aire es el "soporte" material de la onda sonora, si el medio se mueve la velocidad del sonido se verá afectada de alguna forma. El módulo de la velocidad del viento varía con la altura siguiendo, aproximadamente, un perfil logarítmico [26]. En cuanto a la dirección y el sentido del viento, ya sea a favor o en contra, influyen sobre la propagación modificando sensiblemente la trayectoria de los rayos sonoros. Esto hace que el medio no sea isótropo, es decir, el sonido no se propaga de igual forma en todas las direcciones. La acción conjunta de éstas y de otras variaciones es lo que hace que el sonido se refracte, los rayos modifiquen constantemente su dirección pasando a ser curvas con distinta concavidad, dependiendo de cómo sean los gradientes de temperatura y velocidad del viento.

Otro efecto fundamental de la atmósfera, hasta ahora poco conocido, que influye sobre la propagación del sonido, es que, tanto la temperatura como la velocidad del viento, no solamente varían sus valores promedio en el espacio, sino que además sus valores están oscilando continuamente y tales variaciones puntuales hacen que el medio sea turbulento. Estas turbulencias influyen independientemente de la aportación de las variaciones de los valores promedios. Su efecto se deja sentir fundamentalmente porque producen una dispersión de la energía sonora.

La humedad relativa es otro de los parámetros que hay que considerar cuando el sonido se propaga a través de la atmósfera a grandes distancias ya que ésta absorbe energía sonora debido a la viscosidad del aire, a la conducción térmica, a la difusión de los diferentes constituyentes del aire y a procesos de

absorción molecular del nitrógeno y del oxígeno principalmente. Este último aspecto está estrechamente relacionado con la concentración de vapor de agua como se expone en [26], donde se muestra la atenuación en función de la frecuencia, para una distancia de una longitud de onda, para cuatro humedades relativas distintas, y los resultados son bastante diferentes. También en [26] se muestra el coeficiente de absorción del aire, en dB/100m, para una presión de 1 atmósfera, 20 ºC y una humedad relativa del 70 %.

1.2.3 - El suelo

Nuestro objetivo es estudiar el fenómeno de la propagación del sonido en las proximidades del suelo. La presencia del suelo modifica las condiciones de la propagación del sonido ya que origina reflexiones del sonido, entre otros efectos. La naturaleza y las condiciones del suelo determinan el campo reflejado, y en consecuencia, el campo acústico que se genera al componerse el sonido directo y el reflejado. Por tanto se hace necesario describir y evaluar su composición y sus propiedades mecánicas, que determinan su capacidad para absorber y reflejar la energía sonora.

El efecto del suelo se suele poner de manifiesto mediante una función de trasferencia que modifica al rayo incidente y nos produce el sonido reflejado. En esta función de trasferencia, además de tener en cuenta las especificaciones geométricas de la posición del rayo incidente respecto de la superficie del suelo y la forma de producirse el fenómeno de la reflexión de una onda esférica, aparecen también las características específicas del propio suelo, su composición, su comportamiento mecánico, etc. Para poder evaluar esa función de trasferencia que supone la presencia del suelo, es necesario la descripción de las propiedades de la superficie del suelo, para lo que se introduce el concepto de

impedancia acústica. Más adelante, en el capítulo 3, veremos como se define y se calcula para algunos tipos de suelos.

1.2.4 - La presencia de obstáculos

Los obstáculos (que pueden ser objetos o deformaciones en la topografía del suelo) que se encuentran a lo largo de la trayectoria de una onda, pueden reflejar, difractar, dispersar o absorber la energía que transporta una onda.

En el caso de que los obstáculos sean árboles aparecen también fenómenos indirectos en el sentido de que además de producir, en mayor o menor medida, los efectos indicados anteriormente, los árboles modifican, mediante sus raíces, las características del suelo haciéndolo más poroso, es decir, se produce un efecto añadido, difícil de evaluar. Es por ello que, cuando se trata de valorar la influencia de los árboles en la propagación, resulte bastante difícil asignar a cada aspecto concreto su contribución específica, y suele recurrirse a indicar valores globales de atenuación medidos en distintas situaciones, sin detenerse a pormenorizar la causa real y concreta que lo origina.

1.3 - RESUMEN DE LAS PUBLICACIONES MÁS SIGNIFICATIVAS RELACIONADAS CON LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO A TRAVÉS DE BOSQUES

En la actualidad se conocen un gran número de estudios que están relacionados con la propagación del sonido a través de bosques. A continuación, y utilizando como referencia [30], vamos a exponer un resumen de las publicaciones más relevantes en este campo, que nos servirán de guía en nuestro desarrollo. Todas ellas describen el método seguido, la localización de la fuente y

el receptor, sus alturas, las consideraciones o no de parámetros meteorológicos, el tipo de sonido empleado, etc. y muestran los resultados de las medidas y los modelos utilizados. En algunos casos se comparan unas con otras llegando a veces a conclusiones contradictorias y opiniones divergentes, ya que mientras en algunas publicaciones se encuentra que los efectos del bosque son mínimos en otras presentan un efecto muy significativo.

En 1946 se publicó el primer artículo relacionado con la propagación de sonido en el interior de bosques; fue escrito por Eyring [12] y en él expone el resultado de sus investigaciones en las junglas de Panamá. Define el término "exceso de atenuación", EA, como una atenuación mayor o menor de la dada por la divergencia geométrica. Considera que los gradientes en la velocidad del viento y en la temperatura son despreciables y asume que hay un EA debido a la jungla. En sus medidas colocaba la fuente y el receptor dentro de la jungla y el receptor lo situaba a 1.5 m sobre el suelo, con el fin de que fuese parecido a la altura del oído humano. Eyring determinó que la visibilidad está relacionada con el exceso de atenuación de forma que ésta aumenta cuanto menor sea la visibilidad.

En 1959 Wiener y Keast [34] llevaron a cabo un estudio similar en las praderas de Eastern Maine, sus datos concuerdan con los de Eyring respecto a la visibilidad y afirman que los efectos de absorción dominan sobre los efectos de dispersión.

En 1963 Embleton [11] realizó medidas en 4 tipos de bosques, uno de hoja caduca y tres de hoja perenne (cedros, pinos y píceas), con la fuente fuera del bosque y el receptor dentro, y con ambos en el interior del bosque. Estudios previos no incluyeron los efectos de los bordes del bosque. También realizó

medidas experimentales en el laboratorio usando ramas cortadas de los diferentes tipos de árboles y estudió sus oscilaciones en el rango de frecuencia de interés, usando un acelerómetro. Con estos estudios encontró un exceso de atenuación constante de 2 a 3 dB/100 m, independientemente de la visibilidad, resultado que estaba en desacuerdo con los trabajos previos. También propuso que la atenuación seguía una curva con forma de S y postuló que la forma de la curva podría indicar la absorción debida a las ramas. Análisis posteriores mostraron que mientras la dependencia de la frecuencia podría estar relacionada con las oscilaciones de las ramas, el exceso de atenuación no.

En 1971 Alan Bjornsen en su Tesis Científica de Master [5] mostró que la atenuación es más grande cuando la fuente se localiza fuera del bosque forzando al sonido a propagarse por su contorno. Estudió tres tipos diferentes de árboles y encontró resultados similares, pero la frecuencia de máxima atenuación difiere para los tres tipos de árboles. En el mismo año Richard Frank [13] publicó su tesis sobre la efectividad de las plantas como barreras de sonido en las carreteras. Estudió bosques de hoja caduca, homogéneos y heterogéneos, y encontró que los heterogéneos atenúan mejor el sonido, y determinó que las plantaciones de bosques no son muy efectivas como barreras al sonido, pero por estética y seguridad se emplean en las carreteras. En el mismo año Cook y Haverbeke [9] publicaron un estudio para el Departamento de Agricultura de U.S. con sus recomendaciones para el uso de árboles y arbustos para disminuir el ruido, tanto en zonas residenciales como en carreteras, y encontraron que los cinturones de árboles debían ser amplios, densos y preferiblemente de coníferas que permiten reducir los niveles de ruido entre 5 y 10 dB.

En 1972 aparecieron nuevas publicaciones con más detalles en este tema. Donald Aylor [3] [4] propuso una expresión teórica que predice el exceso de atenuación, pero sólo es válida en algunos casos, principalmente en aquellas

condiciones en las que la absorción del sonido por los árboles es importante. Encontró que la dispersión en los troncos es el principal responsable de la atenuación a medias y altas frecuencias, mientras que a bajas frecuencias el suelo es el factor principal. También encontró que las hojas anchas atenúan el sonido mejor que las estrechas.

En 1977 Carlson, McDaniel y Reethof [8] estudiaron las características de absorción de la corteza de los árboles y del suelo usando un tubo de impedancias, y encontraron que las cortezas más gruesas proporcionan más absorción que las delgadas, con un rango de 0,02 a 0,1 para el coeficiente de absorción. Sus estudios mostraron que la absorción actúa como la divergencia geométrica, se hace más grande para largas distancias de propagación. Marten, Marler y Quine [20,21] estudiaron los efectos de la altura del receptor, y comprobaron que afecta a la atenuación más que el tipo de hábitat. El mismo año M.J.M. Martens publicó un artículo [22] en el que se estudiaba la influencia del suelo en la propagación del sonido. Construyó un modelo de ordenador para estudiar qué ocurre cuando la onda se refleja en el suelo. Encontró que el bajo nivel que se produce para una frecuencia comprendida entre 200 y 600 Hz es debido a la interferencia entre la onda directa y la reflejada en el suelo. Comparando los resultados calculados y los experimentales obtuvo el coeficiente de reflexión del suelo y su impedancia acústica. En el mismo año Yamada, Watanabe, Nakamura, Yokoyama y Takeoka [35] calcularon el coeficiente de absorción de un árbol y encontraron que era proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia.

En 1979 Burns [7] trabajó con pinos dentro de un laboratorio y entre los mecanismos considerados incluyó la absorción termoviscosa de la superficie, la absorción debida a la resonancia de las ramas, la absorción debida a la resonancia de las agujas y la dispersión producida por los troncos. Los 2

primeros mecanismos los estudió en una cámara reverberante y encontró que la absorción termoviscosa debida a las ramas de los pinos es el factor de mayor contribución en la atenuación. Unos años más tarde Martens y Michelsen [25] encontraron la atenuación debida a las hojas usando un vibrómetro Doppler Laser para estudiar las vibraciones de las hojas. Tang, Ong y Woon [32] en 1986 usaron el método de Monte Carlo para simular la propagación del sonido a través de seis tipos diferentes de follaje frondoso, que les llevó a exponer que las hojas pueden alterar o dispersar el sonido por difracción y reflexión.

En 1980 Martens [23] modeló un bosque en una cámara anecoica y encontró que actúa como un amplificador en las frecuencias medias y Talaske en su tesis [31] especuló sobre que la absorción en un bosque está causada por la capa de espesor orgánico que producen los árboles dando lugar a impedancias más bajas en el suelo del bosque.

En 1982 Bullen y Fricke [6] modelaron la propagación a través de un gran número de árboles, como un problema clásico de difusión. Propusieron una ecuación diferencial general y compararon las predicciones de un pequeño estudio de modelo a escala y los resultados medidos.

En 1984 Fricke publica un trabajo [14] donde expone que hay tres fenómenos importantes en la propagación del sonido a través de bosques: a) La interferencia entre la onda directa y la onda reflejada en el suelo; b) La dispersión producida por los troncos, las ramas, el suelo y las turbulencias en el aire; c) La absorción debida a los árboles, el suelo y el aire. La impedancia del suelo, sobre el cual se propaga el sonido, afecta a la atenuación, principalmente a bajas frecuencias, en el rango de 250-500 Hz. La onda directa y la reflejada interfieren y la interferencia, que puede ser constructiva o destructiva, está determinada por la diferencia de las longitudes de las trayectorias recorridas por

ambas ondas, la impedancia del suelo y la coherencia de las ondas directas y reflejadas. La dispersión producida por los troncos y las ramas son efectos importantes a frecuencias medias, y la absorción de la corteza y el follaje son fenómenos que se ponen de manifiesto a frecuencias altas.

La humedad relativa afecta a la impedancia del suelo, a la dispersión por el suelo y los árboles, y a la absorción por los árboles. Con experimentos realizados en una cámara reverberante encontró que el coeficiente de absorción máximo de la muestra utilizada se obtuvo para humedades relativas en la cámara entorno al 75%. Este resultado coincide con el obtenido por Ando y Kosaka [2] usando un tubo de impedancias.

También expone que el exceso de atenuación depende críticamente de las alturas de la fuente y del receptor y que se utilizan los árboles en el control del ruido porque proporcionan unas condiciones de suelo, crean un micro-clima, producen un efecto psicológico beneficioso y contribuyen a la atenuación del sonido a altas frecuencias. En 1986 encontró que la atenuación generalmente se incrementaba con el aumento de la humedad relativa en un amplio rango de frecuencias y tipos de bosques.

En 1986 Martens y Huisman [24] publican que los árboles de hoja perenne atenúan más que los de hoja caduca y los de hoja caduca atenúan más que el césped sin árboles y en [16] desarrollaron un modelo de trazado de rayo para la propagación del sonido que incluía los efectos de la vegetación. También intentaron incluir los efectos térmicos y de viento pero el modelo sólo trabajaba bien para procesos isotérmicos, sin viento y no permitía cambios en la topografía.

En 1988 M.A. Price, K. Attemborough, Nicholas W. Heap [27] realizaron medidas experimentales en tres bosques diferentes para varias posiciones distintas del micrófono receptor y para varias condiciones meteorológicas, con

medidas durante el mismo día, a diferentes horas, y en diferentes días, en distintas estaciones del año. Los resultados se compararon con un modelo teórico obtenido sumando las contribuciones individuales del suelo, los troncos, las ramas y el follaje. Las dos últimas contribuciones fueron predichas por una aproximación de dispersión múltiple modificada empíricamente. La dispersión de un array de cilindros de madera se midió en una cámara anecoica. La suma de los efectos del suelo y de la dispersión en el modelo mejoraron el acuerdo con los datos experimentales en las frecuencias medias, de 1 a 2 KHz, para distancias cortas pero es necesario un modelo más sofisticado que incluya la interacción entre ambos efectos. Las propiedades acústicas observadas en los tres casos estudiados son diferentes.

En 1991 Huisman y Attenborough [15] publicaron un informe que estudiaba la reverberación y la atenuación en un bosque de pinos a 10 y 100 m de la fuente. Usaron varios modelos para intentar entender los resultados. Para frecuencias bajas hicieron los cálculos para una fuente puntual y un modelo de impedancia de 2 parámetros. Trabajaron también con un modelo de dispersión múltiple para frecuencias altas. En las frecuencias medias sumaron la contribución de ambos modelos. Desafortunadamente, la propagación del sonido en bosques es demasiado complicada y esta aproximación no dio resultados satisfactorios, y con estudios posteriores determinaron lo contrario, que un modelo de difusión es inapropiado para la propagación del sonido en bosques.

En 1996 Watanabe y Yamada [33] modelaron un bosque en una cámara reververante y encontraron directamente la atenuación, y asumieron que principalmente era debida a la dispersión y la absorción en los tallos, ramas y hojas. También encontraron que el coeficiente de absorción era directamente proporcional a $\sqrt{f}$. El valor de la constante de proporcionalidad fue calculada comparando resultados teóricos y experimentales para cuatro tipos de árboles.

Todo esto pone de manifiesto que se han hecho muchos trabajos en el área de la propagación del sonido en bosques pero es necesario seguir trabajando en este campo para profundizar más en el tema y aclarar los conceptos.

1.4 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Nuestro propósito en este trabajo, según hemos puesto de manifiesto con anterioridad, es tratar de valorar "el efecto individualizado de los árboles", sobre la propagación, aportando valores experimentales y contribuyendo a avalar y a optimizar un modelo en el que aparece como elemento específico la contribución de los árboles. Para ello, tenemos que discriminar las aportaciones de los demás factores, o realizar los estudios en situaciones en las que los otros elementos no contribuyan significativamente. No es fácil alcanzar este objetivo y prueba de ello son los estudios que con tal efecto se han desarrollado y se están desarrollando por diversos grupos de investigación como se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior. Tomando como criterio este objetivo, el trabajo desarrollado lo presentaremos en ocho capítulos.

1.5 - PROGRAMACIÓN DE LOS DISTINTOS CAPÍTULOS

De los ocho capítulos que componen esta tesis, cuatro están dedicados a la exposición de toda la teoría relacionada con el tema de estudio y en los otros cuatro se presentan los resultados experimentales propios de este trabajo, así como la discusión de los mismos, por último, se incorporan las conclusiones, las

propuestas de mejora al modelo Nord 2000 así como una serie de anexos con fotografías de los lugares de medida. A continuación se presenta de forma más detallada el contenido de cada uno de los capítulos.

En el primer capítulo se introduce el concepto de ruido, se exponen los mecanismos principales que intervienen en la propagación del sonido en exteriores, así como una revisión de la literatura existente relacionada con la propagación de sonido en bosques.

En el segundo capítulo se trata la Ecuación de Helmholz y se exponen los métodos más utilizados para resolverla. Se desarrollan modelos de rayos, métodos computacionales, así como métodos híbridos, que combinan modelos de rayos con modelos basados en ondas, mediante soluciones analíticas o soluciones de la ecuación parabólica.

Las soluciones analíticas de la ecuación de Helmholz, en presencia de suelo, se exponen en el capítulo tres, para el caso de una atmósfera homogénea. En este capítulo también se introduce el concepto de impedancia y se presentan los modelos de impedancia de uno, dos y cuatro parámetros más utilizados.

En el cuarto capítulo se utiliza el modelo de impedancia de un parámetro propuesto por Delany y Bazley para calcular los valores de la impedancia de un suelo, y se expone el método seguido para obtener la resistividad al flujo de siete suelos diferentes. Todos los suelos estudiados estaban libres de obstáculos.

En el capítulo quinto se estudia la propagación del sonido en medios con vegetación. Se comparan los valores de la atenuación, en función de la frecuencia, para dos suelos, uno con árboles y otro sin ellos. También se comparan los valores de la atenuación que se obtienen en un bosque de pinos, en

dos direcciones con distinta densidad de árboles, y para una dirección concreta en días con temperaturas muy diferentes para analizar su posible influencia.

En el sexto capítulo se introducen modelos de propagación del sonido en presencia de árboles que tienen en cuenta la dispersión, haciendo más énfasis en el modelo Nord 2000 que se va a utilizar en el desarrollo del trabajo de los siguientes capítulos.

El capítulo séptimo se dedicará a la exposición de los resultados experimentales, obtenidos en bosques reales con características muy distintas, y se compararán con los valores predichos por el modelo para conocer su grado de validez.

Los datos aportados por el modelo Nord 2000 también se compararán con los obtenidos en bosques diseñados en el laboratorio con características, mas o menos, similares a las de alguno de los bosques reales. Los resultados se muestran en el capítulo octavo.

Por último, se presentarán las conclusiones más relevantes de todo el trabajo de la tesis.

Al final de cada capítulo se expone la bibliografía utilizada.

1.6 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Posición Común Nº 25/2001. Con vistas a la adopción de la Directiva 2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Diario Oficial de las Comunidades

Europeas , C297-49-C297/75. 23-10-2001.

[2] Ando, Y. and Kosaka, K. Effect of Humidity on Sound, Absorption of Porous Materials. Applied Acoustics 3, 201-206. 1970.

[3] Aylor, D. Noise Reduction by Vegetation and Ground. J. Acoust. Soc. Am. 51, 197-205. 1972.

[4] Aylor, D. Sound transmission throgh vegetation in relation to leaf area density, leaf width, and breadth of canopy. J. Acoust. Soc. Am. 51, 411-414. 1972.

[5] Bjornsen, A. B. Effect of some meteorological conditions on sound propagation in three North American forest types. Master Thesis, State University of new York, Syracuse . 1971.

[6] Bullen, R. and Fricke, F. Sound Propagation Through Vegetation. J. of Sound and Vibration 80(1), 11-23. 1982.

[7] Burns, S. H. The absorption of sound by pine trees. J. Acoust. Soc. Am. 65, 658-661. 1979.

[8] Carlson, D. E., McDaniel, O. H., and Reethof, G. Noise control by forest. Proc. Inter-Noise 77, Zurich, B576-B586 . 1977.

[9] Cook, D. I. and Van Haverbeke, D. F. Trees andshrubs for noise abatement. Report, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington D.C. 1971.

[10] Delany, M. E. Sound Propagation in the Atmosphere: a Historical Review. Acoustica 38, 201-223. 1977.

[11] Embleton, T. F. Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods. J. Acoust. Soc. Am. 35, 724-732. 1963.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

[12] Eyring, C. F. Jungle acoustics. J. Acoust. Soc. Am. 18, 257-270. 1946.

[13] Frank, R. A. The Effectiveness of Plants for Highway Noise Abatement. Master Thesis . 1971.

[14] Frike, F. Sound Attenuation in Forests. Journal of Sound and Vibratión 92(1), 149-158. 1984.

[15] Huisman, W. H. T. and Attenborough, K. Reverberation and Attenuation in a Pine Forest. J. Acoust. Soc. Am. 90(5), 2664-2677. 1991.

[16] Huisman, W. H. T. and Martens, M. J. M. A Rain Tracing Model of Forest Acoustic Areas and Shelterbelts. Proceedings of the Workshop on Sound Propagation in Forested, edited by M.J.M. Martens, Fac. Sciences, Nijmegen , 161-180. 1986.

[17] Ingard, U. On the Reflection of a Spherical Sound Wave from an Infinite Plane. J. Acoust. Soc. Am 23, 329-335. 1951.

[18] Lawhead, R. B. and Rudnick, I. Acoustic Wave Propagation Along a Constant Normal impedance Boundary. J. Acoust. Soc. Am. 23, 546-549. 1951.

[19] Lawhead, R. B. and Rudnick, I. Measurements on an Acoustic Wave Propagated Along a Boundary. J. Acoust. Soc. Am. 23, 541-545. 1951.

[20] Marten, K. and Marler, P. Sound transmission and its significance for animal vocalization, I. Temperate habitats. Behavioral Ecology and Sociobiology 2, 271-290. 1977.

[21] Marten, K., Quine, D., and Marler, P. Sound transmission and its significance for animal vocalization, II. Tropical forest habitats. Behavioral Ecology and Sociobiology 2, 291-302. 1977.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

[22] Martens, M. J. M. The influence of the soil on the acoustic climate of plant communities. Proc. Inter-Noise 77 B593-B598. 1977.

[23] Martens, M. J. M. Foliage as a low-pass filter: Experiments with model forests in an anechoic chamber. J. Acoust. Soc. Am 67, 66-72. 1980.

[24] Martens, M. J. M and Huisman, W. H. T. Ecosystem acoustics research, Proceedings of the Workshop on Sound Propagation in Forested Areas and Shelterbelts. edited by M.J.M. Martens, Fac. Sciences, Nijmegen , 13-24. 1986.

[25] Martens, M. J. M. and Michelsen, A. Absorption of acoustic energy by plant leaves. J. Acoust. Soc. Am. 69, 303-306. 1981.

[26] Piercy, J. E., Emblenton, T. F. W., and Sutherland, L. C. Rewiew of Noise Propagation in the Atmosphere. J. Acoust. Soc. Am. 61, 1403-1418. 1977.

[27] Price, M. A., Attemborough, K., and Nicholas W. Sound Attenuation Through Trees: Measurements and Models. J. Acoust. Soc. Am. 84(5), 1836-1844. 1988.

[28] Rasmussen, K. Outdoor Sound Propagation near Ground Surfaces. Report no.45 . 1990.

[29] Sommerfeld, A. N. Propagation of Waves in Wireless Telegraphy. Ann.Phys. (París) 28. 1909.

[30] Swaringen, M., Swanson, D., and Reichard, K. Survey of Research of Sound Propagation in Forests. Applied Research Laboratory, Pen State University , 131-138.

[31] Talaske, R. H. The acoustic impedance of a layered forest floor. Master Thesis . 1980.

[32] Tang, S. H., Ong, P. P., and Woon, H. S. Monte Carlo simulation of sound propagation through leafy foliage using experimentally obtained leaf resonance parameters . J. Acoust. Soc. Am. 80, 1740-1744. 1986.

[33] Watanabe, T. and Yamada, S. Sound Attenuation through Absorption by Vegetation. J. Acost. Soc. Jpn. 17(4), 175-182. 1996.

[34] Wiener, F. M. and Keast, D. N. Experimental study of the propagation of sound over ground. J.Acoust. Soc. Am. 31, 724-733. 1959.

[35] Yamada, S., Watanabe, T., Nakamura, S., Yokoyama, H., and Takeoka, S. Noise reduction by vegetation. Proc. Inter-Noise 77 B599-B606. 1977.

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 2

PROPAGACIÓN DE SONIDO EN EXTERIORES

2.1 - Ecuación diferencial de onda. Ecuación de Helmholz

2.2 - Métodos de resolución de la ecuación de Helmholz

2.3 - Métodos de predicción en la propagación del sonido en exteriores

2.3.1 - Teoría de rayos

2.3.1.1 - Propagación del sonido en un medio homogéneo

2.3.1.2 - Propagación del sonido en un medio no homogéneo

2.3.1.3 - Inconvenientes de la teoría acústica de rayos

2.3.2 - Soluciones analíticas

2.3.2.1 - Refracciones descendentes

2.3.2.2 - Refracciones ascendentes

2.3.3 - Modelos híbridos

2.4 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 2:
PROPAGACIÓN DE SONIDO EN EXTERIORES

2.1-ECUACIÓN DIFERENCIAL DE ONDA.ECUACIÓN DE HELMHOLZ

A modo de una breve y muy resumida introducción de los conceptos fundamentales, sobre los que se apoya todo el proceso de la propagación del sonido, que desarrollaremos en capítulos sucesivos, empezaremos considerando que la propagación de las ondas sonoras, en un medio mecánico, está gobernada por la siguiente ecuación diferencial de onda:

$$\nabla^2 p(r) - \frac{1}{c^2(r)}\frac{\partial^2 p(r)}{\partial t^2} = -4\pi\delta(r - r_s) \tag{2.1}$$

Donde r nos indica la posición del punto considerado, δ es la función delta de Dirac, c(r) es la velocidad del sonido y r_s es la localización de la fuente.

Usando la transformada de Fourier, la ecuación diferencial de onda puede ser escrita en el dominio de la frecuencia. Si ignoramos el factor de tiempo, $e^{-i\omega t}$, la ecuación que nos describe la variación de la presión sonora con la posición, es la que se conoce como Ecuación de Helmholtz y viene dada por:

$$(\nabla^2 + k^2)p(r) = -4\pi\delta(r - r_s) \tag{2.2}$$

Donde k es el número de onda definido como $\omega/c(r)$.

Para puntos distintos de la posición de la fuente, la ecuación (2.2) se transforma en $(\nabla^2 + k^2)p(r) = 0$ y por tanto, la presión acústica satisface la Ecuación de Helmholtz homogénea en cualquier punto excepto en la fuente.

Si el medio de propagación es isótropo y homogéneo, y está libre de obstáculos, de forma que no se produzcan reflexiones, el problema se considera ilimitado. En estas condiciones una fuente puntual en un fluido ilimitado genera ondas esféricas y la solución de la ecuación (2.2) es la función de Green [15] en el espacio libre que está dada por:

$$p(R) = G(R) = \frac{e^{-ikR}}{R} \tag{2.3}$$

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Donde $R = |r - r_s|$ es la distancia entre la fuente y el receptor.

Sin embargo, en el caso más general, pueden existir variaciones en las condiciones del medio y también aparecer delimitaciones en el espacio, como superficies frontera u obstáculos, se dice entonces que el problema está limitado, y la solución tiene que cumplir 2 condiciones de contorno: una, debida a la presencia de superficies límite[1] y otra debida a la condición de radiación de Sommerfeld [21] que impone que la presión sonora se aproxima a cero cuando el punto de observación se localiza en el infinito [22]. Considerando ambas condiciones, una expresión general para la solución de la ecuación de Helmholtz limitada e inhomogénea se puede escribir de la forma:

[1] Relacionada con la impedancia acústica específica de la superficie, ésta se introduce en la sección 3.3.1 del siguiente capítulo

$$p(r) = \frac{e^{-ikR}}{R} + f(r) \tag{2.4}$$

Siendo f(r) una función que sea solución general de la ecuación homogénea. La expresión (2.4) nos indica que matemáticamente la solución de la ecuación diferencial inhomogénea está compuesta de una solución particular, G(r), y una solución general de la ecuación homogénea limitada, f(r). Se trata entonces de resolver la ecuación de Helmholz, bien directamente, en los casos que sea posible, o bien, introduciendo alguna aproximación o premisa que nos permita obtener otra ecuación diferencial de solución más sencilla.

2.2 - MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE HELMHOLZ

Cuando la ecuación diferencial general de onda se transforma en la ecuación de onda de Helmholtz, se está admitiendo una dependencia armónica del tiempo, de la forma $e^{-i\omega t}$, que como hemos dicho anteriormente podemos omitir quedándonos únicamente con la componente espacial de la ecuación.

Con esta premisa de partida, en la figura 2.1 se muestra un diagrama donde se esquematizan las diferentes formas que se conocen para resolver la ecuación de onda de Helmholtz. Básicamente hay 2:

1º Mediante aproximaciones la ecuación se puede transformar en una ecuación que se corresponde con:

a) La ecuación eikonal, ecuación básica de la teoría de rayos, que determina los frentes de onda y la trayectoria de los rayos y puede resolverse con el Modelo Heurístico [11].

b) Una ecuación diferencial de tipo parabólico, que puede resolverse con el Método de la Ecuación Parabólica, P.E. [9] que permite una descripción precisa del suelo y la atmósfera, en la propagación de sonido en exteriores.

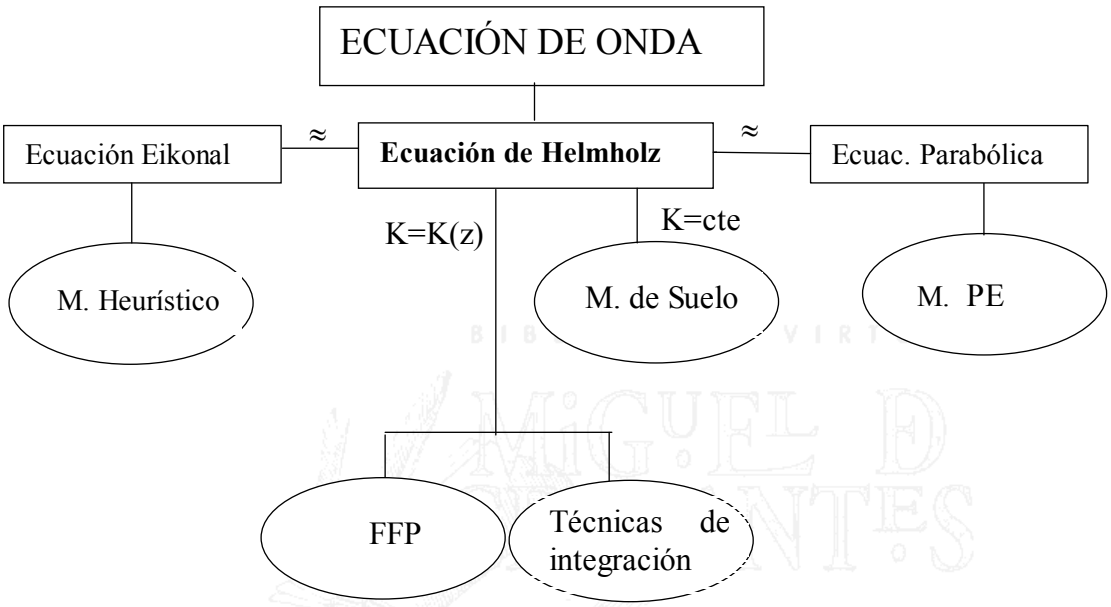


Figura 2.1: Esquema de resolución de la E. de Helmholz

2º Otra posibilidad de resolución es por métodos analíticos, métodos numéricos o una combinación de ambos, pero en general, el problema es complicado y hay que introducir algunas aproximaciones para simplificarlo. En este sentido cabe indicar que tales aproximaciones se centran principalmente en considerar que:

a) El medio es homogéneo e isótropo lo que implica un número de onda constante. (En la figura 2.1 se representa por K=cte). En este caso el problema limitado, (por ejemplo si hay superficie de discontinuidad como

puede ser la presencia del suelo) tiene una solución viable y la presión en el receptor puede ser escrita como una expresión analítica en términos de una función de error complementaria como se expone en [23] y se explicará en el capítulo tercero.

b) El medio aunque no sea homogéneo sólo cambian sus condiciones en una dirección, como puede ser la altura en el caso de que se trate de la atmósfera, y por tanto, también el número de onda varía con la altura, K=K(z). En este caso la ecuación de Helmholtz se transforma en una ecuación de onda dependiente de la altura, reduciendo el problema a una sola dimensión.

A su vez, cuando se introduce la aproximación de que las condiciones sólo varían en una dirección del espacio, se plantean varios caminos para resolver la ecuación, que podemos agrupar en 2: integración directa y utilización de técnicas numéricas, según se muestra en la figura 2.1.

La integración directa puede hacerse usando lo que se conoce como cuadratura numérica y su desarrollo se efectúa por el método de ”Fast Field Program”, de forma abreviada FFP, haciendo alusión a que se utiliza la transformada rápida de Fourier. El procedimiento seguido es considerar el medio dividido en capas horizontales y resolver analíticamente la ecuación de onda en cada una de ellas [19].

La utilización de técnicas numérica se basa esencialmente en considerar el campo sonoro dividido en zonas, mas o menos reducidas, y en cada una de ellas, imponer las condiciones de contorno necesarias para que los puntos frontera satisfagan la solución de cada una de las zonas que delimitan. Las técnicas más comunes que se están desarrollando, cada vez con más frecuencia en este campo, son las que se denominan Diferencias Finitas, Elementos Finitos y Elementos de Contorno, utilizando una u otra dependiendo del caso concreto que se trate. Aunque estas técnicas numéricas se presentan de uso frecuente en el futuro, por el momento son de alcance limitado como métodos de predicción de

la propagación de sonido en exteriores debido a su excesivo tiempo de computación o cálculo, pero sí son útiles cuando se pretende estudiar algún fenómeno puntual, como es la presencia de barreras u otro tipo de obstáculos.

2.3 - MÉTODOS DE PREDICCIÓN EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EXTERIORES

Los primeros métodos de predicción usados en la propagación del sonido en exteriores estuvieron basados en las teorías de trazado de rayos y en soluciones analíticas de la ecuación de onda de Helmholtz.

La teoría de rayos se basa en sustituir las ondas sonoras por rayos cuya dirección, partiendo de la fuente sonora, es perpendicular a los frentes de onda. Si el medio es homogéneo la propagación es en línea recta. En esta teoría se ignoran todos los fenómenos de tipo ondulatorio, como difracción, interferencia, etc. y por ello describe peor aquellas situaciones donde estos fenómenos son más importantes, y en particular cuando se trata de frecuencias altas. Sin embargo, es un método muy útil para una visualización del campo sonoro, y suele utilizarse como una primera aproximación, complementaria de otros métodos de predicción.

Otro método de predicción consiste en introducir el efecto del suelo en las soluciones analíticas de la ecuación de onda. Esto se consigue mediante modelos adecuados. Es precisamente el estudio de estos modelos el objetivo fundamental de este trabajo, complementado con previsiones deducidas a partir de la teoría de rayos.

2.3.1 - Teoría de rayos

La teoría de rayos original emergió desde la Óptica [21], donde fue usada para conocer cómo se propagaba la luz, pero pronto se extrapoló al campo de la Acústica [10] introduciendo conceptos como rayos sonoros y frentes de onda para describir la propagación del sonido.

Si la propagación se realiza a través de un medio homogéneo, los rayos son líneas rectas pero si el medio es refractante los rayos se curvan gradualmente. La refracción introduce efectos en la propagación de los rayos que son difíciles de contemplar en los modelos de predicción, y por tanto, las soluciones obtenidas a través de los modelos de propagación deben ser analizadas convenientemente teniendo en cuenta las condiciones refractantes del medio.

2.3.1.1 - Propagación del sonido en un medio homogéneo

En un medio homogéneo e isótropo la velocidad del sonido no depende de la posición y se pueden aplicar las leyes de la acústica geométrica. En este caso, la dirección de propagación de la onda, no varía a lo largo del medio, y por tanto, las trayectorias de los rayos son líneas rectas, según se esquematiza en la figura 2.2, donde se muestra una fuente puntual S, cuya emisión llega a un receptor R, mediante dos rayos, uno directo y otro reflejado en la superficie de separación de dos medios. El rayo que incide en la superficie, el reflejado en ella y la normal n a la superficie en el punto de incidencia, están en el mismo plano. Además, el rayo incidente y el reflejado forman ángulos iguales con la normal, $\theta_i = \theta_r$. Utilizando el lenguaje usual en estos temas llamaremos rayo directo al que une fuente y receptor, y rayo reflejado al que partiendo de la fuente llega al receptor

después de reflejarse en el suelo. Con este criterio R_1 representa la trayectoria del rayo directo y R_2 la del reflejado.

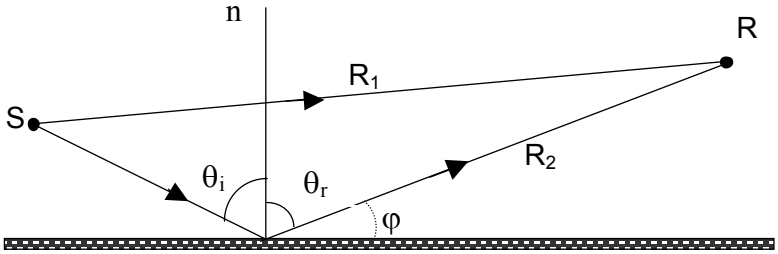


Figura 2.2: Trayectorias de los rayos directo R_1 y reflejado R_2.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

2.3.1.2 - Propagación del sonido en un medio no homogéneo

Cuando la atmósfera se considera como un medio no homogéneo en altura la velocidad del sonido es una función de la posición y en estas situaciones el sonido no se propaga en línea recta, sino que los rayos se curvan, hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de las condiciones atmosféricas. La ley de Snell (senθ/c)=cte nos dará en cada punto el ángulo θ que forma el rayo con la dirección vertical, dirección en la que varía la velocidad del sonido.

Las dos causas fundamentales que hacen que los rayos puedan ser curvados cuando el sonido se propaga a través de la atmósfera se sintetizan en las siguientes:

1º) El índice de refracción cambia con la temperatura, y por lo tanto, también cambiará la velocidad del sonido cuando en el medio existen gradientes de temperatura. El signo del gradiente de temperatura determinará el sentido en el que se curvan los rayos.

2º) Dado que el sonido es una onda mecánica que utiliza el aire como medio de propagación, la velocidad con la que se propaga será distinta dependiendo de la velocidad del viento; ésta generalmente tiene un perfil logarítmico con la altura que contribuye a modificar la velocidad del sonido en esa dirección. Por otra parte, la dirección del viento también modifica la velocidad del sonido en los planos horizontales. Todo esto hace que cambie la rapidez con la que se propaga el sonido y la dirección de propagación, lo que origina la curvatura de los rayos sonoros. Esto mismo sucede cuando existen fenómenos turbulentos que afectan a la propagación, sobre todo, a frecuencias altas, ya que su presencia hace que el sonido sea dispersado.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

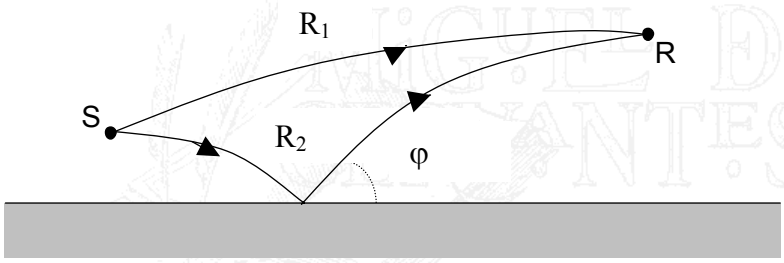


Figura 2.3: trayectorias del rayo directo y del reflejado para un medio con refracción hacia abajo. La velocidad del sonido aumenta con la altura

En el caso particular de que las condiciones atmosféricas originen un gradiente constante en la velocidad del sonido, las trayectorias de los rayos son arcos de circunferencia cuya curvatura es función de las condiciones atmosféricas que lo provocan. Las figuras 2.3 y 2.4 ilustran la trayectoria del rayo directo y del reflejado para un medio refractante en el caso de refracciones hacia abajo, si la velocidad del sonido aumenta con la altura, y hacia arriba, si la velocidad del sonido disminuye con la altura, respectivamente. Al curvarse los

rayos las longitudes totales de las trayectorias, R_1 y R_2, se modifican y por tanto cambia la diferencia de caminos y origina una variación de la intensidad acústica en cada punto. Uno de los efectos más importante es el cambio en el ángulo φ para el rayo reflejado.

En el caso de refracción hacia abajo, figura 2.3, el ángulo φ para el rayo reflejado es más grande que en ausencia de refracción, y un ángulo de refracción más grande podría ser considerado por el receptor como una posición más alta de la fuente, respecto de la propagación del sonido en un medio homogéneo.

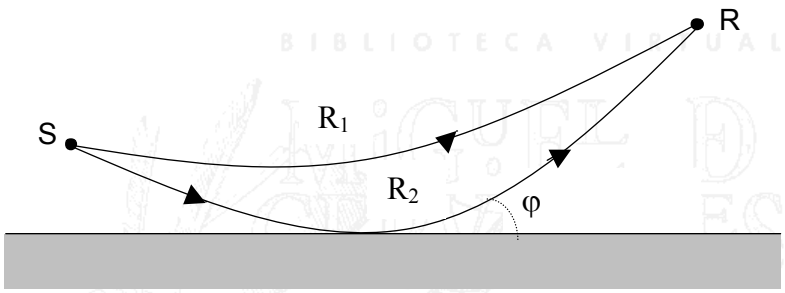


Figura 2.4: trayectorias del rayo directo y del reflejado para un medio con refracción hacia arriba. La velocidad del sonido disminuye con la altura

En el caso de refracciones ascendentes, figura 2.4, el ángulo φ para el rayo reflejado es más pequeño que en ausencia de refracción, y al contrario que en el caso anterior, un valor más pequeño de φ corresponde a posiciones más bajas de la fuente, comparado con la propagación en un medio homogéneo.

2.3.1.3 - Inconvenientes de la teoría acústica de rayos

La teoría acústica de rayos presenta algunas lagunas importantes al

describir la propagación del sonido en exteriores, por ejemplo, en el caso de refracciones ascendentes y para grandes distancias entre la fuente y el receptor, los rayos se curvan hacia arriba y según se observa en la figura 2.4 las zonas espaciales por debajo de la tangente límite al rayo refractado, serían "zonas de oscuridad acústica" o "zonas de sombra" en las que la energía sonora sería nula según la teoría de rayos; es decir, la teoría de rayos predice una transición drástica entre la región del espacio donde llega el rayo directo y el reflejado, y la zona denominada de sombra, donde no llegan los rayos y por lo tanto no hay energía acústica. Sin embargo, en esta zona de sombra existe realmente energía acústica que no puede ser explicada por la teoría de rayos clásica y sólo puede tratarse adecuadamente a partir de la teoría de ondas [3] [16]. La zona de sombra acústica, producida por los gradientes en la velocidad del viento y en la temperatura, ha sido, y sigue siendo, intensamente estudiada por diversos grupos de investigación [5] [6].

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

2.3.2. - Soluciones analíticas

Otra forma de resolver la ecuación de Helmholz es mediante métodos analíticos. Las soluciones propuestas en este caso son diferentes dependiendo de que la atmósfera sea homogénea o no. En todos los trabajos experimentales que se van a presentar en esta tesis se considera que la atmósfera es homogénea para simplificar el problema, y por este motivo, en el capítulo 3 se expondrá la solución analítica en presencia de suelo, para una atmósfera homogénea, que se va a utilizar en los desarrollos posteriores. Aunque no vamos a seguir los modelos derivados de soluciones analíticas con atmósfera no homogénea entendemos que merece la pena un breve comentario en este sentido como un posible camino a explorar en futuros trabajos.

En el caso de que los parámetros meteorológicos sólo varíen en altura, que se representará mediante la coordenada z, y suponiendo a la fuente localizada en r =0 la integración de la ecuación de Helmholfz expresada en coordenadas cilíndricas nos simplifica el problema, y utilizando la transformación de Hankel de orden cero y de clase 1, H_0^1, siendo K la componente horizontal del número de onda, y según se expone en [1] se obtiene para la presión la ecuación integral:

$$p(r,z) = \int_0^\infty H_0^1(kr)\, P(k,z)\, K\, dk \tag{2.5}$$

La función P(k,z) satisface la ecuación

$$\frac{d^2P(k,z)}{dz^2} + \left[k^2(z) - k^2\right]P(k,z) = \delta(z - z_s) \tag{2.6}$$

La función P(k,z) debe cumplir una condición de impedancia de contorno en el suelo, tiene una discontinuidad derivada de la altura en la posición de la fuente y debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld en las alturas grandes.

Para resolver esta integral es preciso conocer la expresión de la velocidad del sonido en función de la altura, z, que fue deducida para distintas situaciones y su expresión genérica más habitual es de la forma:

$$c(z) = \frac{c_o}{\sqrt{1 \pm 2az}} \approx c_o(1 \mp az) \tag{2.7}$$

Donde a está definida por $a=(1/c_o)\ |dc/dz|_o$ y c_o es la velocidad del sonido en la superficie del suelo.

En estas situaciones los rayos sonoros se convierten en arcos de circunferencia como se indicó en el apartado 2.3.1.2.

Si el número de onda varía linealmente con la altura, P(k,z) puede expresarse en términos de la función de Airy que simplifica el análisis y la búsqueda de los polos. Para obtener la presión acústica, p(r,z), se sustituye en la ecuación (2.5) la expresión de P(k,z) en términos de la función de Airy. La solución total está formada por la suma de los residuos del integrando de cada polo.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

2.3.2.1 - Refracción descendente

Este fenómeno ocurre cuando la velocidad del sonido aumenta con la altura. El gradiente positivo de la velocidad del sonido hace que la expresión (2.7) tome la forma:

$$c(z)=\frac{c_o}{\sqrt{1-2az}} \approx c_o(1+az) \tag{2.8}$$

Y según Raspet et al [17] la presión viene dada por la serie de residuos:

$$p(r,z) = \frac{i\pi}{l}\sum_n \frac{H_0^1(k_n,z)Ai(\tau_n + z_s/l)Ai(\tau_n + z/l)}{\tau_n[Ai(\tau_n)]^2 - [Ai'(\tau_n)]^2} \tag{2.9}$$

$\tau_n = (k_n^2 - k_o^2)l^2$ son los ceros de las condiciones de los polos expresadas como $Ai'(\tau_n) + \gamma Ai(\tau_n) = 0$.

Donde $k_o=\omega/c_o$, k_n es el número de onda del modo n, $\gamma = (ik_o l\rho c)/Z$, $l= (r_c/2\,k_o^2)^{1/3}$, Z la impedancia acústica[2] y r_c el radio de curvatura de los rayos.

En este caso la serie no converge rápidamente y el número de términos necesarios para obtener el valor aproximado es directamente proporcional a la frecuencia, e inversamente proporcional al gradiente de la velocidad del sonido.

2.3.2.2 – Refracción ascendente

Este fenómeno ocurre cuando la velocidad del sonido disminuye con la altura. El gradiente negativo de la velocidad del sonido hace que la expresión (2.7) tome la forma:

$$C(z)=\frac{c_o}{\sqrt{1+2az}} \approx c_o(1\text{-}az) \qquad (2.10)$$

Y según Berry y Daigle [3] la serie de residuos para la presión acústica viene dada por:

$$p(r,z)=\frac{\pi e^{i\pi/6}}{l}\sum_n \frac{H_0^1(k_n,z)Ai\left[b_n-(z_s/l)e^{2i\pi/3}\right]Ai\left[b_n-(z/l)e^{2i\pi/3}\right]}{\left[Ai'(b_n)\right]^2-b_n\left[Ai(b_n)\right]^2} \qquad (2.11)$$

[2] Como se indicó anteriormente este parámetro se introduce en el apartado 3.3.1

Donde $b_n = (k_n^2 - k_o^2)l^2 \; e^{2i\pi/3}$ son los ceros de la condición de polo expresados como $Ai'(b_n) + \gamma e^{2i\pi/3} Ai(b_n) = 0$. En este caso converge rápidamente.

Se ha demostrado que este método es muy potente para predicciones en la zona de sombra acústica.

2.3.3 - Modelos hibridos

Los últimos métodos de predicción, basados en la teoría de rayos, representan una nueva generación donde las deficiencias de los rayos son resueltas usando métodos híbridos, que combinan modelos basados en rayos con modelos basados en ondas, mediante soluciones de la ecuación parabólica o soluciones analíticas.

El Modelo Heurístico fue desarrollado por L´Esperance et al [11] para proporcionar cálculos rápidos de niveles de presión sonora. Es un modelo basado en un rayo que predice la propagación del sonido bajo efectos combinados de refracción, turbulencia, impedancia del suelo finita y absorción atmosférica. El efecto de la impedancia del suelo es tratado por cálculos del factor de reflexión de las ondas esféricas como si la atmósfera fuera homogénea. Li [12] ha mostrado que este proceso es válido para rangos de propagación cortos. Para que el tiempo de computación sea mínimo el modelo supone que la velocidad del sonido varía linealmente con la altura y las trayectorias de los rayos se determinan analíticamente. Para determinar la superposición geométrica entre el rayo directo y el reflejado este modelo utiliza la diferencia de tiempos en los recorridos en vez de la diferencia de longitudes de trayectorias. En [18] se estudia en detalle el acuerdo entre el modelo heurístico y el FFP.

Salomons presenta en [20] un modelo de rayo para el caso de viento a favor de la propagación del sonido, en una atmósfera con un perfil de la velocidad del sonido logarítmico. El modelo emplea un nuevo método para computar la trayectoria del rayo el cual tiene como ventaja el hecho de que las trayectorias del rayo son ordenadas en grupos de 4. Las trayectorias son obtenidas con una solución iterativa de una ecuación integral y esta solución requiere mucho menos tiempo de computación.

El método de la superposición de haces gausianos para resolver los problemas de propagación de ondas fue introducido en sismología por Červený et al [4] y ha sido posteriormente aplicado en otros campos como el electromagnetismo o la acústica en océanos. La solución fue obtenida originalmente en el caso de medios inhomogéneos en una o dos dimensiones pero posteriormente ha sido extendida a tres dimensiones. La ecuación de onda se resuelve en la vecindad de cada rayo y la presión acústica en un punto receptor se obtiene sumando las contribuciones de cada uno de los rayos individualmente. Este método no es adecuado para las frecuencias altas, restricción inherente en el trazado de rayos. La teoría supone que las variaciones en el medio son suficientemente lentas sobre una longitud de onda, para que la interacción entre las inhomogeneidades pueda ser despreciada y la ecuación de onda pueda ser aproximada por la ecuación parabólica. En [7] se revisa el método de haces gausianos y se discute su adaptación al caso de propagación de sonido en la atmósfera, además los resultados obtenidos por este método se comparan con los obtenidos con el método FFP, en una variedad de situaciones, y con otros resultados experimentales. La primera etapa del método de haces gausianos es resolver la ecuación clásica de rayos, para obtener el rayo central del haz, por técnicas numéricas o analíticamente. La segunda es resolver la ecuación de onda en el rayo central usando la aproximación parabólica, y por último, se superponen todos los rayos gausianos en la vecindad del receptor.

Los modelos de rayos están basados en la acústica geométrica y en muchos de los casos también el tiempo de computación es elevado.

Además de los métodos comentados se han desarrollado otros modelos de predicción, a los que ya se ha hecho referencia, y que a continuación se comentarán muy someramente. Nos referimos básicamente a los métodos computacionales para la propagación de sonido en medios inhomogéneos. Estos métodos consideran modelos de ondas y modelos de rayos. Algunos modelos de ondas están basados en resolver la ecuación de onda de Helmholtz. Para un medio homogéneo la solución puede ser interpretada analíticamente como en [2] pero no ocurre así para una atmósfera inhomogenea y lo usual es recurrir a los métodos numéricos. Se han desarrollado varios métodos, como el método de la transformada rápida de Fourier [19], the Fast-Field Program (FFP), el método de la extrapolación del campo de onda, the Wave-field Extrapolation Method [14] y el Método de la Ecuación Parabólica, the Parabolic-Equation Method, (PE) [8] [9] [24]. Un inconveniente de todos ellos es que el tiempo de computación es grande, en particular a frecuencias altas, según se ha comentado.

El FFP, es una técnica computacional desarrollada originalmente para predecir la propagación del sonido bajo el agua y adaptada posteriormente para la propagación en la atmósfera. El FFP permite una descripción precisa de las condiciones atmosféricas y puede predecir, para un receptor arbitrario sobre un suelo plano, el nivel de presión sonora emitido por una fuente puntual, siempre que la atmósfera esté estratificada horizontalmente. La base del FFP es trabajar numéricamente desde la integral exacta del campo de sonido dentro de cada capa en términos de coeficientes que pueden ser determinados a partir de las condiciones de contorno dentro de cada capa.

En [13] se exponen 2 nuevos programas de campo lejano, el primero puede ser usado en campo lejano y cercano y el segundo está basado en aproximaciones de campo lejano.

El método de la ecuación parabólica está basado en una aproximación de la ecuación de Helmholtz por una ecuación diferencial de tipo parabólico. Se aplica en dos dimensiones, para una atmósfera inhomogenea. Esta ecuación puede ser resuelta por diferentes pasos implícitos en una red numérica. El modelo de la ecuación parabólica, fue desarrollado para el estudio de grandes rangos de propagación, permite una precisa descripción de la atmósfera y del suelo, y es un método para problemas complejos donde varios efectos físicos pueden interactuar unos con otros.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Los métodos FFP y PE son herramientas muy potentes para predecir la propagación del sonido a través de unas condiciones de atmósfera variable.

Otro método es la extrapolación del campo de onda que consiste en una extensión directa de computación analítica para atmósfera homogénea. La atmósfera se divide en capas delgadas horizontales y la velocidad del sonido se considera constante dentro de cada capa, es decir, el perfil de la velocidad del sonido se aproxima por una función escalera. La solución de la ecuación de Helmholtz puede obtenerse analíticamente para cada capa y el campo de presión total se obtiene por superposición de las diferentes capas.

Como comentario final relativo a los distintos métodos utilizados en la descripción de la propagación del sonido en exteriores, cabe indicar que todos son métodos aproximados y que cada uno de ellos da cuenta con mayor o menor precisión de alguno de los fenómenos que se producen en el proceso de la propagación. Así por ejemplo, el modelo que considera el suelo da predicciones razonables cuando el medio puede ser considerado de rango independiente y la atmósfera es un medio homogéneo; el modelo FFP puede predecir la

propagación del sonido bajo complicadas condiciones meteorológicas, y solamente métodos basados en la acústica de rayos y el método de la ecuación parabólica son aplicables directamente cuando hay variaciones de las variables medioambientales.

Uno de los modelos que a nuestro juicio es bastante completo y se adapta bien a nuestro propósito es el que se obtiene a partir de las soluciones analíticas introduciendo el modelo del suelo. En el capítulo siguiente será desarrollado con detalle ya que es el que vamos a utilizar en todos nuestros trabajos.

2.4 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Attenborough , Taherzade , Bass , Di , Raspet , Becher , Güdesen , Chrestman , Daigle , L' Esperance , Gabillet , Gilbert , Li , White , Naz , Noble , and Van Hoof. Benchmark Cases for Outdoor Sound Propagation Models. J. Acoust. Soc. Am 97(1), 173-191. 1995.

[2] Attenborough, K., Hayek, S. I, and Lawther, J. M. Propagation of Sound Above a Porous Half-space. J. Acoust. Soc. Am. 68(5), 1493-1501. 1980.

[3] Berry, A. and Daigle, G. Controlled Experiments on the Diffraction of Sound by a Curved Surface. J. Acoust. Soc. Am. 83, 2047-2058. 1988.

[4] Cervený, V., Popov, M. M., and Cik, I. P. Computation of Wave Fields in Inhomogeneous Media- Gaussian Beam Approach. Geophys. J.R. Astron. Soc. 70, 109-128. 1982.

[5] Daygle, G. A., Embleton, T. F. W., and Piercy, J. E. Propagation of Sound in the Presence of Gradients and Turbulence Near the Ground. J. Acoust. Soc. Am 79(3), 613-627. 1986.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

[6] Daygle, G. A., Piercy, J. E., and Embleton, T. F. W. Line-of-sight Propagation Through Atmospheric Turbulence Near the Ground. J. Acoust. Soc. Am. 74(5), 1505-1551. 1983.

[7] Gabillet, Y., Schoroeder, H., Daiglese G.A. , and L`Esperance A. Aplication of the Gaussian Beam Approach to Sound Propagation in the Atmosphere: Theory and Experiments. J. Acoust. Soc. Am 93, 3105-3116. 1993.

[8] Galindo, M. The Pabolic Equation Method for Outdoor Sound Propagation. Tesis . 1996.

[9] Gilbert, K. E. and White, M. J. Application of the Parabolic Equation to Sound Propagation in a Refracting Atmosphere. J.Acoust. Soc. Am. 85, 630-637. 1989.

[10] Ingard, U. On the Reflection of a Spherical Sound Wave from an Infinite Plane. J. Acoust. Soc. Am 23, 329-335. 1951.

[11] L´Esperance , Herzog, P., Daigle, G. A., and Nicolas, J. Heuristic Model for Outdoor Sound Propagation Based on an Extension of the Geometrical Ray Theorye in the Case of a Linear Sound Speed Profile. Appl.Acoust. 37, 11-139. 1992.

[12] Li, K. M. On the Validity of the Heuristic Ray-trace-Based Modification To the Weyl-Van der Pol Formula. J. Acoust. Soc. Am. 93, 1727-1735. 1993.

[13] Li, Y. L., White, M. J., and Franke, S. J. New Fast Field Programs for Anisotropic Sound Propagation Through an Atmosphere with a Wind Velocity Profile. J. Acoust. Soc. Am. 95(2), 718-725. 1994.

[14] Nijs, L. and Wapenaar, C. P. A. The Influence of Wind and Temperature Gradients on Sound Propagation, Calculated with the Two-way Wave

Equation. J.Acoust. Soc. Am. 87, 1987-1998. 1990.

[15] Pierce, A. An Introduction to its Physical Principles and Applications. Acoustics. Chapter four, American Institute of Physics, New York , 159-165. 1991.

[16] Rasmusen, K. Outdoor Sound Propagation Under the Influence of Wind and Temperature Gradients. J. of Sound and Vibration 104(2), 321-335. 1986.

[17] Raspet, R, Baird, G., and Wu W. Normal Mode Solution for Low Frecuency Sound Propagation in a Dowunward Refracting Atmosphere Above a Complex Impedance Plane. J. ACoust. Soc. Am. 91, 1341-1352. 1991.

[18] Raspet, R., L'Esperance, A., and Daigle, G. A. The Effect of Realistic Ground Impedance on Accuracy of Ray Tracing". J.Acoust. Soc. Am. 97(1), 154-158. 1995.

[19] Raspet, R., Lee, S. W., Kuester, E., Chang, D. C., Richards, W. F., Gilbert, R., and Bong, N. A Fast Field Program for Sound Sropagation in a Layered Atmosphere Above an Impedance Ground. J.Acoust. Soc. Am. 77, 345-352. 1985.

[20] Salomons, E. M. Downwind Propagation of Sound in an Atmosphere with a Realistic Sound-speed Profile: a Semianalytical Ray Model. J. Acoust. Soc. Am. 95, 2425-2436. 1994.

[21] Sommerfeld, A. N. Propagation of Waves in Wireless Telegraphy. Ann.Phys. (París) 28. 1909.

[22] Sommerfeld, A. N. Propagation of Waves in Wireless Telegraphy. Ann.Phys. (París) 81, 1135-1153. 1926.

[23] Thomasson, S. I. A Powerfull Asymtotic Solution for Sound Propagation

Above an Impedance Boundary. J. Acoust, Soc. Am. 45, 122-125. 1980.

[24] West, M., Gilbert, K., and Sack, R. A. A Tutorial on the Parabolic Equation (PE) Model Used for Long Range Sound propagation in the Atmosphere. Appl. Acoust. 37, 31-49. 1992.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 3

MODELOS ANALÍTICOS DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN LA ATMÓSFERA CONSIDERANDO EL SUELO

3.1 - Introducción

3.2 - Modelo de suelo para una atmósfera homogénea

3.3 - Impedancia acústica específica

- 3.3.1 - Definición
- 3.3.2 - Superficies de reacción local y reacción extendida
- 3.3.3 - Modelos de impedancia
  - 3.3.3.1 - Modelo de un parámetro
  - 3.3.3.2 - Modelo de 2 parámetros
  - 3.3.3.3 - Modelo de 4 parámetros

3.4 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 3:

MODELOS ANALÍTICOS DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN LA ATMÓSFERA CONSIDERANDO EL SUELO

3.1 - INTRODUCCIÓN

En este capítulo vamos a centrar nuestra atención en las soluciones analíticas que se han planteado para estudiar la propagación del sonido en la atmósfera, en presencia de una superficie de discontinuidad como es el suelo, y posteriormente lo ampliaremos contemplando la influencia de árboles con diversas disposiciones sobre la superficie.

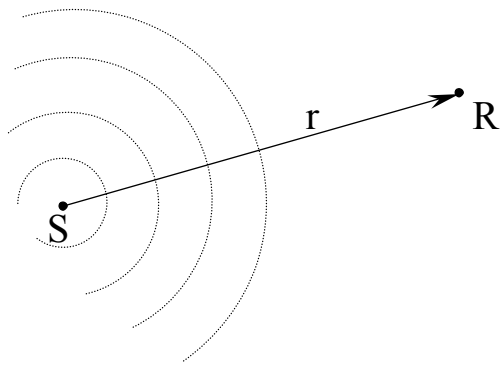


Figura 3.1: Frentes de onda correspondientes a la propagación del sonido en el aire.

El planteamiento de la propagación del sonido a través de la atmósfera se inicia suponiendo una fuente puntual, S, emitiendo ondas esféricas en un medio homogéneo y libre de obstáculos, que son recibidas por un receptor, R, situado a una distancia, r, de la fuente, como se esquematiza en la figura 3.1. En estas condiciones, según se indicó en el apartado 2.1 del capítulo anterior, una solución de la ecuación de Helmholz viene dada por la función de Green expuesta en la ecuación (2.3). Sin embargo, la solución difiere considerablemente cuando el sonido se propaga en presencia de suelo. En este caso se requiere un nuevo planteamiento que da lugar a nuevas soluciones valiéndose de modelos que tienen en cuenta las características de esta superficie. En este capítulo las superficies se considerarán libres de obstáculos y su presencia se estudiará en el capítulo 6.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

3.2 - MODELO DE SUELO PARA UNA ATMÓSFERA HOMOGÉNEA

Si en el medio se introduce una superficie semiinfinita como es el suelo, se modifican las condiciones de propagación y el receptor R recibe un rayo directo R_1, procedente de la fuente puntual S, y otro reflejado en el suelo, R_2, como se esquematiza en la figura 3.2. Las condiciones de reflexión del suelo son función del ángulo de incidencia y de las características del suelo, ya que dependiendo de los materiales que lo conformen reflejará más o menos la energía acústica que reciba. Se da cuenta de esta propiedad mediante un parámetro llamado impedancia acústica, que es característica de la superficie y se representa por la letra Z, (análoga a la impedancia eléctrica en los circuitos eléctricos) que desarrollaremos más adelante en el apartado 3.3.1.

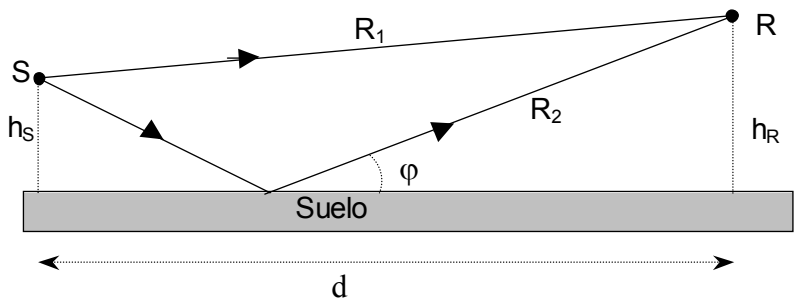


Figura 3.2: Geometría básica en la propagación de sonido en la atmósfera en presencia de suelo

En nuestro caso la fuente que utilizamos es relativamente extensa, pero en los estudios se considera la aproximación de fuente puntual aún sabiendo que una fuente puntual, o monopolo acústico no se encuentra en la vida real, y por tanto, es un concepto ideal para una fuente de sonido que genera ondas esféricas. Sin embargo, para grandes distancias de propagación, y bajo ciertas consideraciones, las dimensiones de la fuente generalmente pueden ser despreciadas y puede considerarse como fuente puntual.

Cuando la atmósfera es un medio homogéneo, el fenómeno de la propagación del sonido en presencia del suelo, desde un punto de vista geométrico basado en los rayos, ya se ha comentado en el capítulo anterior. Ahora trataremos de describir en detalle este proceso y de cuantificar los efectos. Para ello, debemos tener en cuenta que las ondas son esféricas y no planas como se suele suponer para facilitar el cálculo. En [12] se comparan resultados obtenidos utilizando ondas planas y esféricas en un caso concreto y se llega a que la aproximación de ondas planas introduce errores considerables si la fuente está cerca del suelo.

Como se comentó anteriormente se trata de determinar la presión sonora en un punto R al que llegan dos rayos procedentes de la fuente S, uno directo y

otro reflejado en el suelo, figura 3.2. Esta situación es similar a la concurrencia en el punto receptor de dos rayos procedentes de dos fuentes, una la real S, y otra la fuente imagen de la real respecto del suelo, I, que produce el equivalente al rayo reflejado, es decir, el recorrido del rayo directo es R_1 y el del reflejado R_2 como puede verse en la figura 3.3.

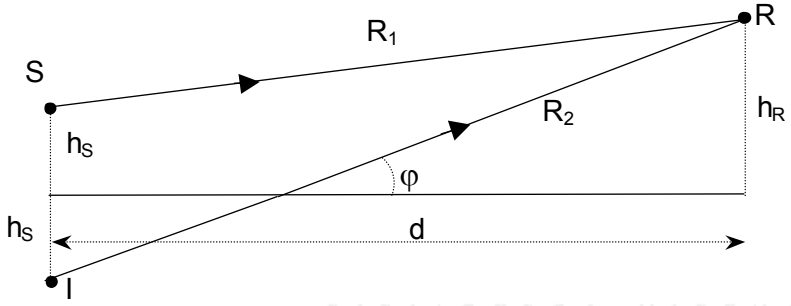


Figura 3.3: Trayectorias de los rayos directo y reflejado considerando la imagen de la fuente respecto del suelo.

Este tipo de situaciones ha sido muy estudiado desde hace algunas décadas y Weyl- Van der Pol [17] propuso como solución de la ecuación de Helmholtz, una modelización deducida para el campo electromagnético por Sommerfeld [15] suponiendo que la fuente era un dipolo eléctrico y que el suelo, en primera aproximación, era un plano conductor infinito. Este desarrollo se expone en [5] por Chien y Soroka, y se obtiene que la presión acústica en el receptor R viene dada por la expresión:

$$P = \frac{A(R_1)}{R_1} e^{jkR_1} + Q \frac{A(R_2)}{R_2} e^{jkR_2} \tag{3.1}$$

Donde R_1 y R_2 son las longitudes de las trayectorias del rayo directo y del reflejado respectivamente. $A(R_1)$ es la amplitud de la onda directa y $A(R_2)$ la de la reflejada; ambas son función de R y vienen influenciadas por la absorción

atmosférica. Q es el coeficiente de reflexión para ondas esféricas, y suponiendo que la superficie es de reacción local[1] según [8] Q viene dado por:

$$Q = R_p(\varphi) + [1 - R_p(\varphi)]F(w) \tag{3.2}$$

Donde R_p es el coeficiente de reflexión de ondas planas que según [11] viene dado por:

$$R_p(\varphi) = \frac{\operatorname{sen}\varphi - 1/Z}{\operatorname{sen}\varphi + 1/Z} \tag{3.3}$$

Siendo Z la impedancia acústica normalizada del suelo y φ el ángulo de reflexión.

La función F(w), llamada función de pérdidas de frontera, representa una complicada función matemática [14] [9] que se puede considerar como una función de transferencia del suelo y está definida en términos de una distancia numérica, w [7], y una función de error complementaria, tal y como se especifica en las ecuaciones:

$$F(w) = 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w}\operatorname{erf}(jw) \tag{3.4}$$

$$w^2 = \tfrac{1}{2}jkR_2[\operatorname{sen}\varphi + 1/Z]^2 \tag{3.5}$$

Siendo j la unidad imaginaria.

En la ecuación (3.1) el primer término da cuenta del rayo directo, desde la

[1] Su definición se da en el apartado 3.3.2.

fuente al receptor, y el segundo término de la contribución del rayo que partiendo de la fuente llega al receptor después de sufrir una reflexión en el suelo.

Cabe indicar que según Attenborough expone en [3] el coeficiente de reflexión de ondas esféricas no es un verdadero coeficiente de reflexión, sino más bien un coeficiente de seudoreflexión dado que es una cantidad no local que depende no solamente de las propiedades del suelo y del ángulo de reflexión sino también de la geometría a través de la distancia R_2. Es necesario resaltar que esta aproximación de Q está restringida sólo a atmósferas homogéneas.

Si la superficie se considera de reacción extendida[2] la expresión de Q es distinta y Attenborough propone que en este caso Q viene dado por:

$$Q= R(\varphi) + B(\varphi)[1- R(\varphi)]E(W) \tag{3.6}$$

$$R(\varphi) = \frac{\cos\varphi - M(n^2 - \mathrm{sen}^2\,\varphi)^2}{\cos\varphi + M(n^2 - \mathrm{sen}^2\,\varphi)^2} \tag{3.7}$$

$$M= \rho/\rho_o \qquad n=K/K_o \tag{3.8}$$

[2] Se define en el apartado 3.3.2

$$B(\varphi) = \left\{ \frac{\cos\varphi + \beta(1 - \text{sen}^2\varphi / n^2)^{1/2}}{\cos\varphi + \beta(1 - n^{-2})^{1/2} / (1 - M^2)^{1/2}} \right\} \left\{ \frac{(1 - n^{-2})^{1/2}}{(1 - \text{sen}^2\varphi / n^2)^{1/2}} \right\}$$
$$\left\{ \frac{\left[(1 - M^2)^{1/2} + \beta(1 - n^{-2})^{1/2}\cos\varphi + \text{sen}\,\varphi(1 - \beta^2)^{1/2}\right]^{1/2}}{(1 - M^2)^{3/2}(2\,\text{sen}\,\varphi)^{1/2}(1 - \beta^2)^{1/4}} \right\}$$

(3.9)

$$E(W)=1-j(\pi)^{1/2}W\exp(-W^2)\text{erfc}(jw) \qquad (3.10)$$

$$W= \{ (-jkR_2)^{1/2}[1+(\beta\cos\varphi(1-n^{-2})^{1/2}-\text{sen}\varphi(1-\beta^2)^{1/2})/(1-M^2)^{1/2}]^{1/2} \}$$

(3.11)

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Donde $\beta=1/Z$ es la admitancia y erfc es una función de error complementaria que puede ser calculada según las indicaciones dadas en [5].

Si bien las expresiones para Q son muy diferentes en los casos de reacción local y reacción extendida, los resultados expuestos en [12], obtenidos por Delany-Bazley muestran que, excepto en algunas circunstancias concretas, las diferencias son poco significativas.

Este tipo de modelo tiene el inconveniente de que no contempla las condiciones refractivas de la atmósfera y por tanto, son modelos tanto más aproximados cuanto menor sea la influencia de tales parámetros.

En estas expresiones de los modelos de propagación vemos que aparece la impedancia Z como parámetro fundamental que depende de las características del suelo y se desarrollará a continuación.

3.3 - IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA

La propagación del sonido en la atmósfera cerca del suelo, está muy influenciada por la presencia de esta superficie de discontinuidad, y es decisivo este fenómeno a la hora de predecir los niveles de sonido en cualquier punto de la atmósfera. Esta influencia depende de las características específicas del suelo, como la porosidad, la rigidez del material, etc, originando una mayor o menor absorción de la energía sonora y un cambio de fase en la onda reflejada. Por tanto, la interferencia entre la onda directa y la reflejada depende de las características del suelo. La influencia del suelo se manifiesta en el coeficiente de reflexión de ondas esféricas, como se vio en las ecuaciones (3.2) y (3.6), mediante la Impedancia Acústica Z, que juega un papel muy importante, y por tanto, su determinación es trascendental para todos los problemas que tienen que ver con la propagación del sonido en estas condiciones. En este apartado nos ocuparemos de su estudio y se expondrán los principales modelos para calcular la impedancia de un suelo de superficie "lisa". Dependiendo del modelo que se considere, el suelo vendrá caracterizado por uno o varios parámetros.

3.3.1 - Definición

La Impedancia Acústica Específica de un medio es la relación compleja de la presión sonora en un punto de un medio acústico a la velocidad de las partículas en ese mismo punto.

La Impedancia Acústica Específica, Z_s, de una superficie, se define como el cociente de la presión sonora, que incide sobre la superficie, y la velocidad de las partículas en contacto con la superficie, normal a la superficie en ese punto.

$$Z_s(\omega) = \frac{p}{\vec{V} \cdot \vec{n}} \tag{3.12}$$

La dirección positiva del vector unitario $\vec{n}$ es hacia dentro de la superficie como se indica en la figura 3.4.

La unidad de Z_s en el S.I. es el Ns/m^3, unidad que también se conoce como Rayl u Ohmio Acústico.

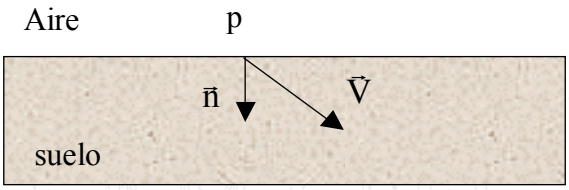


Figura 3.4: Direcciones de los vectores $\vec{n}$ *y* $\vec{V}$

En general el cociente de la ecuación (3.12) es un número complejo; a su parte real se le llama resistencia acústica específica y a la parte imaginaria reactancia acústica específica. La admitancia es el inverso de la impedancia.

La componente real y la imaginaria de la impedancia, dan idea de la energía reflejada y del desfase entre la onda incidente y la reflejada. Las superficies blandas tienen una impedancia relativamente baja, que indica una mayor absorción en el suelo, y por tanto, produce mayor reducción de los niveles de presión sonora.

Para caracterizar la superficie de un suelo es usual emplear la impedancia acústica específica, normalizada a la impedancia acústica característica del aire, $\rho_o c$, es decir:

$$Z=Z_s/\rho_o c \tag{3.13}$$

Donde ρ_o es la densidad del aire y c la velocidad del sonido.

3.3.2 – Superficies de reacción local y de reacción extendida

Las superficies se suelen considerar de dos tipos: de reacción local y de reacción extendida. Una superficie es de reacción local cuando la componente normal de la velocidad de la partícula en un punto de la superficie, $\bar{V}\cdot\bar{n}$, depende solamente de la presión, p, en ese mismo punto. Esto significa que la impedancia del suelo es independiente del ángulo de incidencia de la onda. Si no se dan estas condiciones la superficie se llama de reacción extendida, y en este caso, la impedancia depende de la forma del frente de ondas y el suelo semiinfinito es descrito por la especificación de un número de onda complejo, al igual que la impedancia.

Calcular el nivel de presión sonora generado por una fuente localizada sobre una superficie considerada de reacción extendida, es mucho más complicado que en el caso de superficies de reacción local, por ello en la mayoría de los estudios de propagación de sonido en exteriores se supone que la superficie es de reacción local.

Cuando una onda incide sobre un sólido, la naturaleza de las ondas transmitidas varía bastante, debido a las diferencias en la porosidad y estructura interna de distintos sólidos, lo cual influye en la onda reflejada. Por ejemplo la onda transmitida en un sólido puede refractarse de tal manera que se propague sólo perpendicularmente a la superficie. Este tipo de refracción ocurre para las

superficies de reacción local. Un ejemplo de este tipo de refracción es la que ocurre en sólidos anisótropo, donde las ondas que se propagan paralelamente a la superficie viajan con una velocidad mucho menor que las que se propagan perpendicularmente a la superficie. En un sólido isótropo ocurre cuando la velocidad de las ondas longitudinales en el sólido es pequeña comparada con la del fluido. Muchos materiales de alta absorción que se usan en la industria de la construcción, se comportan aparentemente como superficies de reacción local. Puesto que para tales superficies el rayo refractado viaja casi perpendicularmente a la superficie, sin importar el ángulo de incidencia, es lógico suponer que la razón de la presión acústica que actúa sobre la superficie con respecto a la componente de la velocidad del fluido normal a la superficie, será independiente de la dirección de la onda incidente, como se dijo anteriormente.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

3.3.3 - Modelos de impedancia

La impedancia acústica de un material es una característica propia que depende de la frecuencia del sonido, como ya se ha dicho anteriormente. No existe una expresión analítica que nos permita determinar su valor de forma general, por ello, se recurre a establecer modelos en los que se incluyen parámetros derivados de las características mecánicas y topográficas del suelo. A continuación expondremos algunos de los modelos más utilizados.

3.3.3.1 - Modelo de un parámetro

Uno de los modelos más sencillos que se describen en la bibliografía para determinar la impedancia, es el desarrollado por Delany y Bazley en [6] y está basado en sus teorías semiempíricas para describir los materiales porosos. Chessell en [4] ha desarrollado estas ideas y las ha usado junto con la

aproximación de reacción local. Este modelo acepta que el suelo puede describirse como una capa de material poroso, con una porosidad cercana a la unidad. Además considera que la capa es homogénea, de espesor infinito y que el material poroso está adecuadamente descrito si la resistividad al flujo es conocida. Se entiende por resistividad al flujo la resistencia específica que opone el material a que sea traspasado por un flujo de aire. De acuerdo con este modelo de un sólo parámetro, la impedancia acústica normalizada con respecto al aire puede escribirse como:

$$Z_{\infty}=1+9.08\,(1000f/\sigma)^{-0.754}+j11.9(1000f/\sigma)^{-0.732} \qquad (3.14)$$

Donde f es la frecuencia en Hz, y σ la resistividad específica al flujo por unidad de espesor en Ns/m^4. Esta resistividad σ es una característica de cada suelo, independiente de la geometría fuente-receptor. La medida directa de σ es difícil, pero su valor puede encontrarse de forma semiempírica a partir de curvas construidas con datos experimentales. Como pauta general, σ debería estar comprendida entre 20 000 (suelos blandos como nieve) y 20 000 000 (suelos duros como asfalto), en unidades del S.I.

El modelo de Delany y Bazley ofrece buenos resultados, sobre todo para altas frecuencias, resultando menos apropiado para frecuencias bajas.

Dado que el modelo de impedancia de Delany y Bazley está basado en la descripción de materiales porosos, se utiliza mucho en los trabajos de propagación de sonido en exteriores, especialmente cuando el suelo contiene raíces de césped, hierba u otros cultivos, en general para superficies de baja impedancia.

3.3.3.2 - Modelo de 2 parámetros

Una extensión usada por Chessell del modelo de un parámetro consiste en considerar que la capa porosa tiene una profundidad finita, de valor L, y está limitada en su parte inferior por una superficie dura. Suponiendo que el suelo es homogéneo se obtiene un modelo de dos parámetros donde la impedancia y el número de onda vienen dados respectivamente por:

$$Z_L = Z_\infty j\cot g(Lk) \tag{3.15}$$

$$k = \frac{2\pi f}{c}[1+10.8\,(1000f/\sigma)^{-0.7} + j10.3(1000f/\sigma)^{-0.59}] \tag{3.16}$$

Donde L es la profundidad del material poroso, c es la velocidad del sonido en el aire, k es el número de onda complejo y σ la resistividad al flujo. La ecuación (3.15) supone suelo homogéneo.

3.3.3.3 - Modelo de 4 parámetros

Thomasson en [16] propone otro modelo de impedancia, para una capa porosa con una superficie dura, con cuatro parámetros cuya expresión es:

$$Z_T = \frac{j\sqrt{1+\frac{jc}{\omega}}}{ae^{jb}\tan\frac{\sqrt{1+\frac{jc}{\omega}}\cdot\omega}{2\pi d}} \tag{3.17}$$

Donde a, b ,c y d son constantes que hay que determinar.

Según lo expuesto, las expresiones propuestas para la impedancia de la superficie de un suelo tienen uno, dos o cuatro grados de libertad, dependiendo del modelo que se utilice. Parece lógico pensar que los modelos que mejor se aproximan son los que consideran con mayor amplitud las características de los materiales y su disposición en el suelo. Por tanto, aquellos modelos que incluyan mayor número de parámetros serán, a priori, más precisos. En [13] se comparan los resultados obtenidos con los 3 modelos de impedancia descritos hasta ahora para el caso de una superficie plana de césped, los valores aportados por (3.15) son similares a los aportados por (3.17), y a bajas frecuencias se diferencian con los aportados por (3.14).

Attenborough en [3] proporcionó una solución para suelos de reacción extendida y revisó soluciones previas para suelos de reacción local y en [1] presenta un modelo de impedancia de cuatro parámetros para un medio localmente reactivo, con poros rígidos, con adición de efectos térmicos y viscosos, con posiciones aleatorias de los poros, donde Z viene dada por:

$$Z = \frac{w \cdot \rho_b(w)}{K_b \rho_o c_o} \tag{3.18}$$

$$K_b^2 = q^2\left[1 - 2\left(\lambda\sqrt{j}\right)^{-1} T\left(\lambda\sqrt{j}\right)\right]^{-1}\left[1 + 2(\gamma - 1)\left(N_{pr}^{0.5}\lambda\sqrt{j}\right)^{-1} T\left(N_{pr}^{0.5}\lambda\sqrt{j}\right)\right] \tag{3.19}$$

$$q^2 = \Omega^{-n'} \tag{3.20}$$

$$T(x) = \frac{J_1(x)}{J_0(x)} \text{ funciones de Bessel de primer orden y orden 0} \tag{3.21}$$

$$\lambda = \frac{1}{S_f}\left(\frac{8\rho_0 q^2 w}{\Omega\sigma}\right)^{1/2} \tag{3.22}$$

$$\rho_b(w) = \rho_o\left(\frac{q^2}{\Omega}\right)\left[1 - 2\left(\lambda\sqrt{j}\right)^{-1} T\left(\lambda\sqrt{j}\right)\right]^{-1} \tag{3.23}$$

Donde n' es el factor de forma del grano, S_f es el factor de forma del poro, Ω el volumen de porosidad, q^2 la tortuosidad (efecto de la orientación de los poros), N_{pr} es el número de Prandtl y γ es la proporción de calor específico.

Para el caso de arena, con valores conocidos de σ y de la porosidad, se han obtenido buenos acuerdos con este modelo, los resultados se exponen en [1] y el valor de n' usado en estos cálculos ha sido de 0.5.

Para introducir la relación del factor de forma S_f, las formas de los extremos del poro se consideraron de capilar circular y de marcas paralelas de extensión infinita. De esta forma S_f está comprendido entre 0.6 y 1.

Para $\lambda^2 << 1$ (bajas frecuencias o altas resistividades de flujo) se simplifican las expresiones y Z viene dada por:

$$Z = \left[\frac{4q^2}{3\Omega} + \frac{js_f^2\sigma}{\omega\rho_o}\right] \Big/ K_b \tag{3.24}$$

$$K_b = (\gamma\Omega)^{1/2}\left[\left(\frac{4}{3} - \frac{\gamma - 1}{\gamma} N_{pr}\right)\frac{q^2}{\Omega} + \frac{js_f^2\sigma}{\omega\rho_o}\right]^{1/2} \tag{3.25}$$

Para suelos homogéneos en la ecuación (3.24) la parte real y la imaginaria son iguales para todas las frecuencias, e inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de la frecuencia, según se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z=0.218(\sigma_e/f)^{1/2}(1+j) \qquad (3.26)$$

que se convierte en una alternativa al modelo de un parámetro escrito en la ecuación (3.14).

En [10] se presentan medidas in situ que pueden ser usadas para comprobar las teorías que predicen las características acústicas de las superficies en la propagación de sonido en exteriores.

En nuestro caso se han desarrollado varios métodos para caracterizar los suelos y determinar su impedancia. De todos ellos, el más simple es el modelo de Delany y Bazley, el cual caracteriza al suelo con un sólo parámetro, la resistividad al flujo, y el más sofisticado es el de Attenborough que considera cuatro parámetros. Todos ellos pueden ser implementados en los modelos de propagación.

La selección de un modelo concreto de suelo, depende de la exigencia que se necesite en los cálculos, y también de la facilidad operativa en cada caso. Con el fin de conseguir mejores acuerdos entre los datos experimentales y los valores teóricos, siguen proponiéndose nuevos modelos para la impedancia, algunos de ellos están basados en el cambio de la porosidad con la profundidad, como se expone en [2].

En el capítulo siguiente se describirán los métodos que existen para determinar experimentalmente la impedancia de un suelo y se calculará la resistividad al flujo y la impedancia de distintos suelos.

3.4 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Attenborough, K. Acoustical Impedance Models for Outdoor Ground Surfaces. Journal of Sound and Vibration 99(4), 521-544. 1985.

[2] Attenborough, K. Developments in Modelling and Measuring Ground Impedance. Cogreso Internacinal de Acústica, Roma . 2001.

[3] Attenborough, K., Hayek, S. I, and Lawther, J. M. Propagation of Sound Above a Porous Half-space. J. Acoust. Soc. Am. 68(5), 1493-1501. 1980.

[4] Chessell, C. I. Propagation of Noise Along a Finite Impedance Boundary. J. Acoust. Soc. Am. 62, 825-834. 1977.

[5] Chien, C. F. and Soroka, W. W. A Note on the Calculation of Sound Propagation Along an Impedance Surface. Journal of sound and vibration 69, 340-343. 1980.

[6] Delany, M. E. and Bazley. Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials. Applied Acoustics 3, 105-116. 1970.

[7] Embleton, T. F. W., Piercy, J. E., and Olson, N. Outdoor Sound Propagation Over Ground of Finite Impedance". J. Acoust. Soc. Am. 59(2), 267-277. 1976.

[8] Ingard, U. On the Reflection of a Spherical Sound Wave from an Infinite Plane. J. Acoust. Soc. Am 23, 329-335. 1951.

[9] Lawhead, R. B. and Rudnick, I. Acoustic Wave Propagation Along a Constant Normal impedance Boundary. J. Acoust. Soc. Am. 23, 546-549. 1951.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

[10] Martens, M. J. M., Van der Heijden, L. A. M., Walthaus, H. H. J., and Van Rens, W. J. J. M. Classification of Soils Based on Acoustic Impedance, Air Flow Resistivity, and Other Physical Soil Parameters. J. Acoust. Soc. Am. 78(3), 970-980. 1985.

[11] Morse, P. M. Vibration and Sound. McGraw-Hill, New York . 1958.

[12] Rasmusen, K. B. Aproximate Formulae for Short-distance Outdoor Sound Propagation. Applied Acoustica. 29, 313-324. 1990.

[13] Rasmussen, K. B. Sound Propagation over Grass Covered Ground. Journal of Sound and Vibration 78(2), 247-255. 1981.

[14] Rudnick, I. Propagation of an Acoustic Wave Along a Boundary. J. Acoust. Soc. Am. 19, 348-356. 1947.

[15] Sommerfeld, A. N. Propagation of Waves in Wireless Telegraphy. Ann.Phys. (París) 81, 1135-1153. 1926.

[16] Thomasson, S. I. Sound Propagation Above a Layer with a Large Refraction Index. J. the Acoust. Soc. Am. 61, 659-674. 1977.

[17] Weyl, H. Ausbreitung Electromagnetischer Wellen Uber Einem Ebenem Leiter. Annalen du Physik, Leipzig 60, 481-500. 1919.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DE IMPEDANCIAS

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

4.1 - Introducción

4.2 - Determinación de Z por métodos indirectos

4.3 - Descripción de los suelos estudiados

4.4 - Montaje experimental y estrategia de medida

4.5 - Resultados obtenidos

4.5.1 - Valores de la resistividad al flujo en los distintos suelos

4.5.2 - Análisis comparativo entre los distintos suelos

4.6 - Discusiones

4.7 - Métodos directos para obtener la impedancia de un suelo

4.8 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 4: CÁLCULO DE IMPEDANCIAS

4.1 - INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se expuso el modelo de propagación que vamos a utilizar, y posteriormente se completará con los efectos que causan un tipo de obstáculos como son los árboles. En dicho modelo aparece la impedancia del suelo, por tanto, es un parámetro que debemos conocer para poder trabajar con él. Los distintos procedimientos que existen para determinar Z los podemos agrupar en dos:

a) Los métodos indirectos, basados en la comparación de niveles de presión sonora medidos experimentalmente, con los obtenidos a partir de un modelo, calculados para un valor de σ.
b) Mediante medidas directas, con un montaje adecuado para este fin como por ejemplo el tubo de impedancias.

4.2 - DETERMINACIÓN DE Z POR MÉTODOS INDIRECTOS

Dado que en el trabajo que estamos desarrollando se trata de estudiar la propagación de sonido en exteriores, hay que determinar los valores de la impedancia en un medio extenso, y por ello, la impedancia que asignamos al suelo no va a corresponder con ningún valor de suelo homogéneo, compuesto de

una sola sustancia, sino que será la de un suelo compuesto de varias sustancias, de distribución generalmente no homogénea. En estas circunstancias, la medida indirecta da una idea más precisa que la medida directa de una muestra, de tamaño reducido, extraída de una parte del suelo.

El procedimiento indirecto se basa principalmente en comparar los niveles de presión sonora obtenidos experimentalmente en un punto, con los deducidos a partir de un modelo teórico de propagación. Básicamente la técnica que hemos utilizado para la deducción teórica consiste en sustituir la expresión de la impedancia, de uno de los modelos expuestos en 3.3.3, dada en función de la resistividad al flujo σ y de la frecuencia, en un modelo de propagación, y dando valores al parámetro σ se obtienen en función de la frecuencia los valores de la atenuación, definida en la ecuación (4.2). Representamos, en función de la frecuencia, la atenuación experimental, ecuación (4.1), y ajustamos el valor de σ para que la representación de la atenuación obtenida con el modelo teórico se aproxime lo más posible a la experimental. Ese valor de σ será el correspondiente al suelo en cuestión. Este método es tanto más preciso cuanto menos influyan los parámetros meteorológicos, y se puede aplicar únicamente si no hay otro tipo de influencias distintas al suelo, como sería la presencia de obstáculos, ya que estos modifican su impedancia.

El modelo de propagación que se ha tomado se basa en las expresiones (3.1) y siguientes, expuestas en el capítulo anterior.

La atenuación nos mide la diferencia entre los valores determinados a una distancia d y los determinados a una distancia menor que llamaremos de referencia. Por tanto, la atenuación experimental en cada punto, situado a una distancia d de la fuente, vendrá dada por:

Atenuación = (nivel medido a una distancia d) - (nivel medido en el micrófono de referencia) (4.1)

La atenuación teórica se calculará según se expone en [12] donde viene dada por:

$$\text{Atenuación} = 20\log_{10}\left|\frac{e^{ikr_1}/r_1 + Qe^{ikr_2}/r_2}{e^{ikr_1'}/r_1' + Q'e^{ikr_2'}/r_2'}\right| \qquad (4.2)$$

En esta ecuación "r_1 y r_2" son las longitudes de los rayos directo y reflejado respectivamente. r_1, r_2 y Q se refieren al micrófono de referencia y r_1', r_2' y Q' se refieren al micrófono receptor.

En la expresión 4.2 no se tiene en cuenta la absorción atmosférica.

La expresión de Q es la indicada en la ecuación (3.2), en ella aparece el parámetro Z que se sustituirá por la expresión dada por el modelo de Delany y Bazley [8] mediante la ecuación:

$$Z=1+0.0511(\sigma/f)^{0.75} +j0.0768(\sigma/f)^{0.73} \qquad (4.3)$$

Y también por el modelo propuesto por K. Attenborough [3] en el que Z viene dada por:

$$Z = 0.218\left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.5}(1+j) \tag{4.4}$$

Se trata entonces de determinar el valor de σ comparando los valores obtenidos para la atenuación, mediante el modelo, ecuación (4.2), con los obtenidos experimentalmente, ecuación (4.1). El cálculo teórico de la atenuación se efectuó utilizando el programa MAPLE V RELEASE 4.

4.3 – DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

Este método de determinación de σ fue utilizado para calcular la impedancia en el caso de siete tipos de suelos, muy diferentes entre sí.

Las medidas se han realizado en grandes espacios abiertos, sin obstáculos en las proximidades, con bajo ruido de fondo y con velocidades de viento, en alturas cercanas al suelo, insignificantes.

De los 7 lugares elegidos, 6 de ellos se localizan en el entorno de la ciudad de Valladolid y el otro era el suelo que hay dentro del recinto correspondiente al Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (CIBA) de la Universidad de Valladolid, ubicado en La Mudarra, localidad de la provincia de Valladolid situada a 40 km de distancia, en dirección noroeste. En este caso el suelo tiene una tipología arenosa y compacta, cubierto de forma aleatoria con vegetación de hierbas leñosas de unos 30 cm de longitud y entre 1 y 2 mm de diámetro. En el anexo I se presenta un plano del CIBA y fotografías que permiten hacerse una idea del lugar.

Por sus características compositivas o su estado, los 6 suelos restantes les hemos tipificado con las denominaciones siguientes:

Arado, Arenoso, hormigón, Césped húmedo, Sembrado y Terregoso. En el anexo II se presentan fotografías de todos ellos.

Arado

Con la denominación de terreno arado pretendemos indicar que se trata de suelo donde se efectuaron labores de labranza. En este caso la parcela se había arado recientemente y por tanto la superficie era bastante irregular con abundancia de terrones o tabones como se acostumbra a denominar en algunas localidades.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Arena

En la ribera del río Pisuerga en el lugar conocido como "La Playa de las Moreras", existe un espacio amplio de suelo arenoso que hace las veces de playa. La arena suelta cubre una extensión suficiente para la realización de este tipo de experiencias. Tiene el inconveniente de que en el entorno existe una carretera de abundante tráfico por lo que las medidas se pueden ver afectadas por el ruido de fondo, sobre todo, en los puntos de muestreo alejados de la fuente. En la mayoría de los casos las medidas realizadas a una distancia superior a 60 m fueron desestimadas por estar muy influenciadas por el ruido de esta carretera.

Hormigón

Al tipificar el suelo como de hormigón nos referimos a suelos especialmente duros como es el caso de firmes de calzadas, de superficies destinadas a estacionamiento de vehículos, etc. La medida se realizó en el

aparcamiento del Nuevo Estadio de fútbol del Real Valladolid, que abarcar una gran extensión de suelo hormigonado.

Césped húmedo

Mediante esta denominación describimos el caso de un suelo plano cubierto de hierba muy baja, es decir, césped bastante regular y uniforme por toda la superficie. Se trata de un campo de fútbol reglamentario, suficientemente extenso para estos fines. En este caso se daba la circunstancia de que durante la medida el suelo estaba muy húmedo como consecuencia del riego reciente que se había efectuado para su mantenimiento. Esta particularidad nos pareció que era importante ser destacada por la variación que puede suponer respecto de césped seco.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Sembrado

Superficie extensa sembrada de cereal. En nuestro caso hemos realizado la medida en un sembrado de cebada de unos 50 cm de altura con una extensión suficiente para que no fuera necesario tener en cuenta las condiciones de contorno.

Terregoso

Con este nombre nos referimos a un suelo compuesto de arena y tierra sedimentada formando una capa compacta y relativamente dura. Se trata de un espacio amplio y plano que hace las veces de campo de fútbol.

4.4 – MONTAJE EXPERIMENTAL Y ESTRATEGIA DE MEDIDA

El equipamiento usado para las medidas en el CIBA se componía de un analizador de espectros de B&K, modelo 2144, una fuente sonora de B&K modelo 4224, micrófonos de B&K modelo 4129, un multiplexor B&K modelo 2811, un analizador portátil, el 2260 de B&K (Investigator) y el calibrador 4230 de B&K. En los otros 6 casos solamente se utilizó la fuente, el calibrador y el analizador 2260.

Para las medidas en el CIBA la fuente se situó a la altura de 1 m y el micrófono receptor a 1.3 m. El parámetro medido fue el Leq, y se midió a 2 distancias fuente-receptor, 15 y 5 m respectivamente. Se eligió una distancia de separación pequeña para minimizar la influencia de las variables meteorológicas. En la figura 4.1 se expone un esquema del montaje experimental.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Figura 4.1: Montaje experimental utilizado para las medidas en el CIBA

En el resto de suelos, durante las medidas, la fuente se situó a una altura de 75 cm y el micrófono receptor a 1m. Las distancias que se tomaron entre fuente y receptor fueron de 10, 20, 40 y 80 metros. En este caso se realizaron medidas sucesivamente a las distintas distancias. En la figura 4.2 se representa el esquema del montaje experimental.

Las medidas se han realizado en días de finales de primavera, a primeras horas de la mañana, por ser las horas del día en las que la velocidad del viento era inapreciable. Los parámetros medidos fueron el L_{eq} con ponderación lineal en tercios de octava y el L_{eq} global con ponderación lineal y con ponderación A. La duración de la medida en cada punto fue de 1 minuto.

En cada uno de los lugares, antes de iniciar la medida propiamente dicha se midió el ruido de fondo y se comprobó que su valor era mucho menor que el nivel más bajo obtenido en la medida efectiva. En algunos casos esta condición no se cumplía, como en el caso de la arena a la distancia de 80 m, y la medida se desestimó.

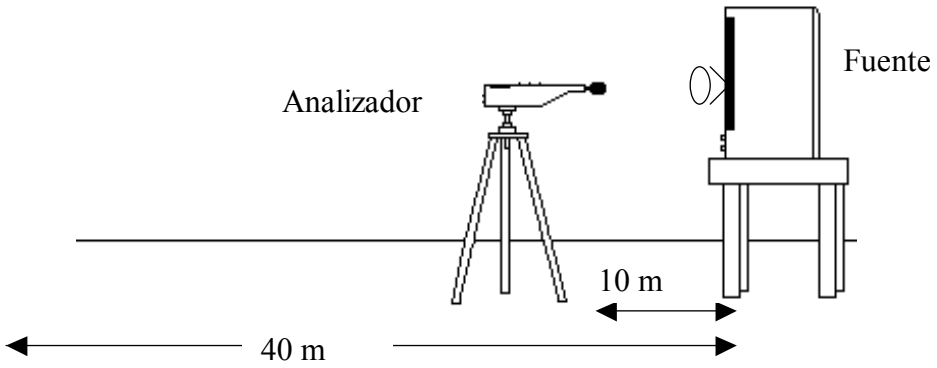


Figura 4.2: Montaje utilizado en las medidas de la mayoría de los suelos

4.5 – RESULTADOS OBTENIDOS

Nuestro propósito es determinar el valor de σ comparando la atenuación teórica, obtenida a partir del modelo con una geometría dada, ecuación (4.2), con los valores que se obtienen experimentalmente, ecuación (4.1), tomando la misma geometría para los distintos suelos. En el caso del CIBA, el micrófono a 5 m de la fuente se toma como referencia, y en los otros 6 el que está situado a 10 m de la fuente.

En la determinación de σ se ensayaron los modelos de Z de Delany y Bazley y de Attenborough como ya se ha dicho. De los dos se eligió como definitivo, para el resto de este trabajo, el que presentaba una mejor aproximación entre las curvas teóricas y experimentales. También se ensayaron soluciones para los casos de reacción local y reacción extendida. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.3 en la que se representan los valores experimentales y los resultados obtenidos con el modelo de impedancia de Delany y Bazley, para reacción local y para reacción extendida, y con el modelo de impedancia de Attenborough, para reacción local, con el mismo valor de σ en ambos modelos. De estas gráficas se deduce que el modelo de impedancia más adecuado es el de Delany y Bazley considerando reacción local, y con él se trabajará en todos los ensayos posteriores.

Una vez seleccionado el modelo de impedancia, se realizaron medias para cada suelo en función de la frecuencia, y con el modelo de propagación se calcula la atenuación para varios valores de σ, eligiendo aquel que mejor ajuste proporcione. Así por ejemplo en la figura 4.4 se representan las curvas obtenidas en el CIBA para 5 valores de σ, y de las 5 curvas la que parece más próxima a la experimental es la correspondiente a σ=90.

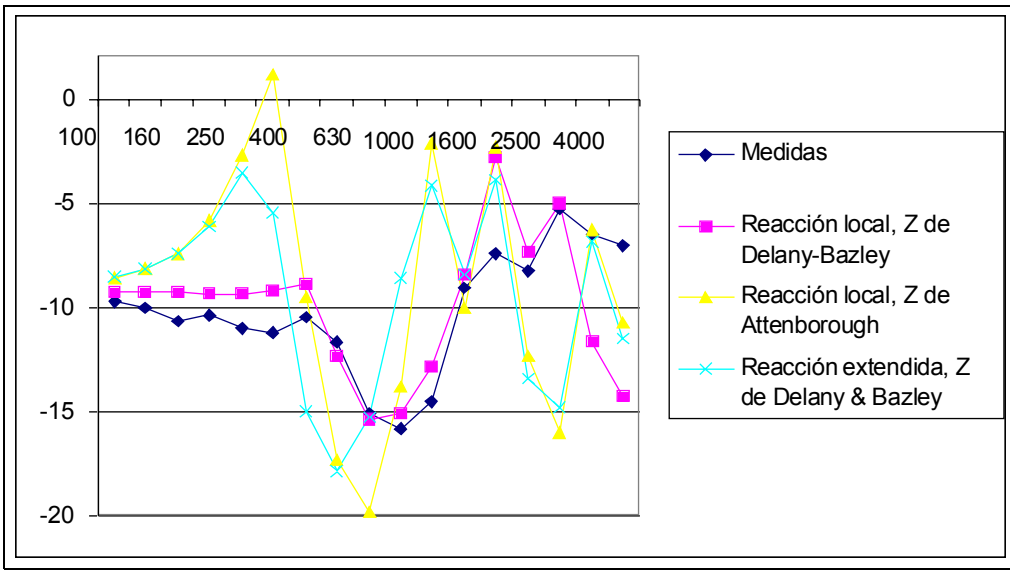


Fig 4.3: Atenuación (dB) frente a la frecuencia(Hz). Comparación de los resultados experimentales con los predichos por los diferentes modelos de impedancia, para un mismo valor de resistividad al flujo.

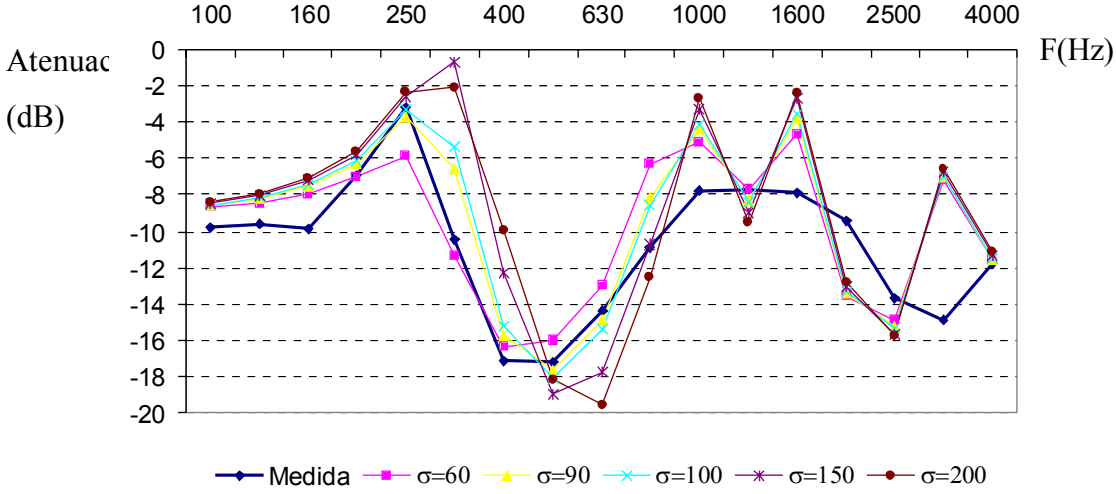


Figura 4.4: Representación de valores de la atenuación (dB), experimentales y obtenidos con el modelo, en función de la frecuencia (Hz), para distintas resistividades al flujo, σ, en g/(s·cm²)

Sin embargo al comparar la curva experimental con las correspondientes a los distintos valores de σ, a veces no es fácil elegir la que mejor se ajusta a los datos experimentales como se pone de manifiesto en el caso presentado anteriormente en la figura 4.4. Para la elección del valor de σ más adecuado se utilizó como criterio que la suma del cuadrado de las diferencias entre los valores de la atenuación, teóricos y experimentales, fuera mínima, es decir, para cada distancia se ha calculado:

$$\sum_{i=1}^{17} (\text{Atenuación}_{\text{experimental}} - \text{Atenuación}_{\text{teórica}(\sigma)})^2 = \sum_{i=1}^{17} (A_{exp} - A_{\sigma})^2 \qquad (4.5)$$

Se trata por tanto de determinar el mínimo de la función $y(\sigma)=\sum_{i=1}^{17}(A_{exp} - A_{\sigma})^2$, donde el sumatorio se extiende al número de intervalos de frecuencia en que se efectuó la medida. En nuestro caso las frecuencias en estudio van de 100 Hz a 4 KHz, en tercios de octavas, por tanto hay 17 sumandos. El cálculo y representación de la función y(σ) se hizo utilizando el programa MAPLE V RELEASE 4. Esta operación se hizo para cada suelo y para cada una de las distancias fuente-receptor. A modo de ejemplo, en la figura 4.5 representamos las curvas experimentales y teóricas para distintos valores de σ para el suelo de arena. Por otra parte, se calculó y se representó la curva $y(\sigma) = \sum_{i=1}^{17}(A_{exp} - A_{\sigma})^2$ en función del parámetro σ, y se obtuvo la gráfica de la figura 4.6 cuyo mínimo se obtiene para σ=170 y éste será el valor de σ que se tomará para calcular Z.

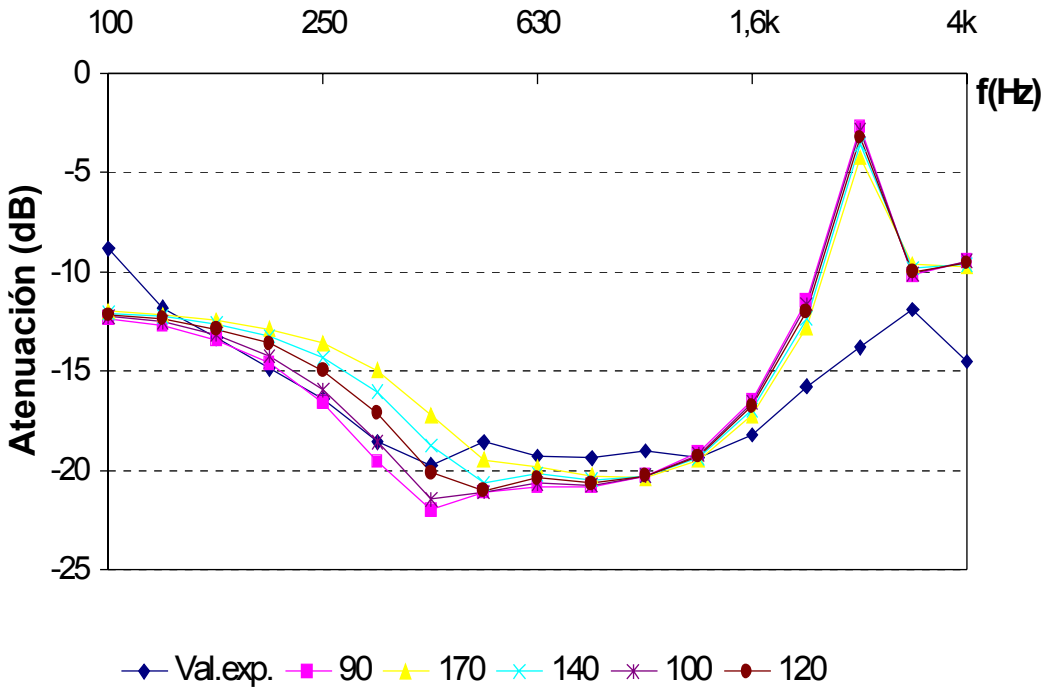


Figura 4.5: Valores experimentales y valores teóricos de la atenuación (dB) en función de la frecuencia (Hz) para distintos valores de σ (90, 100, 120, 140, 170). Suelo de arena. Distancia fuente-receptor=40 m.

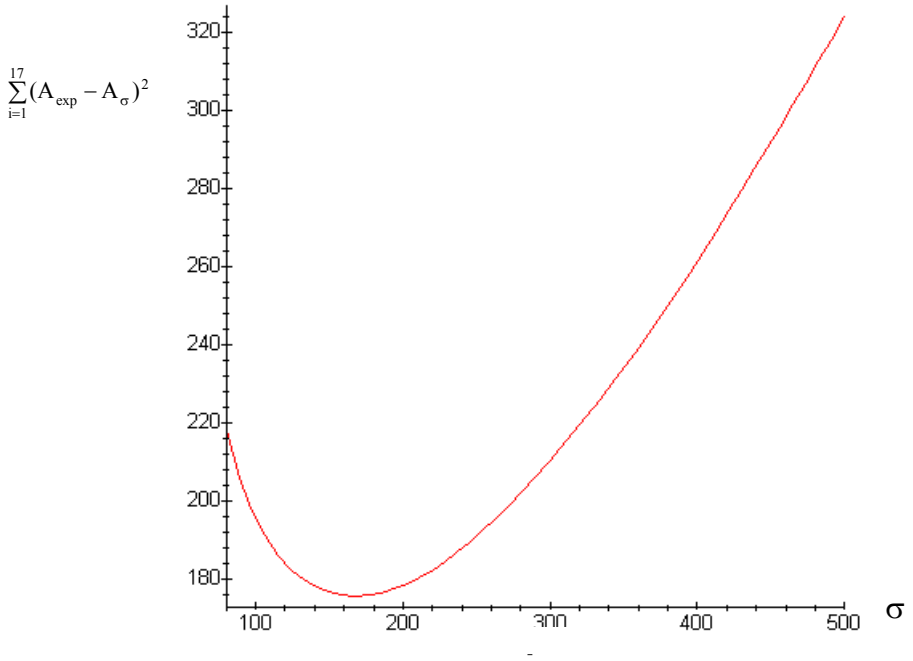


Figura 4.6: Suma de cuadrados de diferencias de atenuaciones experimentales y teóricas en función de σ.

4.5.1 - Valores de la resistividad al flujo en los distintos suelos

Conforme al procedimiento descrito, se desarrolló el proceso con cada uno de los suelos en estudio para calcular su resistividad al flujo, y así tener determinada su impedancia característica. Para cada distancia se ha obtenido un valor de σ diferente, y por esto se da como resultado un intervalo y no un único valor, de la misma forma que aparece en [9]. Los resultados de cada caso se muestran en la tabla 4.1.

SUELOS	**σ (Rayls $m^{-1} \cdot 10^{-3}$)**
Arado	10-20
Arena	100-160
Césped húmedo	700-850
Ciba	70-90
Hormigón	10000-100000
Sembrado	50-70
Terregoso	400-500

Tabla 4.1: Intervalo de valores para la resistividad al flujo en distintos tipos de suelo

Una vez determinado el valor de la resisitividad al flujo, se puede calcular la impedancia normalizada del suelo a partir del modelo de impedancia dado en la ecuación (4.3). En la tabla 4.2 se exponen los valores obtenidos para Z en el

caso del CIBA en función de la frecuencia, en tercios de octavas, tomando para σ el valor de 90.

Frecuencia (Hz)	Z
100	9.39 + i11.02
125	8.09 + i9.36
160	6.89 + i7.82
200	5.99 + i6.64
250	5.22 + i5.64
315	4.55 + i4.77
400	3.97 + i4.02
500	3.51 + i3.41
630	3.12 + i2.87
800	2.76 + i2.41
1000	2.49 + i2.05
1250	2.26 + i1.74
1600	2.05 + i1.46
2000	1.89 + i1.24
2500	1.75 + i1.05
3150	1.63 + i0.89
4000	1.53 + i0.75

Tabla4.2: Valores de impedancia en función de la frecuencia para el suelo del CIBA.

A modo de ejemplo, en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 representamos los

valores de la atenuación obtenidos experimentalmente (Val. Exp.), y los obtenidos con el modelo para el σ indicado, en los casos de arena, césped húmedo y hormigón. Se han elegido estos casos por ser suelos con valores de σ bajos, medios y altos respectivamente, y por lo tanto previsiblemente muy diferentes entre sí. Además, en dichas gráficas se ha representado la atenuación para diferentes distancias en cada uno de los tres suelos, con el fin de poner de manifiesto la adecuación del modelo a los datos experimentales para distintos valores de σ y diferentes distancias.

En las tres gráficas se observa una concordancia bastante buena entre los valores teóricos y experimentales, sobre todo a bajas y medias frecuencias. A altas frecuencias los valores teóricos se alejan más de los medidos experimentalmente, y esto puede deberse a que para las frecuencias agudas la propagación del sonido se ve muy influenciada por los factores meteorológicos, según se pone de manifiesto en [2].

Otro detalle que es importante destacar, es que para suelos duros, como es el caso del hormigón, el modelo es poco sensible a variaciones de σ, por lo que no es posible asignar para σ un intervalo reducido. En las gráficas de la figura (4.8) se pone de manifiesto esta circunstancia. Se dibujan las curvas correspondientes a valores de σ muy diferentes (50000-100000), y sin embargo las diferencias entre las curvas obtenidas son pequeñas, lo que nos indica que esta forma de determinar σ no es adecuada para este tipo de suelos.

Merece la pena destacar también lo que se observa en la figura 4.9 para el caso del césped húmedo, donde el ajuste de curvas teórica y experimental es bueno para la mayoría de las frecuencias en el caso de σ=800. Si consultamos los valores que aporta la bibliografía [9] para suelos de césped (150-300

KNs/m^4), el valor difiere considerablemente, lo que nos indica que la humedad del suelo influye significativamente en su impedancia.

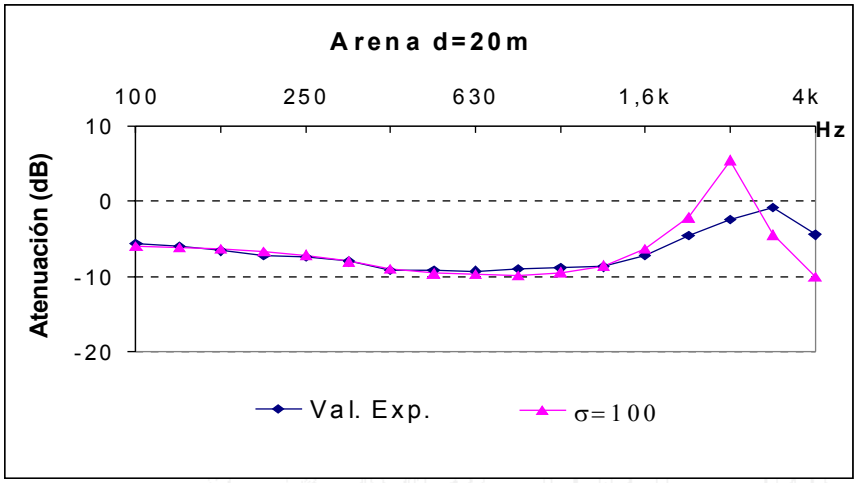


Figura 4.7: Valores de la atenuación con suelo arenoso

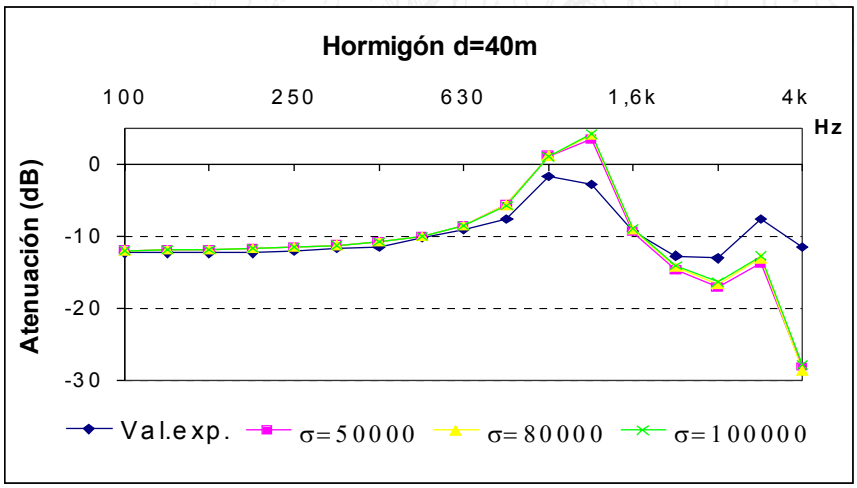


Figura 4.8 : Valores de la atenuación con suelo de hormigón

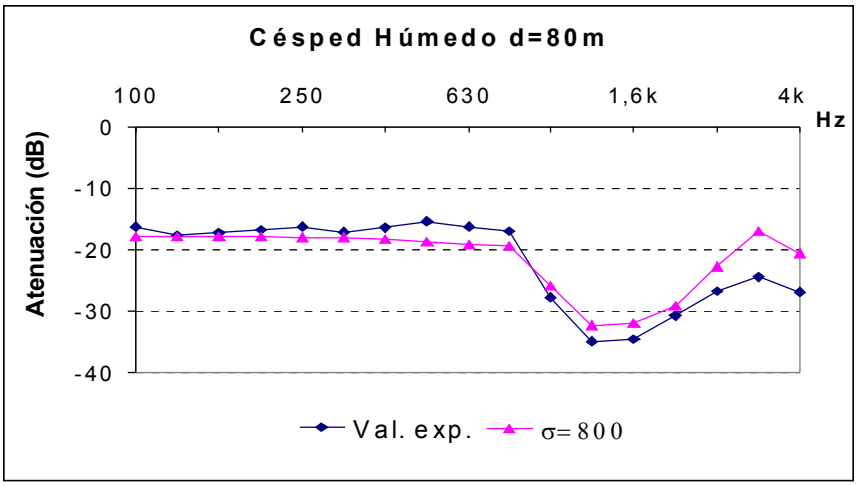


Figura 4.9: Valores de la atenuación en césped recién regado

Una particularidad que se presenta es que en el arado y en el sembrado se aprecian mayores discrepancias que en el resto de suelos, entre los valores teóricos y experimentales, siendo más patente en el sembrado. Pensamos que ello es debido a la irregularidad de la superficie, en el caso del terreno arado por la presencia de los terrones y en el caso del sembrado por estar cubierto el suelo de cebada de unos 50 cm de altura.

4.5.2 - Análisis comparativo entre los distintos suelos

A la vista de los resultados obtenidos, se puede hacer un análisis comparativo con el fin de disponer de algún criterio riguroso, mas o menos contrastado, que nos permita predecir el comportamiento del suelo a la hora de intentar atenuar el ruido en espacios urbanos.

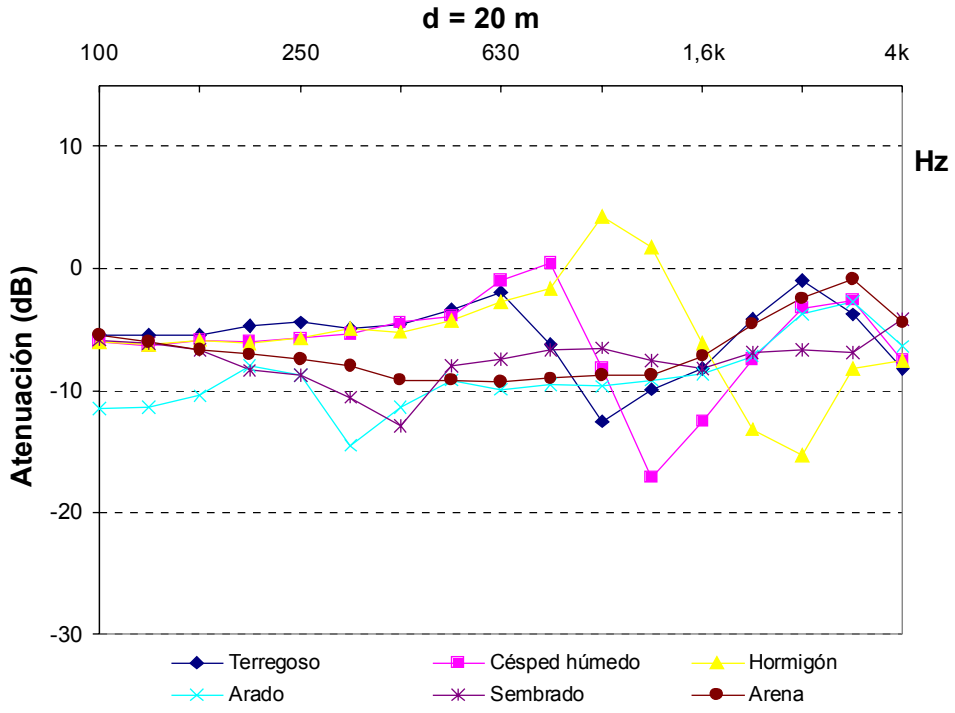


Figura 4.10: Atenuación de cada suelo a 20 m de la fuente

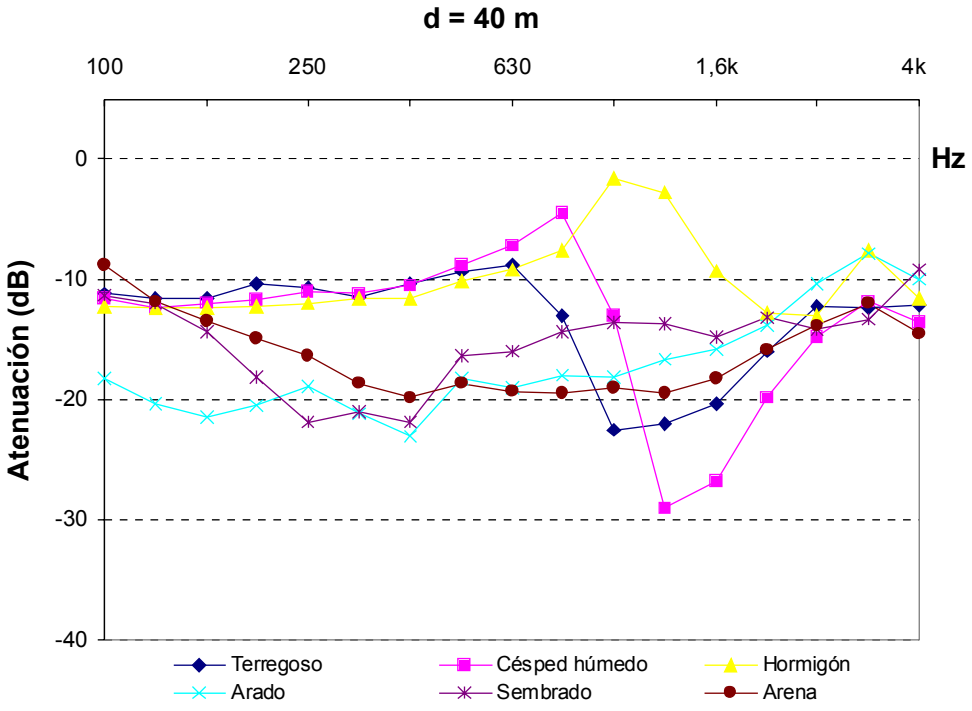


Figura 4.11: Atenuación de cada suelo a 40 m de la fuente

En las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se representan en función de la frecuencia, los valores experimentales de la atenuación de 6 suelos para poder comparar unos con otros. En ellas se pone de manifiesto que el comportamiento acústico es distinto en todos ellos aunque, como es lógico, se aprecia una mayor diferencia conforme nos alejamos de la fuente. Es decir, para distancias próximas a la fuente, como ocurre en las gráficas de la figura 4.10, d=20 m, si bien se distinguen diferencias para los distintos tipos de suelos, éstas no son muy pronunciadas sobre todo a bajas frecuencias. En las gráficas de la figura 4.11 (d=40 m) las diferencias comienzan a ser más acusadas y son mucho más significativas para d=80 m (figura 4.12). Otro detalle importante a considerar, que se pone de manifiesto de forma clara en estas gráficas, es que para la mayoría de los suelos la atenuación no es uniforme frente a la frecuencia sino que se comporta de forma selectiva.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL D

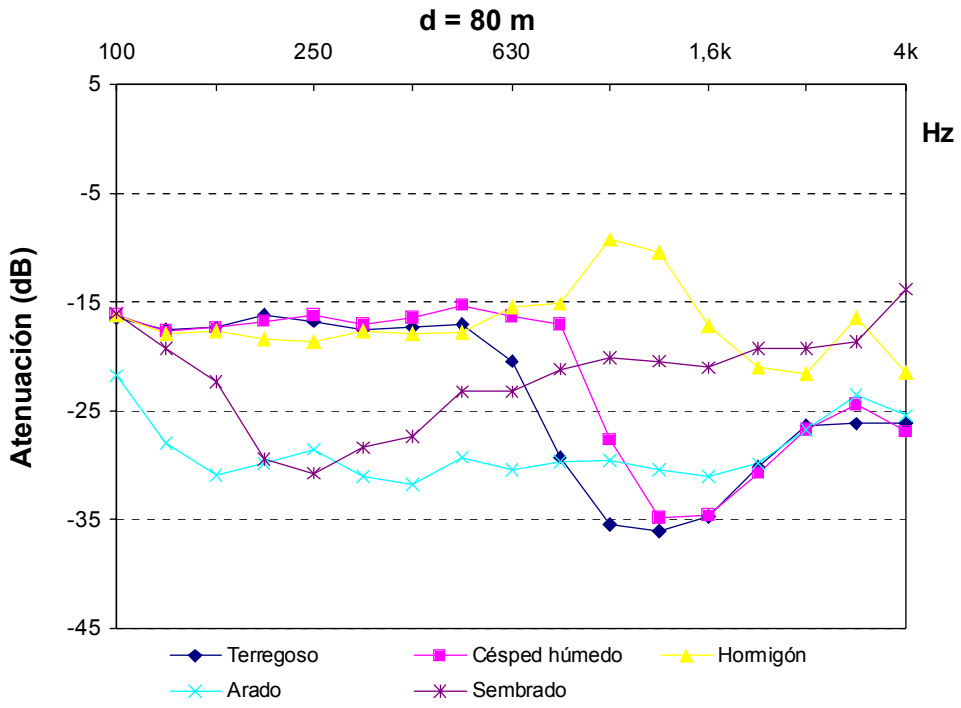


Figura 4.12: Atenuación de cada suelo a 80 m de la fuente

Cabe destacar que el arado tiene una forma singular de comportamiento que se aprecia para las tres distancias de medida, pero sobre todo a 80 m, donde aparece un valor de atenuación casi constante para todas las frecuencias, excepto si acaso en las extremas. Entendemos que ello es debido a la irregularidad del suelo en el sentido de que no hay una definición clara para la trayectoria de la onda reflejada en el suelo y por tanto la composición con la onda directa para originar interferencias no se reduce a unas frecuencias determinadas sino que ocurre de una forma menos precisa.

Otra particularidad que se desprende de las gráficas de las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 es que para bajas-medias frecuencias aparecen valores de atenuación similares para suelos muy distintos, como el terregoso, el césped húmedo y el hormigón. Para frecuencias mayores de 500 Hz el terregoso y césped húmedo difieren en alguna medida pero el aspecto de la gráfica es semejante y parece como si una estuviera trasladada respecto de la otra. A frecuencias comprendidas entre 800 y 2 kHz aproximadamente las atenuaciones del terregoso y del césped húmedo son máximas (mínimos en las gráficas) y difieren mucho de las del hormigón ya que son las frecuencias a las que presenta atenuación mínima (máximos en las gráficas).

En el sembrado cuanto mayor es la distancia entre fuente y receptor, figuras 4.10, 4.11 y 4.12, su comportamiento deja de ser igual para todas las frecuencias y atenúa más para frecuencias bajas.

Con el fin de conocer el comportamiento de los 6 suelos a nivel global, se ha medido también en cada punto el nivel equivalente total (con ponderación

lineal y con ponderación A). Los resultados con ponderación A se representan en la figura 4.13. En ella se puede apreciar que para distancias pequeñas (10 m) entre fuente y receptor la mayor diferencia de niveles se produce entre el hormigón y el sembrado, y su valor es de 4,1 dBA, mientras que para grandes distancias (80 m) la mayor diferencia de niveles se obtiene entre el hormigón y el arado, siendo su valor de 11,7 dBA. Todo esto pone de manifiesto la diferencia de comportamiento acústico entre los distintos tipos de suelos, siendo más relevante cuanto mayor es la distancia entre fuente y receptor.

En la tabla 4.3 se muestran las máximas diferencias que hay para los niveles equivalentes entre los distintos suelos y entre paréntesis se indica entre qué tipo de suelo se produce.

BIBLIOTECA VIRTUAL MiGUEL H

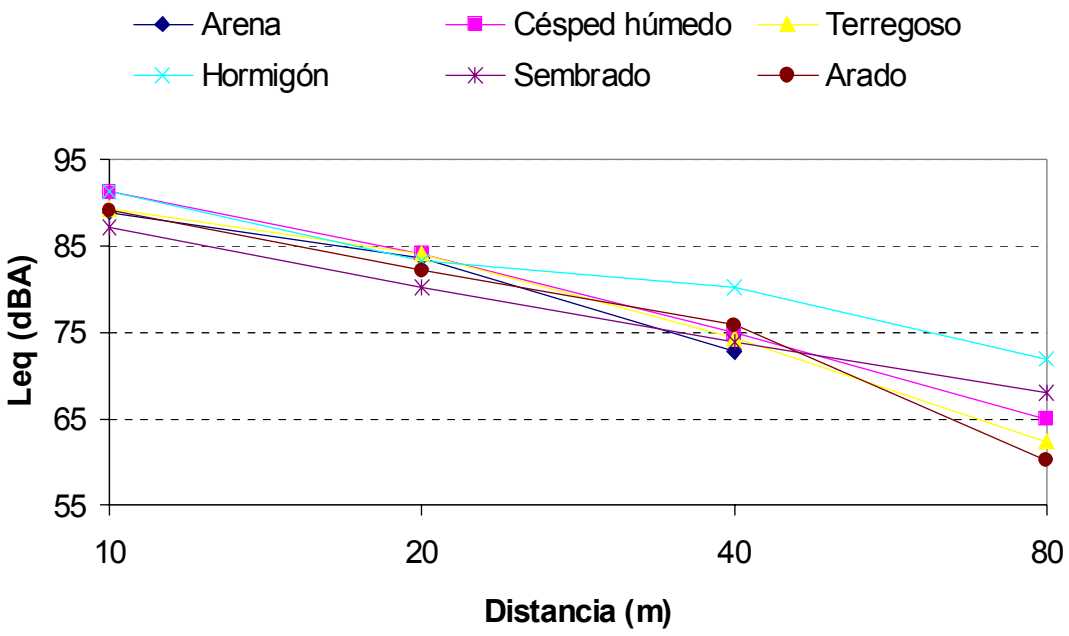


Figura 4.13: Nivel equivalente en función de la distancia fuente-receptor para cada tipo de suelo.

Distancias (m)	Máximas diferencias (dBA)
10 m	4,1 (Hormigón-Sembrado)
20 m	4 (Césped y Terreg–Sembrado)
40 m	7,3 (Hormigón – Arena)
80 m	11,7 (Hormigón-Arado)

Tabla 4.3: Diferencias máximas que se producen entre los distintos suelos para cada distancia.

4.6 - DISCUSIONES

A modo de resumen indicar que con los resultados de este estudio, se deduce que, de los modelos de impedancia elegidos, el que más se ajusta a nuestros datos experimentales sobre todo a bajas y medias frecuencia es el desarrollado por Delany y Bazley [3] para suelo localmente reactivo.

De los valores obtenidos en las medidas, podemos deducir que los siete suelos en estudio tienen valores de σ muy diferentes, tal y como cabría esperar ya que sus composiciones son muy distintas.

El terreno arado (con valores de σ bajos) es el que más atenúa, y su comportamiento es casi similar para todas las frecuencias a distancias grandes.

En el caso del césped húmedo y el suelo terregoso (con valores de σ medios) tienen comportamientos muy parecidos, y su atenuación apenas varía para bajas frecuencias, pero disminuye mucho entre 630 Hz y 2000 Hz. Es de destacar la buena concordancia entre los datos experimentales y los aportados por el modelo en este suelo.

El caso del hormigón (con valores de σ altos) es el que menos atenúa en general. Para bajas frecuencias se aproxima al caso del césped húmedo y del terregoso. Su atenuación es muy baja en el intervalo (630-1600) Hz.

Merece la pena también destacar, en relación con el modelo, que la predicción es diferente con distintas geometrías, y por tanto entendemos que es debido a que están presentes otros factores que el modelo no contempla. Somos conscientes de que el ajuste no es muy bueno en algunas frecuencias y es posible que se hubiera podido obtener un ajuste mejor teniendo en cuenta modelos de impedancia más complejos, con más parámetros a ajustar, pero también, las discrepancias pueden atribuirse a la contribución de las variables climatológicas que a pesar de la cercanía de la fuente y de los micrófonos, no se puede evitar su influencia sobre la propagación.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

4.7 - MÉTODOS DIRECTOS PARA OBTENER LA IMPEDANCIA DE UN SUELO

Según se ha reseñado anteriormente existen otros métodos alternativos para medir impedancias que se denominan métodos directos, como es el caso del Aparatus Standing Wave, el tubo de impedancias y también por técnicas intensimétricas.

El principio de operación del Standing Wave Apparatus [5] está basado en la interferncia de 2 ondas planas. Un altavoz está situado en uno de los extremos del tubo acústico cilíndrico, rígido y una muestra, del material que va a ser testado, en el otro extremo con su eje coincidente con el del tubo. El altavoz suministra un tono puro y se genera una onda plana en el tubo. La onda es

parcialmente reflejada por la muestra, y la interferencia entre la onda incidente y la reflejada dan un modelo de onda estacionaria. Con la medida de las posiciones de los máximos y los mínimos de la presión sonora de la onda formada puede determinarse la absorción y la impedancia acústica de la muestra.

En el tubo de impedancias [4] se toma como algoritmo de cálculo el Método de la Función de Transferencia [7,13]. Basicamente consiste en un cilindro cerrado por un extremo donde se incorpora la muestra, con una fuente emisora en el otro extremo. El tubo, además de la impedancia acústica normalizada, módulo y argumento, proporciona el coeficiente de reflexión acústica y de absorción acústica. La fuente sonora genera una señal y con 2 micrófonos, situados en la pared del tubo colocados en tres posiciones distintas, se puede determinar el coeficiente de reflexión complejo, que permite calcular el coeficiente de absorción y la impedancia normalizada.

En estos métodos el campo sonoro está formado por ondas planas y la incidencia sobre la muestra es normal.

En [10] se exponen resultados para distintas muestras, como césped, asfalto, hormigón, etc que fueron medidas siguiendo la norma ISO/FDIS 10534-2. Este método permite determinar Z en situaciones de incidencia normal. Un inconveniente importante de este método es que no permite realizar medidas “in situ”, porque se presentan dificultades operativas casi insalvables a la hora de acoplar el quipo de medida al suelo. La construcción de muestras en condiciones semejantes a como se encuentra el material en su estado “normal” es complicado. Sin embargo para los casos en los que las muestras se adapten al montaje experimental, sin variar significativamente sus características físicas, la medida directa puede ser bastante exacta, y por tanto preferible frente a la

medida por procedimientos indirectos.

Actualmente se utiliza además una técnica relativamente moderna que se denomina técnica de los dos micrófonos o sonda de intensidad [1] que en principio solventa el problema anterior. Se basa en el análisis en tiempo real de las señales recogidas por un analizador, procedentes de dos micrófonos dispuestos frente a frente en lo que se denomina una sonda de intensidad. Este dispositivo es capaz de estimar la velocidad de la partícula en la dirección del eje de la sonda a partir de los valores de presión medidos por dichos micrófonos. Conociendo estas magnitudes se puede calcular su cociente, y por tanto, la impedancia. Mediante esta técnica, que se denomina de intensimetría, se puede medir la impedancia acústica de cualquier material en una situación real y para incidencias distintas a la normal, lo que supone evitar los condicionantes que impone el tubo de impedancia. Sin embargo, las medidas intensimétricas requieren una calibración de los equipos muy precisa para poder acotar los posibles errores [6] introducidos en la medida debidos a la reactividad del campo. Es decir, la técnica intensimétrica es muy sensible a las posibles variaciones del campo sonoro y por ello es preciso en cada medida comparar las condiciones de medida con las prestaciones máximas del equipo de medida.

En [11] se presenta un estudio comparativo de los valores obtenidos por ambos métodos, tubo de impedancia y sonda de intensidad, para varios materiales y muestra que el módulo de la impedancia obtenido por cada uno de ellos, para frecuencias bajas, es bastante diferente; sin embargo se aproximan mucho entre 400 y 500 Hz y a partir de esta frecuencia los resultados son casi idénticos.

4.8 – BIBLIOGRAFÍA

[1] Allard, J. F. and Aknine, A. Acoustic Impedance Measurements with a Sound Intensity Meter. Applied Acoustics 18, 69-75. 1985.

[2] Arenal, M. Contribución al estudio de la influencia de las condiciones meteorológicas en la propagación del sonido en exteriores. Tesis doctoral. 2002.

[3] Attenborough, K. A Note on Short-range Ground Characterization. J. Acoust. Soc. Am.. 95(6). 1994.

[4] Brüel&Kjaer. Two-microphone Impedance Measurement Tube Type 4206.

[5] Brüel&Kjaer. Instruction Manual 4002.

[6] Champoux, Y. and L'Espérance, A. Numerical Evaluation of Errors Associated with the Measurement of Acoustic Impedance in a Free Field Using Two Microphones and a Spectrum Analyzer. J. Acoust. Soc . Am. 84, 30-38. 1988.

[7] Chung, J. Y. and Blaser, D. A. Transfer Function Method of Measuring in-duct Acoustic Properties. II. Experiment. J. Acoust. Soc. Am. 68(3), 914-921. 1980.

[8] Delany, M. E. and Bazley. Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials. Applied Acoustics 3, 105-116. 1970.

[9] Embleton, T. F. W. Resisyivity of Ground Surfaces. J. Acoust. Soc. Am 74(4). 1983.

[10] González, J., Machimbarrena, M., Pérez A. , Lorenzana , T, and Quirós, S. Medida Directa de la Impedancia Acústica de Distintos Materiales. Tecniacústica 2001.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

[11] Pérez, A, Tejada, F., Machimbarrena, M, Herráez, M., and González, J. Medida In-Situ de la Impedancia Acústica de Materiales con Técnicas Intensimétricas. Tecniacústica . 2000.

[12] Price, M. A., Attemborough, K., and Nicholas W. Sound Attenuation Through Trees: Measurements and Models. J. Acoust. Soc. Am. 84(5), 1836-1844. 1988.

[13] Utsuno, H., Wu, T. W., Seybert, A. F., and Tanaka, T. Prediction of Sound Fields in Cavities with Sound Absorbing Materials. AIAA Journal 28 (11), 1870-1876. 1990.

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN UN BOSQUE DE PINOS

5.1 - Introducción

5.2 - Estudio comparativo de los valores obtenidos en un suelo con árboles y otro sin árboles

5.2.1 - Descripción del lugar de medida

5.2.2 - Procedimiento de medida

5.2.3 - Resultados experimentales

5.2.3.1 - Valores obtenidos en la primera campaña

5.2.3.2 - Valores obtenidos en la segunda campaña

5.2.3.3 - Análisis comparativo entre ambas situaciones

5.2.4 - Discusiones

5.3 - Influencia de la densidad de vegetación

5.4 - Influencia de la temperatura

5.5 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 5:

RESULTADOS DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN UN BOSQUE DE PINOS

5.1 – INTRODUCCIÓN

Como se expuso en el apartado 1.3, en la literatura científica aparecen numerosos y variados trabajos que estudian la propagación del sonido en el interior de bosques. Sin embargo, en la bibliografía consultada no existe unanimidad a la hora de concluir la influencia que los árboles ejercen sobre la propagación del sonido. Incluso podríamos decir que se dan estimaciones contradictorias, y no existe un procedimiento adecuado que permita decidir sobre la validez de estos resultados.

En este capítulo exponemos los valores obtenidos en las medidas realizadas en un lugar adecuado a las necesidades que requiere este tipo de estudio, y que describiremos en el apartado siguiente. La estrategia de muestreo seguida está fundamentada en los criterios especificados por [2], y los resultados experimentales se comparan con el modelo teórico desarrollado en ésta y otras referencias.

5.2 - ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS VALORES OBTENIDOS EN UN SUELO CON ÁRBOLES Y OTRO SIN ÁRBOLES

5.2.1 - Descripción del lugar de medida

Las medidas experimentales se han realizado en el Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (CIBA) descrito en el apartado 4.3. Además de lo dicho en el capítulo 4, este centro que está diseñado para el estudio de los fenómenos atmosféricos en las proximidades de la superficie terrestre, dispone, entre otras instalaciones, de una torre meteorológica de 100 m de altura dotada con 5 anemómetros para la medida de la velocidad del viento, 2 veletas para la dirección del viento, 5 sondas de temperatura, 2 sondas de medida de humedad relativa, etc. Estas instalaciones se sitúan en una gran explanada, libre de obstáculos, limitada en parte por unas zonas de siembra y en sus inmediaciones hay un bosque de pinos. Ver figuras 2 y 3 del anexo I.

En el bosque, los árboles están colocados de forma irregular, con diámetros de unos 15 cm aproximadamente, y la longitud de sus troncos variable entre los 0,5 y 5 m. La altura que alcanzan algunos de ellos, incluyendo su copa, puede superar los 10 m. El suelo estaba cubierto, además de la tamuja caída de los pinos, por mucha maleza baja, sobre la que destacaban hierbas de hasta unos 50 cm de altura. Ver figuras 4, 5 y 6 del anexo I.

5.2.2 - Procedimiento de medida

El equipo de medida utilizado fue el mismo que se expuso en el apartado 4.4 para la medida de impedancias por métodos indirectos.

Con el ánimo de abarcar el mayor número de casos posibles se han diseñado campañas de medida en las que se consideran distintas posiciones de los micrófonos, tanto en altura como en distancia. Con este criterio se han realizado dos campañas de medidas, en 2 días de finales de la primavera de 1999.

En la primera de ellas se colocó la fuente fuera del bosque, a 20 m de la primera línea de árboles y a 0.8 m de altura. En el esquema de la figura 5.1 se representa la situación de la fuente respecto del bosque. Las alturas para el micrófono receptor fueron de 0.8 y 1.2 m, y la distancia horizontal entre la fuente y los micrófonos fue de 2, 10, 20, 40, 60 y 80 m. En todos los casos se midió el Leq durante 4 minutos, en tercios de octava, con ponderación lineal y constante de tiempo fast. Las características del suelo eran similares dentro y fuera de bosque. En esta ocasión todas las medidas se realizaron con el analizador 2236. En una primera aproximación tomamos los valores de los parámetros meteorológicos que se recogían en el nivel más bajo de la torre (6m). La temperatura era de 28 ºC y la humedad relativa del 20%.

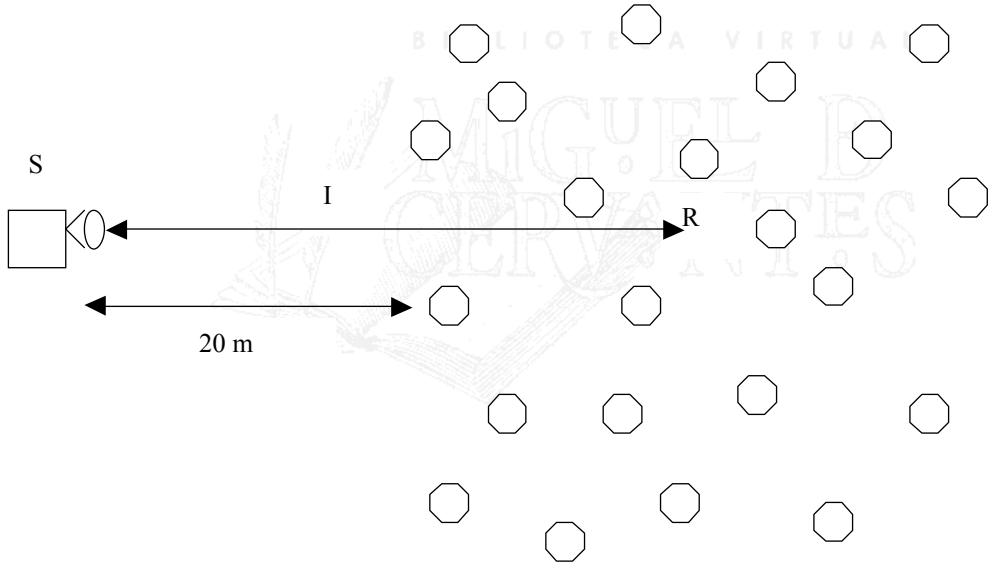


Figura 5.1: Esquema de trabajo. Bosque irregular en el que se mide con la fuente S fuera del bosque y el receptor R en su interior.

Para caracterizar la influencia del suelo, de forma independiente de la influencia de los árboles, en la segunda campaña de medidas se realizaron medidas sobre suelo muy alejado del bosque, de tal forma que las medidas no estuvieran influenciadas por su presencia. Las características del suelo eran

aparentemente similares a las del interior del bosque. Durante la medida, la temperatura fue de 27 ºC y la humedad relativa del 35%. Con la fuente colocada a la misma altura que en la primera campaña, 0.8 m, se efectuó un segundo muestreo midiendo simultáneamente en 3 puntos situados a 10, 20 y 40 m de la fuente y a las alturas de 0.8 y 1.2 m. Para ello se colocaron 6 micrófonos, unidos mediante un multiplexor al analizador 2143. De esta manera se pueden comparar los valores de niveles de presión sonora (Leq de 4 minutos) obtenidos a 3 distancias diferentes y a 2 alturas. Además, se utilizó el analizador Investigator para medir el Leq a una distancia de 2 metros de la fuente y a las mismas alturas que los otros micrófonos.

Todos los micrófonos se calibraron antes y después de cada medida y el ruido de fondo se midió en varias ocasiones para comprobar que no contribuía de forma significativa a la medida.

5.2.3 - Resultados experimentales

Como ya se expuso en el capítulo 4, para que los resultados obtenidos sean independientes de las características de la fuente, el micrófono situado a 2m de la fuente se toma como referencia, y a los valores medidos en los demás puntos se les resta el nivel de referencia. Por tanto, la atenuación en cada punto viene dada por:

ATENUACIÓN = (nivel a una distancia d) – (nivel medido a 2m.)

Siendo d la distancia entre la fuente y el receptor, de valores 10, 20, 40, 60 y 80 m. Los resultados de cada caso se representan en las gráficas como Ad, refiriéndose a la atenuación que hay a la distancia d.

5.2.3.1 - Valores obtenidos en la primera campaña

En las gráficas de la figura 5.2 se exponen los valores de la atenuación obtenidos con el micrófono receptor a una altura $h_r = 1.2$ m, y en las gráficas de la figura 5.3 los obtenidos con $h_r = 0.8$ m. Según puede apreciarse en estas gráficas, se produce un máximo de atenuación (mínimo en las curvas) en el intervalo de frecuencias comprendido entre 300 y 500 Hz debido a la interferencia destructiva entre la onda directa y la reflejada.

A medida que se va incrementando la distancia fuente–receptor la diferencia entre curvas consecutivas es mayor para las frecuencias bajas, destacando que se detecta una diferencia apreciable entre los valores obtenidos a la distancia de 20 m, límite del bosque, y los obtenidos a 40 m, en el interior del bosque, para las frecuencias medias y altas. Esto puede ser consecuencia, en gran parte, de que el límite del bosque está a 20 m de la fuente y sin embargo la distancia de 40 m ya está en el interior del mismo y por tanto se pone de manifiesto la influencia de la presencia del bosque.

Teniendo en cuenta que al duplicar la distancia el nivel disminuye seis dB, debido a la divergencia geométrica, vamos a comparar lo que sucede a 10, 20, 40 y 80 m. Para ello calculamos A10-A20, A20-A40 Y A40-A80 para ambas alturas. Los datos numéricos aparecen en la tabla 5.1. Si nos fijamos en las columnas correspondientes a A10-A20 vemos que para casi todas las frecuencias el valor es mayor de seis dB, esto quiere decir que hay atenuación por otro fenómeno distinto a la extensión esférica. A10-A20 es menor que A40-A20 para la mayoría de las frecuencias y para las dos alturas.

Hasta los 250 Hz, A40-A80 es mayor que A20-A40 para ambas alturas del receptor, pero a partir de 250 Hz sucede lo contrario para la mayoría de las frecuencias. Esto puede ser debido a que en A20-A40 estamos comparando

niveles en el interior del bosque con otros en el límite del bosque, mientras que en A40-A80 ambos niveles están medidos en el interior; en los dos casos los resultados son muy superiores a los 6 dB de la divergencia geométrica y esto nos da idea de que hay atenuación debido a otras causas.

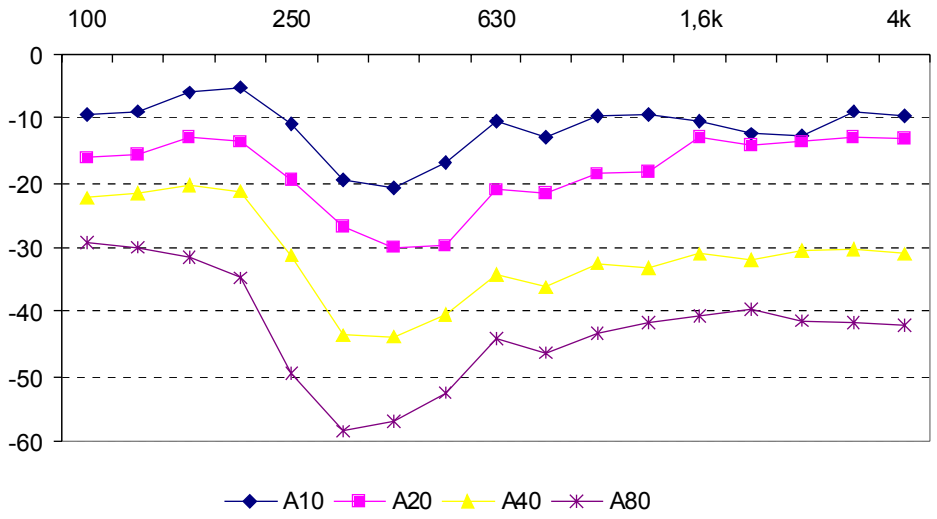


Figura 5.2: Representación de la atenuación (dB) frente a la frecuencia.(Hz), con h_s= 0,8 m; suelo con árboles y altura de micrófonos, h_r=1,2 m, para distintas distancias fuente-receptor.

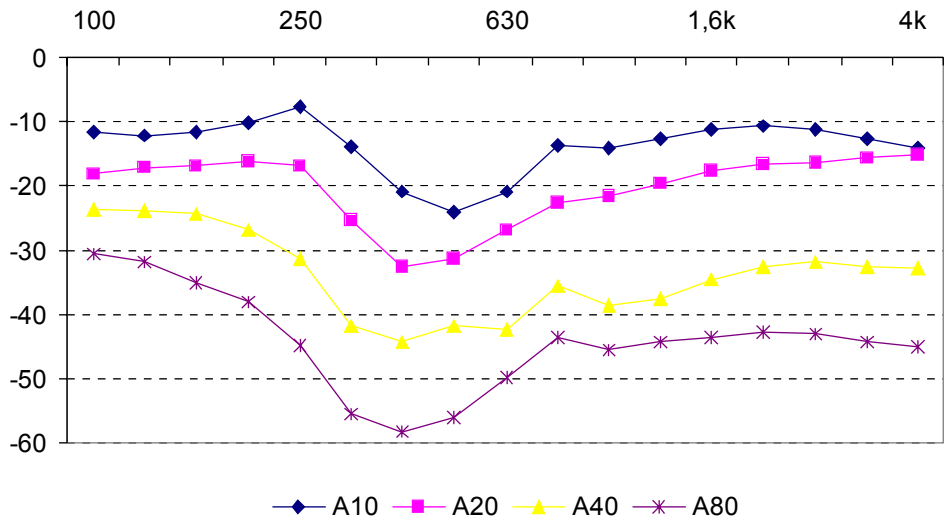


Figura 5.3: Representación de la atenuación (dB) frente a la frecuencia.(Hz), con h_s= 0,8 m; suelo con árboles y altura de micrófonos, h_r= 0,8 m para distintas distancias fuente-receptor.

	h=0,8 m			h=1,2 m		
F(Hz)	A10-A20	A20-A40	A40-A80	A10-A20	A20-A40	A40-A80
100	6,5	5,5	6,9	6,6	6,1	7
125	4,8	6,8	8	6,7	5,8	8,6
160	5,1	7,6	10,6	7	7,5	11,1
200	6,1	10,6	11,3	8,5	7,6	13,4
250	9,3	14,3	13,4	8,7	11,6	18,4
315	11,3	16,5	13,7	7,3	16,7	15
400	11,7	11,5	14,1	9	14,1	13
500	7,2	10,4	14,3	12,8	10,7	12,2
630	5,9	15,4	7,4	10,6	13,1	10
800	9,1	13	7,9	8,6	14,7	10,1
1k	7,6	16,8	7	8,9	13,8	10,9
1,25k	7	18	6,7	9,1	14,8	8,4
1,6k	6,5	16,9	9,1	2,7	17,9	9,7
2k	6,1	15,7	10,3	1,6	17,9	7,7
2,5k	5,3	15,4	11,1	1	16,9	10,7
3,15k	3,1	16,9	11,7	3,8	17,5	11,4
4k	1	17,5	12,3	3,5	17,7	11,3

Tabla 5.1: Datos numéricos de las diferencias que se producen entre las medidas realizadas a las distintas distancias de la fuente.

Para comparar lo que sucede a cada distancia de medida al variar la altura del receptor, nos fijaremos en las gráficas de la figura 5.4, donde se representa la atenuación en función de la frecuencia, en ella se observa que para la mayoría de las frecuencias, el valor absoluto de la atenuación a h_r= 1,2 m es más pequeño que a h_r = 0.8 m, es decir, la atenuación es ligeramente superior al disminuir la altura del micrófono receptor y en consecuencia la altura de los micrófonos influye en la atenuación del sonido. La atenuación máxima se produce para frecuencias similares para las dos alturas, en la mayoría de las distancias. Para todas las distancias las curvas son de formas semejantes y las mayores diferencias se producen a 10 m donde una de las curvas está desplazada respecto de la otra.

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

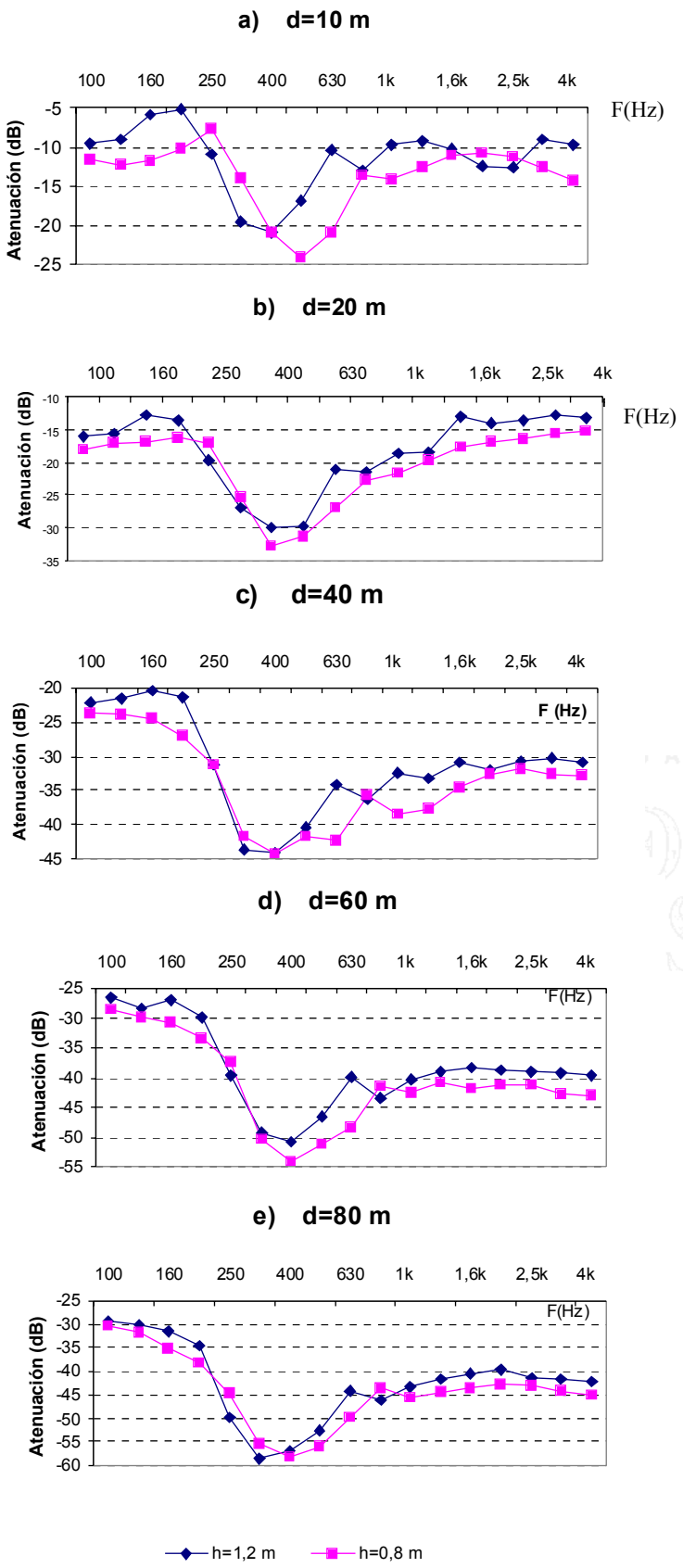


Figura 5.4: Atenuación en función de la frecuencia para las dos alturas del receptor, a cada una de las distancias de medida.

5.2.3.2 - Valores obtenidos en la segunda campaña

Los resultados obtenidos en la segunda campaña de medidas se representan en las gráficas de las figuras 5.5 y 5.6 y se puede observar que las curvas son formalmente análogas a las de la primera campaña. La distancia entre dos gráficas consecutivas parece del mismo orden para todas las frecuencias, excepto las altas, pero no es así como muestran los datos de la tabla 5.2.

A primera vista, en estas gráficas parece desprenderse un comportamiento similar al caso de las medidas realizadas en el interior del bosque, que fueron representados en las figuras 5.2 y 5.3, ya que el mínimo se presenta para frecuencias semejantes. Sin embargo, en el apartado siguiente veremos que realmente se producen comportamientos diferentes.

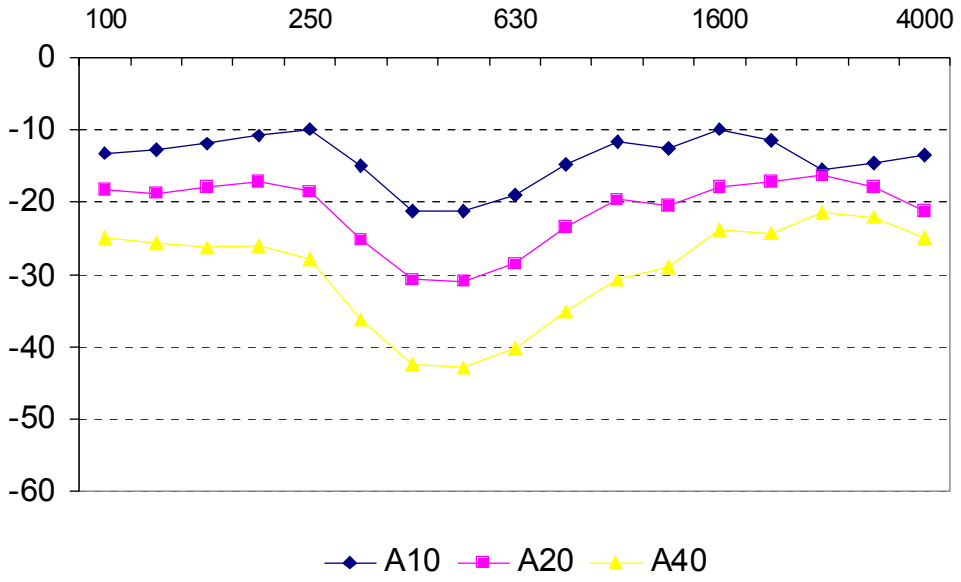


Figura 5.5: Representación de la atenuación (dB) frente a la frecuencia (Hz), con h_s= 0,8 m; suelo sin árboles y altura de micrófono h_r= 0,8 m

Si al igual que en el caso anterior, calculamos A10-A20 y A20-A40 para ambas alturas, tabla 5.2, vemos que para la mayoría de las frecuencias A20–A40 es mayor que A10-A20 para las dos alturas. También en este caso los valores son superiores a 6 dB para casi todas las frecuencias y la explicación sería que al considerar más suelo se produce más atenuación. A20-A40 en este caso tiene valores menores que los obtenidos en la primera campaña.

	h=0,8 m		h=1,2 m	
F(Hz)	A10-A20	A20-A40	A10-A20	A20-A40
100	5,2	6,6	5,1	6,4
125	6,1	6,8	6,4	6,0
160	6	8,6	6,1	7,6
200	6,6	8,8	6,6	8,1
250	8,5	9,4	8,4	9,0
315	10,1	11,1	9,1	11,4
400	9,6	11,7	9,5	12,0
500	9,8	12	9,4	10,9
630	9,4	11,7	8,6	10,6
800	8,7	11,6	8,4	10,2
1k	7,9	11,2	8,2	9,4
1,25k	8	8,3	6,2	8,1
1,6k	8,1	5,8	1,9	7,0
2k	5,7	7,1	-0,6	5,5
2,5k	0,1	5	4,6	5,0
3,15k	3,4	4,2	9,2	4,4
4k	7,7	3,8	7,5	0,7

Tabla 5.2: Datos numéricos de las diferencias que se producen entre las medidas realizadas a las distintas distancias de la fuente.

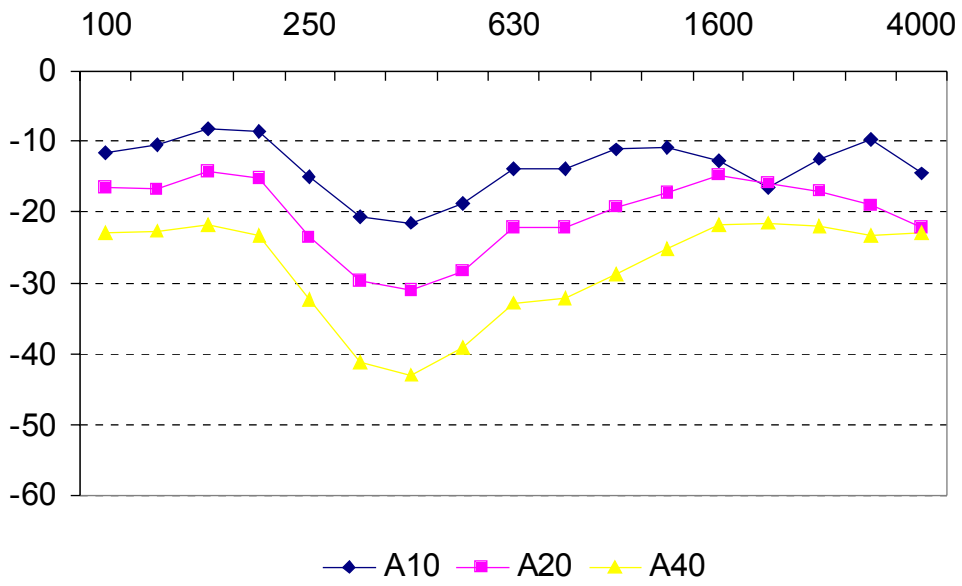


Figura 5.6: Representación de la atenuación (dB) frente a la frecuencia (Hz), con h_s= 0,8m; suelo sin árboles y altura de micrófonos, h_r= 1,2 m.

5.2.3.3 - Análisis comparativo entre ambas situaciones

En este apartado vamos a comparar los valores obtenidos en la primera campaña, zona con árboles, con los obtenidos en la segunda campaña, zona sin árboles, para la misma geometría (h_s=h_r=0,8 m).

En las gráficas de la figura 5.7 se representan los valores de la atenuación a 10 m de la fuente en un caso medido en la zona muy alejada de los árboles, segunda campaña de medidas, y en el otro, medido en la zona próxima a los árboles, primera campaña de medida, (dado que en la zona próxima a los árboles la fuente está situada a 20 m de la línea del bosque, indica que a 10 m de la fuente aún no hay árboles). En esta figura no se encuentran grandes diferencias entre los valores de la atenuación para ambos casos, en todo el rango de frecuencias, pero las discrepancias que se presentan pueden ser debidas a que aún no habiendo árboles en ninguno de los dos casos, el suelo puede ser ligeramente diferente.

Sin embargo en la figura 5.8, donde se representan los valores de la atenuación obtenidos en dos puntos distanciados de la fuente 20 m, uno en la zona muy alejada de los árboles y el otro en la zona con árboles, se observa que en los valores de la atenuación a bajas y medias frecuencias, no hay grandes diferencias pero sí a frecuencias altas. Las diferencias pueden ser consecuencia al igual que en el caso anterior, a que los suelos sean diferentes o a la influencia de otros parámetros.

A 40 m de la fuente ya hay bosque y éste afecta a la medida originando un desplazamiento de una curva respecto de la otra, al menos en algún rango de frecuencias. Aparecen discrepancias significativas para todas las frecuencias siendo más importantes a medias y altas frecuencias como se muestra en la figura 5.9. Estos resultados corroboran los obtenidos por Frike [1], según se pone de manifiesto en las gráficas de la figura 5.10.

Al comparar las curvas que hemos obtenido con las dadas por Frike se aprecia que son de formas mas o menos semejantes aunque con diferencias, que es importante destacar, y que pueden deberse a que las geometrías de las medidas son distintas. Así por ejemplo el mínimo de las curvas no se produce para las mismas frecuencias y los valores de la atenuación deben ser distintos si las geometrías son diferentes pero el aspecto formal es similar en ambos casos. Además es necesario tener en cuenta las diferencias propias de las especies de árboles y dentro de la misma especie sus características específicas, como diámetro, altura, etc.

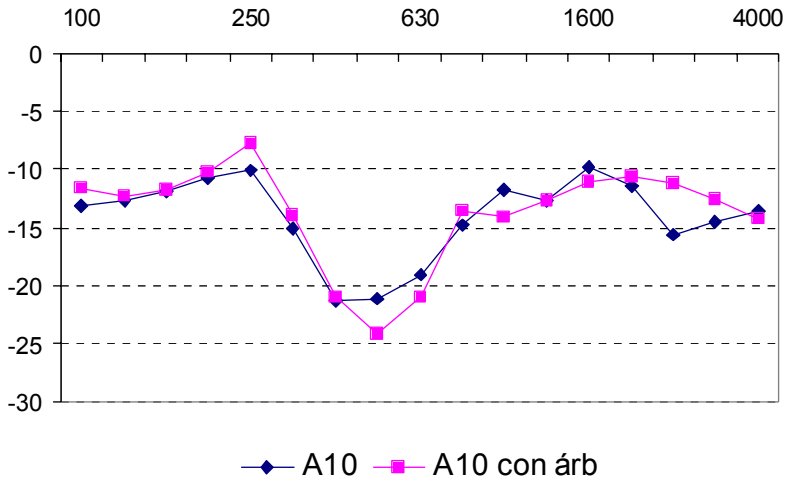


Figura 5.7: Atenuación (dB) frente a la frecuencia (Hz) en un punto del bosque (—) y otro alejado del bosque(—).

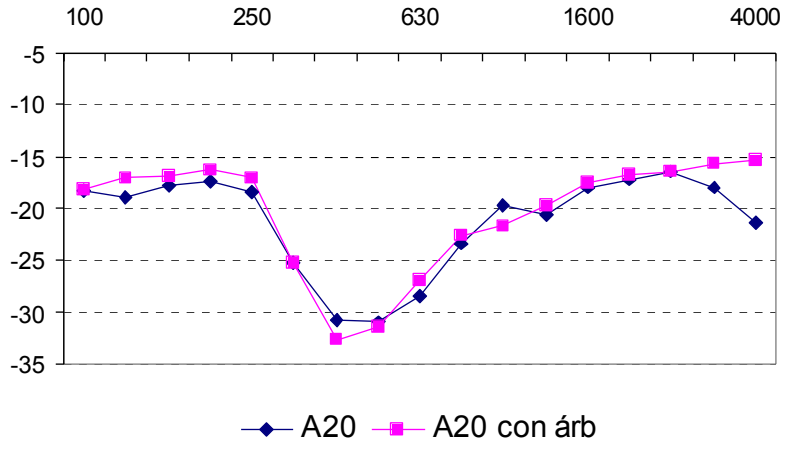


Figura 5.8: Atenuación (dB) frente a la frecuencia (Hz) en un punto dentro del bosque (—) y otro alejado del bosque (—).

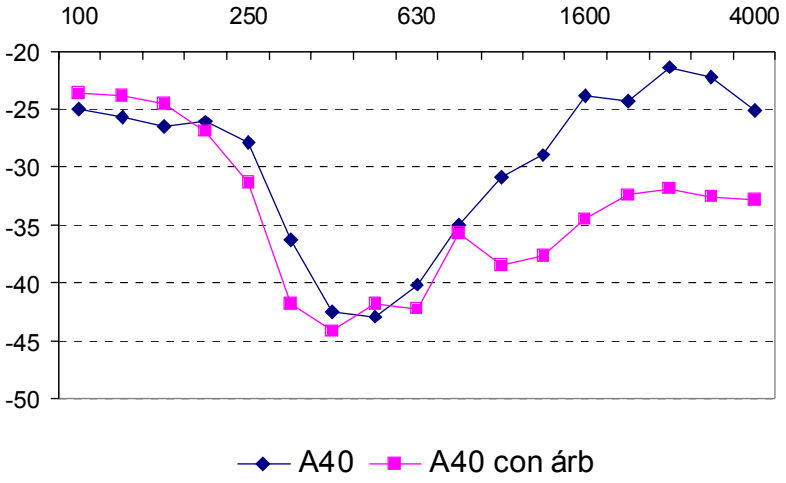


Figura 5.9: Atenuación (dB) frente a la frecuencia (Hz) en un punto dentro del bosque (—) y otro alejado del bosque (—).

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

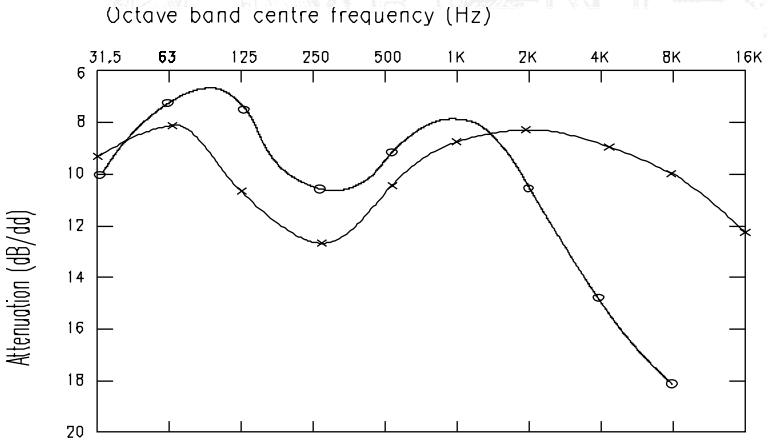


Figura 5.10: Valores aportados por Frike.
Campo abierto (***) y (ooo) en el bosque

Un aspecto importante que se debe considerar en este tipo de ensayos es que los árboles modifican con sus raíces las características del suelo, y por tanto, el valor de la resistividad al flujo será distinto aunque la composición del material sea la misma. Trabajando de la misma forma que en 4.5.1 del capítulo de Cálculo de Impedancias, y según se expone en [3] se obtienen los valores de la atenuación predichos a partir del modelo teórico para σ = 30, 50, 70 y 90 para la distancia de 80 m, y σ = 50, 70, 80, 90 y 100 para la distancia de 10 m. Los datos de la atenuación para cada medida se exponen en las tablas 5.3 y 5.4 y se representan en las gráficas de la figura 5.11 y 5.12 respectivamente, además en dichas gráficas también se representan las atenuaciones medidas en el interior del bosque con h_r = 0.8 m. A partir de las gráficas de las figuras 5.11 y 5.12 se puede comprobar que los datos aportados por el modelo se ajustan relativamente bien a los resultados experimentales para frecuencias bajas, y por el contrario, existen discrepancias a frecuencias altas para ambas distancias aunque una corresponda al interior del bosque y la otra al exterior.

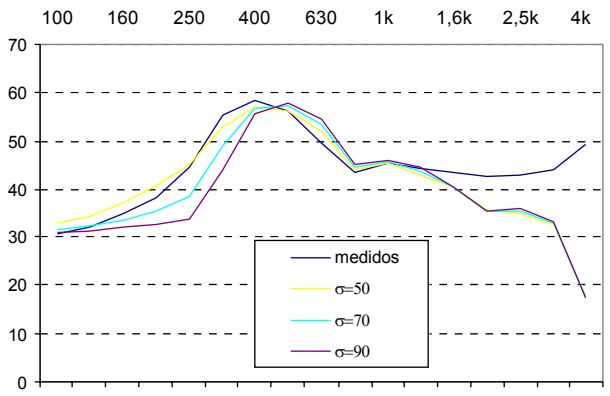


Figura 5.11: Valores de las atenuaciones (dB), aportados por el modelo con diferentes σ, y obtenidos experimentalmente, frente a la frecuencia (Hz), para la distancia de 80 m.

F(Hz)	Medidos exp.	σ=30	σ=50	σ=70	σ=90
100	30,5	36	32,76	31,54	30,96
125	31,9	39,45	34,33	32,28	31,26
160	35,1	44,66	37,16	33,7	31,87
200	38,2	48,84	40,73	35,58	32,64
250	44,7	51,65	45,14	38,5	33,79
315	55,5	55,11	52,99	49,07	44,2
400	58,3	56,05	56,92	56,82	55,78
500	56,1	54,23	56,21	57,34	58,01
630	49,7	50,37	52,21	53,59	54,69
800	43,6	43,89	44,04	44,52	45,13
1k	45,5	45,05	45,39	45,66	45,92
1,25k	44,4	41,09	43	43,85	44,53
1,6k	43,6	40,39	40,43	40,45	40,47
2k	42,8	35,94	35,7	35,62	35,66
2,5k	43	34,53	35,08	35,58	36,01
3,15k	44	32,18	32,4	32,68	32,95
4k	49,4	18,14	17,81	17,51	17,24

Tabla 5.3: Valores de las atenuaciones aportados por el modelo con diferentes σ y obtenidos experimentalmente, para la distancia de 80 m.

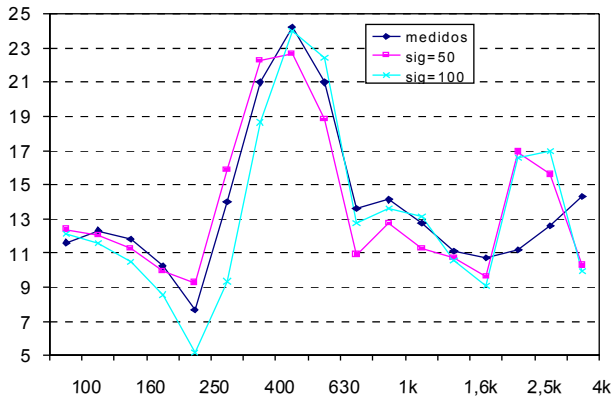


Figura 5.12: Valores de las atenuaciones (dB), aportados por el modelo con diferentes σ, y obtenidos experimentalmente, frente a la frecuencia (Hz), para la distancia de 10 m.

BIBLIOTECA VIRTUAL

F(Hz)	Medidos exp.	σ=50	σ=70	σ=80	σ=90	σ=100
100	11,6	12,39	12,21	12,16	12,13	12,1
125	12,3	12,03	11,74	11,66	11,6	11,55
160	11,8	11,28	10,79	10,64	10,54	10,46
200	10,2	9,96	9,09	8,84	8,66	8,53
250	7,7	9,24	6,85	6,12	5,58	5,17
315	14	15,84	12,58	11,32	10,26	9,34
400	21	22,29	21,03	20,21	19,4	18,65
500	24,2	22,71	23,84	24,08	24,12	23,99
630	21	18,86	20,52	21,23	21,87	22,43
800	13,6	10,89	11,53	11,92	12,32	12,74
1k	14,1	12,72	13,07	13,24	13,4	13,56
1,25k	12,7	11,27	12,11	12,48	12,81	13,12
1,6k	11,1	10,73	10,66	10,62	10,59	10,56
2k	10,7	9,57	9,26	9,16	9,09	9,04
2,5k	11,2	16,92	16,76	16,7	16,65	16,59
3,15k	12,6	15,58	16,16	16,44	16,71	16,97
4k	14,3	10,29	10,15	10,08	10,02	9,96

Tabla 5.4: Valores de las atenuaciones aportados por el modelo con diferentes σ y obtenidos experimentalmente, para la distancia de 10 m.

5.2.4 - Discusiones

Los modelos y trabajos teóricos predicen que el efecto directo de la vegetación sobre la propagación, independientemente del efecto indirecto que la vegetación produce por modificar las características del suelo, es significativo sobre todo a altas frecuencias. Sin embargo, el efecto del arbolado es difícil de evaluar específicamente de forma independiente al efecto del suelo, ya que hay una relación muy directa entre los árboles y la superficie de la tierra donde crecen.

Otros trabajos por el contrario [1] exponen que la masa arbórea por sí sola no tiene grandes efectos en la atenuación (a no ser que sea muy densa) sino que lo que realmente influye son las condiciones del suelo que origina su presencia.

5.3 - INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE VEGETACIÓN

Además de las campañas de medidas descritas en el apartado anterior se realizaron otras, en el mismo bosque de pinos, con el fin de tratar de estudiar el efecto de la densidad de vegetación, entendida como número de árboles por metro cuadrado. Las medidas se realizaron en un mismo día y en dos direcciones con distintas densidades, siendo el procedimiento de medida seguido el mismo que el descrito anteriormente, y según se expone en [4], la altura del receptor siempre fue de 0,8 m.

Los valores obtenidos se representan en las gráficas de la figura 5.13 y se encuentra que:

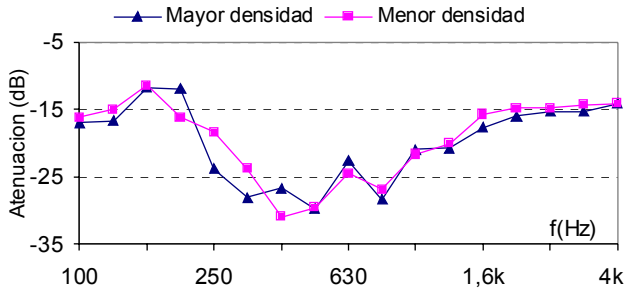
- Como cabría esperar a 20 m, figura 5.13 a), se observa un comportamiento muy similar en ambos casos, debido a que la densidad de

vegetación cerca de la fuente es prácticamente la misma.

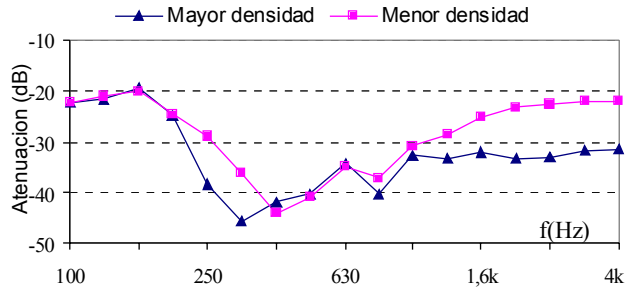
- Sin embargo a 40 m, figura 5.13 b), existen diferencias significativas a frecuencias comprendidas entre 200 y 400 Hz pero sobre todo a partir de 1kHz donde las atenuaciones en el bosque de mayor densidad pueden superar hasta 10 dB las correspondientes al bosque de menor densidad a frecuencias altas.

- De los valores obtenidos a las distancias de 60 y 80 m no se puede deducir que exista una diferencia clara según se muestra en las gráficas de las figuras 5.13 c) y d) ya que, si bien a frecuencias medias entre 250 y 500 Hz aproximadamente, parece apuntarse una mayor atenuación para mayor densidad, sin embargo, a frecuencias altas en el caso de la distancia de 60 m aparece una mayor atenuación en el bosque de mayor densidad pero a 80 m el efecto es contrario. Estas discrepancias pueden ser consecuencia de la influencia de otros factores como la refracción atmosférica o los efectos turbulentos. En cualquier caso las diferencias no son muy sustanciales y habría que hacer un estudio más amplio para poder sacar mayor información.

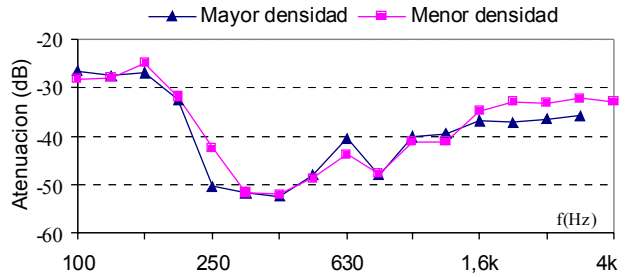
a) Distancia fuente-receptor = 20 m



b) Distancia fuente-receptor = 40 m



c) Distancia fuente-receptor = 60 m



d) Distancia fuente-receptor = 80 m

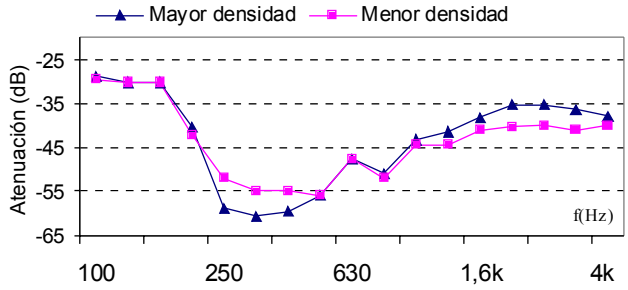


Figura 5.13: Atenuación frente a la frecuencia, para varias distancias fuente-receptor con dos densidades de vegetación.

5.4 - INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente una de las variables que influye en la propagación del sonido es la temperatura. En este apartado vamos a tratar de observar la posible influencia de esta variable en la propagación. Para ello, se ha medido el Leq, en el bosque de pinos anterior, con la fuente a una altura h_s=0.8 m y el micrófono receptor a una altura h_r=1.2 m, a diferentes distancias entre fuente y receptor (2, 10, 20, 40, 60 y 80 m), en distintas situaciones de temperatura.

Se eligieron tres días con temperaturas muy diferentes y con la velocidad del viento muy pequeña (menor a 1 $m \cdot s^{-1}$) que no fue tenida en cuenta. Nuestro interés se centra en este caso en observar si se aprecian diferencias en la propagación del sonido para distintos valores de temperatura desde un punto de vista meramente comparativo.

Las medidas se realizaron en tres días correspondientes a distintos meses del año en los que previsiblemente las temperaturas fueran bastante distintas. Con este criterio se efectuaron las medidas por la mañana, cuando la velocidad del viento es más baja. Durante el tiempo de realización de las medidas la temperatura no varió sustancialmente. Los meses elegidos fueron Marzo, Mayo y Julio y las temperaturas respectivas durante las medidas fueron 7, 15 y 20 ºC. En la figura 5.14 se expone la evolución de la temperatura en un intervalo de tiempo que abarca 2 horas, desde las 10:30 hasta las 12:30. Los valores que vamos a comparar son los medidos entorno a las 10:30 h.

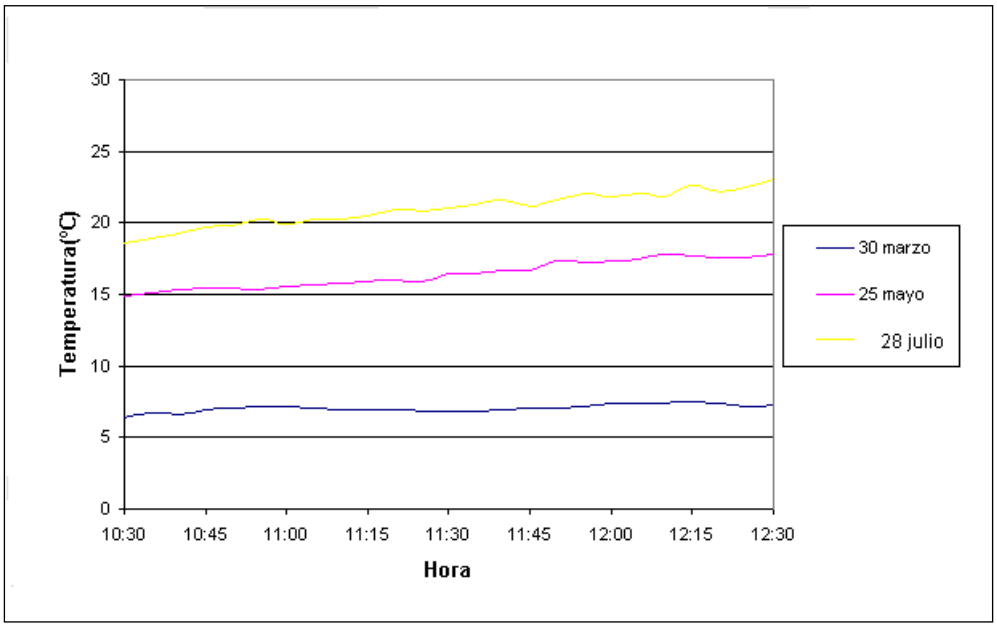


Figura 5.14: Evolución de la temperatura a lo largo de los tres días de medida.

En la figura 5.15 se representa la atenuación, en dB(A), frente a la distancia fuente-receptor, en m, para los tres días de medida. A partir de la gráfica parece deducirse que la mayor atenuación se produce cuando la temperatura es de 15 ºC, que corresponde al mes de mayo, para distancias superiores a 20 m, y que no hay diferencias significativas para las otras temperaturas en ninguna de las distancias. En el mes de mayo el tipo de suelo era diferente a los otros meses debido a que, las hierbas estaban más crecidas y su composición era diferente respecto de la existente en los meses de abril y julio, contenía muchas flores pequeñas ya que los meses de abril y mayo habían sido muy lluviosos, esto puede justificar los resultados obtenidos. De igual forma en la tabla 5.5 se exponen para cada distancia, en m, las diferencias de atenuación máxima y mínima, en dBA, entre los tres casos. Las diferencias máximas se han calculado restando a la atenuación de la curva a 15 ºC (por ser la más alta), la menor atenuación de los otros 2 días. El valor oscila entre 0,3 dB(A) para 20 m y

4,4 dB(A) para 60 m. Los mayores valores se producen a 40 y 60 m. Las diferencias mínimas se han calculado a partir de los datos de las curvas obtenidas para la temperatura de 20 y 7 ºC en los que la diferencia de temperatura estaba alrededor de los 15 ºC. Se encuentra que los valores de las diferencias mínimas están siempre por debajo de 0,7 dBA, obteniéndose estos valores a 40 m de la fuente. Estas diferencias son mínimas y por tanto no ofrecen información que pueda considerarse relevante.

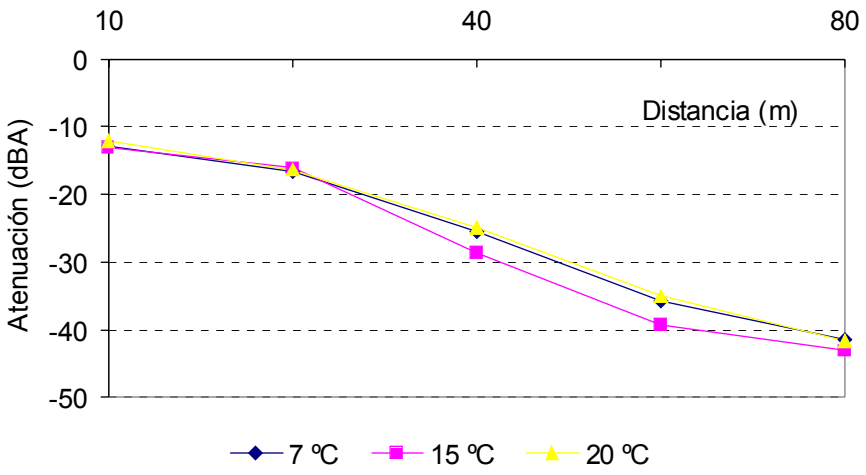


Figura 5.15: Atenuación en función de la distancia fuente-receptor para tres temperaturas diferentes.

Con el comportamiento observado no se puede inferir una tendencia de variación de la atenuación con la temperatura, y por tanto, para explicar estas diferencias de forma más rigurosa será preciso realizar estudios más pormenorizados, donde se contemplen otros parámetros como es el caso de los gradientes de temperatura y de la velocidad del viento, así como la presencia de fenómenos turbulentos.

Distancia (m)	Diferencias Mín.(dBA)	Diferencias Máx.(dBA)
10	0,6	1
20	0,1	0,3
40	0,7	3,8
60	0,7	4,4
80	-0,3	1,7

Tabla 5.5: Diferencias de atenuación, máximas y mínimas, para cada distancia, en días con diferentes temperaturas.

5.5 – BIBLIOGRAFÍA

[1] Frike, F. Sound Attenuation in Forests. Journal of Sound and Vibratión 92(1), 149-158. 1984.

[2] Price, M. A., Attemborough, K., and Nicholas W. Sound Attenuation Through Trees: Measurements and Models. J. Acoust. Soc. Am. 84(5), 1836-1844. 1988.

[3] Tarrero, A. I., González J. , and González, P. Contribución al estudio de la propagación del sonido en medios con vegetación. Tecniacústica . 1999.

[4] Tarrero, A. I., González, J., Machimbarrena, M., and Arenal, M. Temperature & Trees Influence on Propagation Outdoors. Congreso Internacional de Acústica, Roma . 2001.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 6

MODELOS DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE BOSQUES

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

6.1 - Introducción

6.2 - Dispersión

6.3 - Modelos de dispersión

6.3.1 - Modelo de dispersión de Foldy

6.3.2 - Modelo de dispersión múltiple de Embleton

6.3.3 - Modelo de Bullen y Fricke

6.3.4 - Modelo de Leschnik

6.4 - Modelo de propagación de sonido en exteriores Nord 2000

6.5 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 6:

MODELOS DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE BOSQUES

6.1 - INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha considerado el estudio del campo acústico sobre un suelo de superficie totalmente plana y sin ningún tipo de obstáculo entre la fuente y el receptor, pero esta situación se produce en escasos espacios habitados, y la realidad es que se dan otras circunstancias muy diferentes, como por ejemplo, que el terreno o superficie sea desigual, agreste, con rugosidades más o menos grandes. También puede darse el caso que entre la fuente y el receptor existan colinas, árboles, casas, pantallas u otro tipo de objetos, y para realizar el estudio cuando aparecen estas situaciones, ya no son válidos los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y se deben incorporar nuevos términos que tengan en cuenta estos elementos. Una posibilidad es volver a hacer aproximaciones y aplicar el Método de los Elementos de Contorno o la Ecuación Parabólica. Si bien estos métodos son atractivos y conducen a resultados bastante buenos, se puede seguir un camino alternativo basado en interpretar la situación como una combinación de problemas individuales e independientes. Esta división del problema inicial, permite obtener una solución aproximada y eficiente que tiene la ventaja de tener en cuenta conceptos físicos que intervienen en los mecanismos de propagación, y por lo tanto, el proceso es más descriptivo.

El hecho de que haya obstáculos entre la fuente y el receptor hace que aparezcan fenómenos físicos como la reflexión, la dispersión y la difracción. La combinación de estos fenómenos dificulta, en gran medida, la predicción del nivel sonoro con cierta exactitud. Hasta el momento no se han encontrado soluciones simples para estas situaciones pero se han dado algunas estimaciones usando métodos estadísticos que desarrollaremos a continuación.

6.2 - DISPERSIÓN

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.

Si el obstáculo es muy pequeño comparado con la longitud de onda (como a menudo ocurre con las ondas sonoras), todas las ondas dispersadas se propagan en todas las direcciones desde el objeto y no se produce tal sombra nítida.

Cuando las dimensiones del obstáculo son del orden de la longitud de onda, pueden ocurrir una gran variedad de fenómenos de interferencia y la situación es intermedia entre las anteriores produciéndose una tenue sombra

acústica.

Una onda sonora es dispersada, no solamente por un objeto sólido, sino que la dispersión también ocurre en una región en la cual las propiedades acústicas del medio, tal como la densidad o la compresibilidad, cambian sus valores respecto al resto del medio. De igual forma las turbulencias en el aire originan dispersión del sonido. Incluso la presencia de partículas de niebla en el aire y de burbujas en el caso del agua son causa de dispersión del sonido.

En este trabajo vamos a estudiar la propagación del sonido en el interior de bosques, y cabe indicar que muchos de los trabajos publicados al respecto [6] [21] exponen que la atenuación que se produce es debida, principalmente, a la dispersión y a la absorción en troncos, ramas y hojas. Por tanto en este sentido orientamos inicialmente nuestra investigación y posteriormente incluiremos el efecto del suelo. El mecanismo de dispersión es un fenómeno importante en la propagación cuando existen obstáculos de las dimensiones comentadas anteriormente, aunque aún no se conoce con exactitud su influencia a la hora de evaluar la energía dispersada. Una prueba de que este fenómeno no está totalmente cuantificado es la existencia de diferentes modelos en la bibliografía y de la discusión que generan los resultados obtenidos en la investigación. En el apartado siguiente se describirá, de forma resumida, los más utilizados en los últimos años.

6.3 - MODELOS DE DISPERSIÓN

En [5] se desarrolla un estudio de los mecanismos básicos de la dispersión y se propone que un camino para establecer un modelo que describa la dispersión, en un medio con varios objetos dispersores, consiste en incorporar los objetos en la descripción del medio. Es decir, se tiene en cuenta cómo están espaciados los objetos, si están correlacionados o no, su densidad, su distribución, etc. Para ello hay que establecer un nuevo medio con diferentes número de onda y velocidad del sonido. Cuando la densidad de objetos que dispersan se incrementa, hasta un cierto nivel, la influencia de cada uno sobre los otros no puede ser despreciada, dando lugar a lo que se conoce con el nombre de Dispersión Múltiple. La principal dificultad a la hora de estudiar esta teoría es que intervienen gran cantidad de casos aleatorios.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

6.3.1 - Modelo de dispersión de Foldy

Los primeros intentos en este campo fueron hechos por Foldy [11] en 1945, que desarrolló modelos, empleando configuraciones promedias de varias situaciones en las que se variaba la distribución de los elementos dispersores. El modelo de Foldy se basa en 2 expresiones que representan las ecuaciones fundamentales en la dispersión múltiple:

1) El campo en un punto r_j es la suma de la onda incidente, $\Psi_o(r)$, y de las ondas que divergen de todos los objetos dispersores que haya en el medio, por tanto, en el sumatorio hay tantos términos como objetos dispersores, j, haya en el medio.

$$\Psi(r) = \Psi_o(r) + \sum_j g_j \psi^j(r_j)\, E(r,r_j) \tag{6.1}$$

Donde $E(r,r_j)$ viene dado por: $E(r,r_j) = \dfrac{e^{-jk_o|r-r_j|}}{|r-r_j|}$

2) El campo externo actúa como un dispersor j en la suma de la onda incidente y las ondas divergentes de todos los dispersores que hay en el medio, excepto el dispersor j.

$$\Psi^j(r_j) = \Psi_o(r_j) + \sum_{j' \neq j} g_{j'} \psi^j(r_{j'})\, E(r_j,r_{j'}) \tag{6.2}$$

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Donde $\Psi_o(r_j)$ representa la onda entrante y $g_{j'}$ es un coeficiente de dispersión.

La teoría desarrollada por Foldy está basada en la distribución aleatoria de los dispersores y usó los valores promedios de los parámetros relacionados con la dispersión, donde los promedios se tomaron de un conjunto de posibles configuraciones de los dispersores. Este modelo tiene en cuenta el promedio de los cuadrados de las funciones de onda mediante la expresión:

$$\left\langle |\psi(r)|^2 \right\rangle = |\langle \psi(r) \rangle|^2 + \frac{1}{4\pi} \int S_S(r^j) \left\langle |\psi(r_j)|^2 \right\rangle L(r,r',r_j)\, dr_j \tag{6.3}$$

Donde L es la función de onda en el punto r debida a una fuente puntual

situada en el punto r', y S_s es la sección de la muestra de dispersión por unidad de volumen. S_s representa un área virtual que describe cuánta energía de la onda original es desviada. La potencia total dispersada es la intensidad entrante multiplicada por esta área virtual.

La expresión dada en la ecuación (6.3) es una ecuación integral donde el primer término $\left\langle |\psi(r)|^2 \right\rangle$ en el punto r es igual al cuadrado de la onda promedio en el punto r, dada por ($|\langle\psi(r)\rangle|^2$), mas la contribución debida a las ondas dispersadas desde todos los puntos del medio. La potencia por unidad de volumen en los puntos dispersores es proporcional al valor del campo excitador $\left\langle |\psi(r_j)|^2 \right\rangle$ en esos puntos y a la sección del elemento dispersor por unidad de volumen $S_s(r^j)$. Las distintas contribuciones se combinarán como si las ondas fueran incoherentes, es decir, como una relación de fases aleatorias entre unas y otras.

El primer término de la ecuación (6.3) es el valor promedio de la onda entrante que viene dada por:

$$\langle\psi(r)\rangle = A \cdot e^{-jkR_o} \tag{6.4}$$

Donde el número de onda k es en general un número complejo y R_o es la distancia total recorrida por la onda en el medio dispersor. El hecho de que la onda se atenúe con la distancia se tiene en cuenta al ser k un número complejo.

Foldy también expone que la velocidad de fase de la onda promedio, difiere de la velocidad de fase en el medio libre de objetos dispersores y viene

dada por:

$$1/c^2 = 1/c_o^2 + 4\pi G(r)/\omega^2 \tag{6.5}$$

$$G(r) = \int g(w,s)\, n(r,s)\, ds \tag{6.6}$$

Siendo g(w,s) el coeficiente de dispersión.

De esta forma el campo total aportado por la ecuación (6.3) consta de dos contribuciones, una coherente y otra incoherente. La contribución coherente es la onda promedio, y la contribución incoherente es debida a todas las ondas dispersadas de 1 a n veces.

Foldy propuso una solución para la ecuación (6.3) calculada por iteración en la que solamente hay que considerar los primeros términos de $L(r,r',r_j)$ si el cambio en la velocidad de fase es pequeño.

Waterman y Truell [28] desarrollaron el modelo años más tarde con algunas aproximaciones y encontraron que para un medio con N dispersores la contribución incoherente se incrementa con el incremento del volumen de los dispersores.

Lin e Ishimaru [18] estimaron la influencia del cociente entre la sección de dispersión y la de extinción en el campo total y encontraron que cuando el cociente es próximo a la unidad, casi no hay absorción, la intensidad incoherente se incrementa conforme se propaga la onda, y a una cierta distancia de la entrada al medio, la intensidad incoherente puede ser predominante, ocurre tanto para

ondas planas como esféricas. La atenuación de la intensidad incoherente disminuye conforme la distancia aumenta. Este es el efecto de dispersión múltiple que, en general, incrementa la potencia que le llega al receptor. La intensidad total dispersada se incrementa con el aumento de la frecuencia hacia un valor asintótico que está relacionado con las dimensiones del objeto dispersor.

Esta teoría tal como se desarrolla en los trabajos indicados es aplicable a casos muy frecuentes como son la presencia de casas o de bosques en el medio. En este último caso los troncos se consideran como cilindros de radio a y longitud L. Si se tiene en cuenta las hojas la dispersión es muy complicada.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

6.3.2 - Modelo de dispersión múltiple de Embleton

Embleton [10] estudió la dispersión de ondas planas producida por un conjunto de cilindros de longitud infinita colocados aleatoriamente, en función de las características de los cilindros, sus diámetros y sus impedancias de superficie, suponiendo que su superficie es localmente reactiva. Su estudio se basó en la teoría de dispersión múltiple de Twersky [27].

La atenuación a través de un array de cilindros verticales, de anchura d y radio a, puede ser calculada por la ecuación:

$$\text{Atenuación} = 20\ \mathrm{Im}(k_b)\cdot d\ /\ \ln 10 \qquad (6.7)$$

Siendo:

$$k_b=[k^2-4jNg+(g_1{}^2 - g^2)(2N/k)^2]^{0.5} \tag{6.8}$$

Donde k_b representa la constante efectiva de propagación del sonido en el fluido, N es el número medio de cilindros por unidad de área normal a sus ejes, y las amplitudes de dispersión vienen dadas por:

$$g = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \tag{6.9}$$

$$g_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n A_n \tag{6.10}$$

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Siendo A_n:

$$A_n=[jJ_n(ka) + ZJ'_n(ka)]/[jH_n(ka) + ZH'_n(ka)] \tag{6.11}$$

Donde Z es la impedancia de la superficie de los cilindros, y J_n y H_n son respectivamente las funciones de Bessel y Hankel de primera especie y de orden n, las funciones primadas indican su derivada. Para un valor de "ka" dado, hay un valor de "n" por encima del cual los términos adicionales prácticamente no influyen en la suma. Un cambio en la impedancia de superficie cambia las magnitudes de g y g_1 pero no el número de términos requeridos.

Esta teoría de dispersión múltiple puede utilizarse también para modelar la atenuación viscosa en follajes densos. Las pérdidas viscosas en la superficie de las hojas pueden ser representadas por una impedancia finita del tipo de

absorción porosa. Una representación más precisa requiere una solución del problema de dispersión simple por formas apropiadas incluyendo efectos térmicos y viscosos. Este problema ha sido considerado, para pequeños cilindros, en algunos trabajos como [1] y [2]. Cabe indicar que el modelo simple de dispersión no tiene en cuenta el efecto de resonancia de las hojas.

Algunos de los resultados obtenidos aplicando esta teoría de dispersión múltiple al caso de los troncos de los árboles se exponen en [21], donde se comparan los valores obtenidos mediante el modelo con los experimentales medidos en bosques, y no se llega a una relación estrecha sino que más bien aparecen diferencias significativas, sobre todo a frecuencias altas, para los tres tipos de árboles estudiados. La conclusión que allí se saca es que las ramas y las hojas también contribuyen a la atenuación de forma significativa.

Si se supone que los cilindros son rígidos, se incluye solamente atenuación debida a la dispersión, mientras que si se asume impedancia finita permite contemplar también la absorción viscosa. Las medidas del coeficiente de absorción del sonido, α, por la corteza de los árboles propuestas en [12] pueden ser usadas junto con la impedancia Z propuesta por Delany y Bazley [9] y la relación que se obtiene para α, según se expone en [21] es:

$$\alpha = 1-[(Z-1)/(Z+1)]^2 \qquad (6.12)$$

6.3.3 - Modelo de Bullen y Fricke

En esta línea de trabajo, Bullen y Fricke [6] utilizaron el modelo de Kuttruff [16] para estudiar la atenuación del sonido debido a la dispersión en un

cinturón de vegetación, suponiendo que los rayos sonoros dispersados son desviados uniformemente en todas las direcciones verticales. En estos estudios consideraron un cinturón infinito de vegetación, de profundidad d. Si una onda plana incide sobre uno de los bordes, al atravesar el cinturón de vegetación será en parte dispersada y en parte absorbida. Según este planteamiento la atenuación de la vegetación, definida como la intensidad en el borde opuesto al incidente relativa a la intensidad incidente, dependerá de la sección de dispersión σ_S y de la sección de absorción σ_A de las plantas individualmente, y del número de plantas por metro cuadrado.

En este trabajo Bullen y Fricke hacen una discusión muy interesante planteando la problemática que aparece al contemplar no solamente la vegetación sino también el suelo. De esta forma hacen una distinción entre atenuación y pérdidas por inserción. Los efectos del suelo son modificados o destruidos por la vegetación ya que la fase de las ondas que llegan a un punto sería aleatoria. Si la onda incidente no es plana pero procede de una fuente a una distancia finita desde el cinturón, experimentaría una expansión esférica que sería destruida por la presencia de vegetación. Todos estos factores pueden producir diferencias significativas entre los valores predichos para la atenuación debida a la vegetación y la disminución en los valores reales cuando existe vegetación entre la fuente y el receptor.

Por otra parte, la energía sonora es dispersada no solamente en planos horizontales sino que también lo es en planos verticales fuera de la vegetación. Cuando una onda es dispersada en un plano horizontal sufrirá un número de dispersiones más o menos elevado, dependiendo de las características del bosque, antes de abandonar la vegetación. Por tanto, se requiere un tratamiento estadístico para la dispersión en un plano horizontal, pero no es necesario para la dispersión en un plano vertical. Una aproximación usada fue considerar la

energía dispersada fuera de la vegetación como si hubiera sido absorbida en dispersiones previas.

6.3.4 - Modelo de Leschnik

En el modelo de dispersión de Leschnik [17] se estudia la dispersión producida por edificios, árboles, paredes, etc, idealizado como un modelo de tres dimensiones al que se aplica la técnica de Monte Carlo, obteniéndose el resultado como una solución aproximada que puede ser obtenida por técnicas de interpolación. Según Leschnik el nivel de presión sonora que resulta en un punto situado a una distancia r, tomando como presión de referencia 20 μPa, viene dado en dB por la siguiente expresión:

$$L(r) \approx L_w - 20\log(1/nQ) + 10 + \Delta L(h', \alpha, r') \qquad (6.13)$$

Donde L_w es la potencia de la fuente en dB, tomando como potencia de referencia 10^{-10} W, $\Delta L(h', \alpha, r')$ es la corrección del nivel originada por la dispersión a una distancia r y puede ser estimada por interpolación cúbica, sus valores se muestran en [17]. r' es la distancia efectiva normalizada a través del área de dispersión y h' es la altura normalizada del objeto que produce la dispersión, ambas se definen posteriormente.

El término nQ tiene en cuenta el número de árboles por metro cuadrado y el diámetro medio de sus troncos, y la forma de relacionar ambas magnitudes se expresa más adelante y nQ juega un papel importante cuando se estima el campo de sonido dispersado.

La ecuación (6.13) se propone para la dispersión producida por obstáculos distribuidos aleatoriamente. El coeficiente de absorción se calcula utilizando la ecuación (6.12).

6.4 - MODELO DE PROPAGACIÓN DE SONIDO EN EXTERIORES NORD 2000

Muchos de los modelos de propagación de sonido en exteriores, desarrollados principalmente por los Países Nórdicos para la predicción del sonido procedente de la industria o del ruido de tráfico [15] [20], consideraban la presencia del suelo pero no consideraban el efecto de la dispersión. Sin embargo últimamente se han planteado su incorporación, y en los trabajos recientes aparecen modelos donde se tiene en cuenta este fenómeno. En [22] y [23] se plantearon evaluar el alcance de la dispersión del sonido producida por rugosidades en la superficie, o bien, porque el sonido se propaga en zonas con obstáculos. Basándose en los principales resultados expuestos en [5] y descritos en el apartado 6.3.1 se propone un algoritmo simple para el cálculo de la dispersión del sonido en áreas con casas o bosques específicamente.

Este modelo es el que vamos a aplicar en nuestros cálculos y por tanto será desarrollado con cierto detalle. El planteamiento consiste en determinar la propagación del sonido en presencia de árboles, desde una fuente puntual a un receptor, ambos situados sobre una superficie que se supone plana, lisa y de impedancia acústica conocida. Cuando la superficie no es plana, las rugosidades que contiene pueden dispersar el sonido y la transición de la fase coherente

originalmente causada por la reflexión en el suelo se rompe. En [7] y [8] se han realizado medidas de SPL o exceso de atenuación del sonido sobre una superficie dura con rugosidades, y los resultados se han comparado con los predichos por el modelo propuesto por Attenborough et al [4]. La presencia de rugosidades reduce la frecuencia del máximo principal del efecto del suelo, nivel de sonido mínimo, y sugiere una posibilidad para alterar la superficie en la línea de interferir en la propagación del ruido. Attenborough et al [4] encontraron que las rugosidades modifican la impedancia acústica asociada a la superficie plana para obtener buen acuerdo con las predicciones de la teoría de la caja de Tolstoy [25] [26]. En [3] se expone que la dispersión incoherente y la correlación de las posiciones de los objetos que dispersan juegan un papel importante para la geometría y el tamaño de rugosidades estudiado. En el caso de la propagación en el interior de bosques el efecto fundamental de los árboles es la dispersión pero también afectan al propio suelo ya que sus raíces lo hacen más poroso.

Como ya hemos expresado anteriormente el fenómeno de la dispersión se produce principalmente, cuando la longitud de onda del sonido que se propaga, es menor que alguna de las dimensiones características del obstáculo que se encuentre en su trayectoria. En este caso el obstáculo dispersa el sonido en todas las direcciones, y no afecta mucho a la propagación de las frecuencias bajas. La frecuencia límite, por encima de la cual los fenómenos de dispersión son importantes, es función de las dimensiones de los objetos que lo producen. En este modelo los efectos de dispersión están descritos utilizando aproximaciones estadísticas. El modelo tiene en cuenta que la dispersión produce dos efectos diferentes:

1º- Reduce la coherencia entre el sonido directo y el reflejado, y por tanto, el mínimo originado por la interferencia de ambos es menos profundo y el nivel de presión sonora se incrementa.

2º- A altas frecuencias los árboles simplemente actúan como pantalla y el

nivel de presión sonora se reduce.

Huisman [13] mantiene que el mecanismo de dispersión no es un proceso de difusión sino que está más cerca de un proceso de extinción de energía. Para los procesos de extinción, la energía de la onda directa disipada, causa una reducción del nivel de presión sonora, que es proporcional a la longitud total de la trayectoria, Rsc, que el sonido recorre dentro de la zona que contiene a los objetos que producen la dispersión.

En el modelo que desarrollamos a continuación, se toma como punto de partida el modelo de dispersión de Leschnik [17], ya que los resultados obtenidos por Leschnik al comparar los valores medidos en el laboratorio, utilizando un modelo a escala, con los predichos por el modelo de dispersión, para una área urbana y un bosque, presentan un buen acuerdo. Además, este modelo tiene la ventaja de que se puede aplicar fácilmente. Se basa en un desarrollo en 3 dimensiones y el modelo estima que la corrección del nivel de presión sonora por efecto de la dispersión se especifica introduciendo el término Ae(r) en dB, y a una distancia r(m) de la fuente, para el caso de una fuente puntual, viene dada por:

$$Ae(r) = \Delta L(h', \alpha, r') + 20\log(r \cdot 8 \cdot nQ) \qquad (6.14)$$

Donde

$\Delta L(h', \alpha, r')$, como se comentó anteriormente, es la corrección del nivel dada por la dispersión y la divergencia geométrica, la cual, dentro de ciertos límites, puede ser desarrollada por técnicas de interpolación según se expone en [17].

α es el coeficiente de absorción del objeto que dispersa

r (m) es la distancia entre la fuente y el receptor

r' es la distancia efectiva normalizada a través del área de dispersión y

h' es la altura normalizada del objeto que produce la dispersión, sus expresiones son respectivamente

$$r' = Rsc \cdot nQ \tag{6.15}$$

$$h' = h \cdot nQ \tag{6.16}$$

El factor nQ está relacionado con el proceso de dispersión y toma valores específicos para cada objeto. En el caso de bosques nQ viene expresado por:

$$nQ(bosques) = n'' \cdot d \tag{6.17}$$

Siendo n'' la densidad de árboles y d el diámetro medio de los troncos de los árboles.

Se considera que la dispersión es significativa por encima de una frecuencia límite que viene dada por la expresión:

$$f' \approx c/(\pi \cdot d) \tag{6.18}$$

Siendo c la velocidad del sonido. O lo que es lo mismo, la longitud de onda del sonido correspondiente a la frecuencia f' viene dada por:

$$\lambda' \approx \pi \cdot d \tag{6.19}$$

Por encima de esta frecuencia, la función de ponderación kf, que compara el tamaño del tronco con la longitud de onda, se estima por medio de la función de intensidad dispersada relativa en el caso de cilindros dada en [19] y estimada por interpolación en el apéndice 3 de [24], mas adelante se expondrán sus valores en la tabla 6.1.

Dependiendo de los árboles que estén presentes el campo sonoro es más o menos difuso y se produce una pérdida en la coherencia entre el sonido directo y el reflejado. Por debajo de la frecuencia límite la propagación no se ve afectada por la dispersión y en este rango de frecuencias las ondas sonoras, directa y reflejada en el suelo, se propagan coherentemente y entre los 2 modos de propagación habrá un rango de transición. En el rango de transición habrá un decrecimiento gradual del campo sonoro coherente y un incremento gradual de la parte incoherente debida a la dispersión cuando se incrementa la frecuencia.

El modelo definitivo que se propone contempla la emisión de la fuente, la divergencia geométrica, el efecto del suelo, el efecto de dispersión e incluso la absorción atmosférica. El nivel de presión sonora L(r) en dB a una distancia r(m) de la fuente viene dado por la expresión:

$$L(r) = L_w - 10\log(4\pi r^2) + K(Z) + Ae(r) + A_A \tag{6.20}$$

Donde L_w es el nivel de potencia sonora de la fuente, $10\log(4\pi r^2)$ da cuenta de la divergencia geométrica, K(Z) es la corrección debida a la impedancia Z de la superficie del suelo, Ae(r) la atenuación debida a la

dispersión dada en la expresión (6.14) y A_A la atenuación del sonido en el aire.

K(Z) y Ae(r) no se suman en el sentido habitual, ya que, como hemos comentado, la dispersión produce pérdidas de coherencia y hay que combinar los efectos de suelo (gr) y de la dispersión (sc) para cada frecuencia. Estos efectos no son totalmente independientes, pues la dispersión influye en los efectos del suelo. Debido a esta interferencia no puede decirse que los respectivos términos de corrección, Ae(r) y K(Z), puedan sumarse sino que están condicionados uno por el otro. El modelo propone que la corrección del nivel total (en dB, referidos a campo libre) puede ser expresada aproximadamente por:

$$K_{gr+sc} = 10\log[\ (1\text{-}kf\cdot T)\ |1+pr|^2 + kf\cdot T\ (1+|pr|^2\ )\ ] + kf\cdot T\cdot kp\cdot Ae(r) \qquad (6.21)$$

El primer término en el argumento del logaritmo corresponde a la contribución de la parte coherente y el segundo término debido a la parte incoherente. El término (1-kf·T) es el coeficiente de transición. La cantidad kf representa la fracción de sonido coherente que es transformada en sonido incoherente. kf es una función de peso de la frecuencia que viene dada en la tabla 6.1 donde puede verse que su valor aumenta con la frecuencia y con el diámetro.

pr es la presión sonora compleja reflejada en el suelo que como se vio en el capítulo 3 viene dada por el segundo sumando de la ecuación (3.1) y su expresión es:

$$pr = Q\frac{A(R_2)}{R_2}\ e^{jkR_2} \qquad (6.22)$$

k_p es una constante de proporcionalidad igual a 1.25 para el caso de bosques.

T es una función que proporciona una transición suave evitando superestimaciones a cortas distancias y viene da por.

$$T=\min[(Rsc\cdot nQ/1.25)^2, 1] \qquad (6.22)$$

En el caso de que no haya dispersión la función kf es igual a cero y la corrección del factor suelo K(Z) depende solamente de *pr* .

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

X	0	0.7	1	1.5	3	5	10	20
kf	0	0	0.05	0.2	0.7	0.82	0.95	1

Tabla 6.1: Valores de kf en función de X, siendo X = ka = 2π·f·a / c. Donde f es la frecuencia, a es el radio medio de los troncos y *c la velocidad del sonido, 340 m/s.*

A pesar de que este modelo contempla muchos de los factores que intervienen en la propagación del sonido existen otros que no se tienen en cuenta, como son los efectos meteorológicos. El modelo supone que la atmósfera es homogénea y no se producen refracciones del sonido. Pero según se expuso en el capítulo 2 las refracciones de la atmósfera modifican la trayectoria del sonido y por tanto los resultados obtenidos con el modelo tendrán cierto grado de

incertidumbre, que será tanto mayor cuanto más aumente la distancia fuente-receptor. Los efectos de la absorción del aire se han calculado de acuerdo a la norma ISO 9613-1 [14].

En el capítulo séptimo se mostrarán los resultados aportados por este modelo para distintos tipos de bosques y se compararán con valores obtenidos experimentalmente. Además, en el capítulo ocho también se compararán los resultados del modelo con valores experimentales obtenidos en el laboratorio en bosques modelados a un factor de escala 1:25.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

6.5 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Attemborough, K. and Walker, L. A. Scattering Theory for the Absorption of Sound in Fibrous Materials. J.Acoust. Soc. Am. 49, 1331-1338. 1972.

[2] Attemborough, K. and Walker, L. A. Sound Dissipation by a Small Cylindrical Obstacle. J.Acoust. Soc. Am. 51, 192-196. 1972.

[3] Attenborough, K., Boulanger, P., Taherzadeh, S., and Ming Li, K. Rough Hard surface Ground Effects. Inter-Noise 97 . 1997.

[4] Attenborough, K. and Taherzadeh, S. Propagation from a Point Source Over a Rough Finite Impedance Boundary. J. Acoust. Soc. Am. 98(3), 1717-1722. 1995.

[5] Berg, T. Study of Sound Dispersión in Denses Systems. Nord2000 SINTEF Report STF40A98073 . 1998.

[6] Bullen, R. and Fricke, F. Sound Propagation Through Vegetation. J. of Sound and Vibration 80(1), 11-23. 1982.

[7] Chambers, J. P., Raspet, R., and Sabatier, J. M. Incorporating the Effects of Roughness in Outdoor Sound Propagation Models. Noise Con . 1996.

[8] Chambers, J. P., Sabatier, J. M., and Raspet, R. Grazing Incidence Propagation over a Soft Rough Surface. J. Acoust. Soc. Am. 1996.

[9] Delany, M. E. and Bazley. Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials. Applied Acoustics 3, 105-116. 1970.

[10] Embleton, T. F. W. Scattering by an Array of Cylinders as a Function of Surface Impedance. J. Acoust. Soc. Am. 40, 667-670. 1966.

[11] Foldy, L. The Multiple Scattering of Waves. Phys. Rev. 67, 107-119. 1945.

[12] Frank, L. D. Tree Bark and the Forest Floor as Sound Absorving Elements within a Forest. M.S. thesis, Pennsylvania state University, PA . 1967.

[13] Huisman, W. H. T. and Attenborough, K. Reverberation and Attenuation in a Pine Forest. J. Acoust. Soc. Am. 90(5), 2664-2677. 1991.

[14] ISO 9613-1. Acoustic-Attenuation of Sound During Propagation Outdoors. Part1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere. 1993.

[15] Kragh, J. et al. Environmental Noise from Industrial Plants. General Prediction Method. Lydteknisk Laboratorium, Lyngby, Denmark, Report no. 32 . 1982.

[16] Kutruff, H. A Mathematical Model for Noise Propagation Between Buildings. J. Sound Vib. 85(1), 115-128. 1982.

[17] Leschnik, W. Sound Propagation in Urban and Forest Areas. Acustica 44(1), 14-22. 1980.

[18] Lin, J. C. and Ishimaru, A. Multiple Scattering of Waves by a Random Distribution of Discrete Isotropic Scatterers. J. Acoust. Soc. Am. 56(6). 1974.

[19] Morse, P. and Ingard, K. U. Theoretical Acoustics (chpt. 8.1), MCGRAW-HILL. 1968.

[20] Nordic Council of Ministers. Road Traffic Noise- Nordic Prediction Method. TemaNord 1996:525 . 1996.

[21] Price, M. A., Attemborough, K., and Nicholas W. Sound Attenuation Through Trees: Measurements and Models. J. Acoust. Soc. Am. 84(5), 1836-1844. 1988.

[22] Storeheier, S. Å. Scattering Effects in Sound Propagation Outdoors. Scattering at Terrain Surfaces. SINTEF Memo 40-NO970225 Sub-project 1997-10. 1997.

[23] Storeheier, S. Å. Scattering Effects in Sound propagation Outdoors. Sound Scattering in Housing Areas and Forests. N2000 Sub-project 1997-10. SINTEF Memo 40-No970226 . 1997.

[24] Storeheier, S. Å. Nord 2000: Sound Scattering Outdoors. Revised Simple Models. SINTEF Memo 40-NO990003 . 1999.

[25] Tolstoy, I. Coherence Sound Scatter from a Rough Interface Between Arbitrary Fluids with Particular Reference to Roughness Element Shapes and Corrugated Surfaces. J. Acoust. Soc. Am. 72, 960-972. 1982.

[26] Tolstoy, I. Smoothed Boundary Conditions, Coherent Low Frecuency Scatter, and Boundary Modes. J. Acoust. Soc. Am. 75, 1-22. 1984.

[27] Twersky, V. Multiple Scattering of Waves by a Volume Distribution of Parallel Cylinders. J.Acoust. Soc. Am. 36, 1314-1329. 1964.

[28] Waterman P.C. and Truell, R. Multiple Scattering of Waves. J. of Mathematical Phiysics 2(4). 1961.

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 7

VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

7.1 - Introducción

7.2 - Modelo teórico. Influencia de los parámetros del bosque en el modelo

7.2.1 - Diámetro de los troncos de los árboles

7.2.2 - Altura de los árboles

7.2.3 - Densidad de árboles

7.3 - Medidas experimentales

7.3.1 - Equipo utilizado

7.3.2 - Procedimiento de medida

7.4 - Descripción de los lugares de medida y resultados

7.4.1 - Bosques regulares

7.4.1.1 - Bosque de chopos

7.4.1.2 - Bosque de catalpas

7.4.1.3 - Bosque de plátanos

7.4.1.4 - Bosque de chopos de 2 años

7.4.2 - Bosques irregulares

7.4.2.1 - Bosque de pinos

7.4.2.2 - Bosque de encinas

7.4.3 - Valores del parámetro nQ para los diferentes bosques

7.5 - Discusiones generales

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 7: VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

7.1 - INTRODUCCIÓN

Según hemos comentado en el desarrollo de este trabajo, uno de nuestros objetivos principales es validar un modelo teórico de propagación de sonido en exteriores, "el modelo Nord 2000", expuesto en el capítulo anterior en la sección 6.4. Este modelo ha sido desarrollado por los Países Nórdicos para describir la propagación del sonido en presencia de casas o de árboles. El modelo contempla, entre otros, el efecto del suelo, la absorción atmosférica y dos efectos diferentes causados por los árboles: la dispersión y el apantallamiento.

Esta parte se ha realizado en la Universidad Técnica de Dinamarca, DTU, en colaboración con la empresa Delta Acoustic que fue quien nos proporcionó el modelo. Realizar medidas in situ lleva una serie de inconvenientes que en general dificulta el trabajo en este campo pero más aún en los Países Nórdicos donde las condiciones climatológicas no son nada favorables. Este motivo hace que no dispongan de datos experimentales recientes y que el modelo propuesto no se haya comparado con ningún dato experimental hasta la realización de este trabajo.

Con el fin de validar el modelo se han hecho un gran número de medidas del nivel de presión sonora en diferentes tipos de bosques de distintas especies y diferentes composiciones: regulares, irregulares, con hojas, sin hojas, de hoja caduca, de hoja perenne, con diferente densidad de árboles y con árboles de distintos diámetros. Las medidas se han hecho a diferentes distancias entre la

fuente y el receptor bajo diferentes condiciones y los resultados experimentales se han comparado con las predicciones calculadas a partir del modelo. Todas las medidas experimentales se realizaron en la provincia de Valladolid y se llevaron a cabo cuando la velocidad de viento era pequeña y podía considerarse despreciable.

Aunque se ha calculado la resistividad al flujo para algunos suelos de composiciones semejantes a las de los bosques, según se expuso en el capítulo 4, es necesario volver a evaluar de nuevo este parámetro, ya que puede haber diferencias en el comportamiento del suelo debido al efecto de los árboles. Por otra parte la resistividad al flujo que se va a obtener va a ser diferente para cada distancia fuente-receptor ya que el comportamiento del suelo depende de la cantidad de terreno que se considere por no ser totalmente homogéneo.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

7.2 – MODELO TEÓRICO. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL BOSQUE EN EL MODELO

El modelo de propagación del sonido ha sido implementado en Matlab y los datos de entrada en el programa son:

- Altura de la fuente en m,
- Altura del receptor en m,
- Distancia fuente-receptor en m,
- Temperatura del aire en ºC,
- Humedad relativa en %,

- Resistividad al flujo en KNs/m^4,
- Diámetro medio de los troncos en m,
- Altura media de los árboles en m,
- Distancia horizontal del bosque entre fuente y receptor en m,
- Densidad superficial de árboles en árboles $/m^2$,
- Coeficiente de absorción de los árboles, de valor 0.1.

El programa calcula, con el modelo con bosque y sin bosque, para cada distancia fuente-receptor, el nivel de presión sonora referido a campo libre, en dB, (en las gráficas aparecerá SPL Ref. a campo libre, dB) en función de la frecuencia, en tercios de octava.

En el caso particular de que entre la fuente y el receptor no exista bosque, se anula la contribución del bosque en el modelo de propagación, y de esta forma pueden predecirse los diferentes comportamientos de un mismo tipo de suelo cuando tiene árboles y cuando no los tiene (los resultados en las gráficas vienen indicados como modelo con bosque y modelo sin bosque respectivamente).

En el modelo aparecen distintos parámetros, como se ha visto anteriormente, unos relativos a la geometría de la medida, otros que hacen alusión a los factores meteorológicos, otros a las características del suelo, y por último, otros relacionados con las características propias del bosque. Pero no todos influyen de igual forma, y por tanto, es necesario efectuar un análisis de la influencia de cada uno de ellos.

A continuación se expone la influencia de los parámetros del bosque, en el

modelo, estudiada de forma individualizada.

7.2.1 - Diámetro de los troncos de los árboles

Con el fin de analizar la influencia del diámetro de los troncos en el modelo se han probado diámetros de árboles muy diferentes. Con una densidad de árboles muy pequeña (0,0067 árb/m^2), se han hecho predicciones a partir del modelo aumentando el valor del diámetro de 0.1 en 0.1 m, desde 0.3 m hasta 0.7 m.

Se han elegido estos límites ya que para una distancia fuente-receptor menor de 80 m y un diámetro de los troncos de 0,3 m no hay diferencias apreciables en el modelo entre los casos de bosque y ausencia del mismo. Para una distancia de 80 m el modelo empieza a predecir leves diferencias entre los dos casos.

De los resultados obtenidos en el cálculo (no se adjuntan), se desprende que el aumento del diámetro de los troncos de los árboles origina diferencias entre el modelo con y sin bosque especialmente a frecuencias medias. Estas diferencias entre los valores son tanto más acusadas cuanto mayor es el diámetro de los troncos y cuanto mayor es la distancia fuente-receptor. Se comprueba también que la diferencia entre los valores de ambos modelos aparece a distancias más cortas cuanto mayor es el diámetro.

Una justificación de todo esto podría ser la siguiente, si el diámetro de los árboles es muy pequeño, éstos casi no influyen a distancias cortas, ya que la densidad es pequeña, y por tanto para que se ponga de manifiesto su presencia hay que considerar una extensión de bosque grande. Si el diámetro aumenta los

árboles influyen más, como se pone de manifiesto en el modelo, y su presencia se manifiesta con menos cantidad de bosque, es decir, para distancias más cortas.

7.2.2 - Altura de los árboles

Si bien parece que la altura de los árboles pudiera constituir un parámetro importante en el modelo resulta que apenas si interviene, por tanto, el modelo no es muy sensible a este parámetro, supone que los árboles están crecidos, y probando con alturas tan distintas como 0,5 m y 10 m no se aprecian diferencias en las predicciones.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

7.2.3 - Densidad de árboles

Para la misma distancia fuente-receptor, y el mismo diámetro de los árboles, la divergencia entre los valores predichos por el modelo con árboles y el modelo sin árboles se incrementa significativamente con la densidad de árboles. Para un diámetro dado, la diferencia entre los valores de ambos modelos aparece a distancias más cortas si se incrementa la densidad de árboles.

Si la densidad de árboles es alta, el diámetro de los troncos grande y la distancia fuente-receptor también grande, los niveles de presión sonora predichos por el modelo con bosque a frecuencias altas son mucho menores que los obtenidos usando el modelo sin bosque. Si el diámetro de los troncos es pequeño, el incremento de la densidad de árboles sólo produce efectos apreciables a frecuencias altas.

7.3 - MEDIDAS EXPERIMENTALES

7.3.1 - Equipo de medida

El equipo de medida utilizado ha sido similar al de las medidas anteriores, expuesto en el capítulo 4, y esencialmente estaba formado por:

- Fuente sonora, modelo 4224 de B&K
- Analizador modular 2144 de B&K. (Dos canales en tiempo real).
- Analizador modular 2260 de B&K. (Investigator).
- Multiplexor 2811 de B&K
- Equipo de 6 micrófonos de ½ pulgada de B&K
- Calibrador 4230 de B&K

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

7.3.2 – Procedimiento de medida

El procedimiento seguido para la realización de las medidas ha sido prácticamente similar en todos los casos. La fuente y el receptor se colocaron dentro del bosque a 0.8 y 1.2 m de altura respectivamente. Se medió el nivel equivalente durante un minuto para las siguientes distancias fuente-receptor: 2, 10, 20, 40, 60 y 80m.

La fuente emitía un ruido de banda ancha. La medición se realizó en bandas de tercios de octava, sin ponderación frecuencial y constante de tiempo fast.

Para cada medida se comprobó que el ruido de fondo estaba muy por debajo, 15 dB, del nivel medido con la fuente encendida en el punto más alejado.

Se tuvo en cuenta que durante la medida la velocidad del viento fuera prácticamente inapreciable, y la medida acústica no se consideró en los casos en los que fuera superior a 2m/s.

En los bosques regulares[1], con carácter general, la línea que unía la fuente con el receptor era paralela a la línea de los árboles y estaba en el medio de dos hileras de árboles consecutivas, aunque en algunos casos también se midió en otras direcciones.

El nivel de presión sonora en un punto, en presencia de suelo, depende del propio suelo y de la distancia fuente receptor, a través de la divergencia geométrica. Para diferenciar ambos efectos el procedimiento habitual es obtener los valores de presión sonora respecto de los que habría en el mismo punto si no hubiera suelo, (en campo libre) ya que en muchos casos es deseable estudiar sólo el efecto del suelo, es decir, separado de la divergencia geométrica. El camino usual para hacer esto es evaluar en cada punto la presión referida a campo libre, es decir, sin obstáculos. Para ello, a los valores experimentales obtenidos en cada punto, para una distancia fuente-receptor d, Lp_d, se les resta el valor correspondiente a campo libre para esa distancia, y de esta forma, el nivel de presión sonora referido a campo libre para la distancia d, viene dado por:

$$\text{SPL ref a campo libre} = Lp_d - Lp_{\text{campo libre}} = Lp_d - L_w + 10\log 4\pi d^2 \qquad (7.1)$$

Donde L_w es el nivel de potencia sonora de la fuente.

[1] Se definen en el apartado 4.1

La potencia sonora con la que emitía la fuente no era la misma en todos los bosques (ya que algunos lugares requerían niveles de emisión más altos) pero se mantenía constante en cada uno de ellos. Como valores de referencia se tomaron los valores obtenidos a una distancia d=2 m de la fuente.

Con el fin de determinar la potencia sonora de la fuente se han comparado los niveles experimentales a 2 m de la fuente, con los valores dados por el modelo, para la misma distancia. El ajuste del modelo a esta situación se ha realizado variando la resistividad al flujo hasta hacer coincidir el primer mínimo de los datos experimentales con el primer mínimo de los datos predichos por el modelo. Este proceso de adecuación no introduce errores apreciables ya que el nivel de presión sonora a una distancia de 2 m no es muy sensible a las características del suelo con las alturas de fuente y receptor utilizadas.

Por tanto la potencia sonora de la fuente L_w será:

$$L_w = Lp_{d=2} + 10\log 4\pi 2^2 - (\text{SPL ref. a campo libre})_{\text{modelo } d=2} \qquad (7.2)$$

Esta es una forma habitual de trabajo cuando no se conoce con exactitud la potencia de emisión de la fuente. Como cabría esperar se observa que para todos los bosques hay un acuerdo casi total para d=2 m entre los valores experimentales y los predichos por el modelo, como se muestra en las figuras 7.4a, 7.5a, 7.6a, 7.9a, 7.10a, 7.11a, 7.12a, 7.14a, 7.15a y 7.16a.

7.4- DESCRIPCIÓN DE LOS LUGARES DE MEDIDA Y RESULTADOS

En este apartado describiremos cada uno de los bosques en los que se ha medido y mostraremos los valores que se han obtenido, usando el procedimiento de medida que se ha expuesto en el punto 7.3.2, para cada una de las distancias fuente-receptor. Los resultados se muestran en distintas gráficas en las que se representan los valores del nivel de presión sonora referido a campo libre, (experimentales y predichos por el modelo con bosque y sin bosque), frente a la frecuencia, para cada una de las distancias fuente-receptor.

Para obtener los valores predichos por el modelo, es necesario introducir en dicho modelo todos los parámetros que se expusieron anteriormente y para cada distancia fuente-receptor se va variando la resistividad al flujo hasta que las curvas obtenidas con los datos teóricos y experimentales, se aproximen lo máximo posible en el mayor rango de frecuencias, teniendo en cuenta que el valor de la frecuencia para la que se produce el primer mínimo de interferencia tiene que ser la misma en ambas curvas. Es decir, σ se determina mediante un método indirecto, (método comentado en el capítulo 4). En general, para cada distancia fuente-receptor se va a obtener un valor distinto para la resistividad al flujo, ya que dependiendo de la extensión de suelo que se considere, su comportamiento puede ser diferente.

7.4.1 - Bosques regulares

Se incluyen en el grupo de bosques regulares aquellos en los que los árboles han sido plantados regularmente y por tanto forman una distribución espacial homogénea. Los bosques de este tipo, que hemos considerado, eran todos de hoja caduca. En alguno de ellos se han hecho medidas en verano, y en invierno con el fin de obtener información del efecto de las hojas. Excepto uno

de los bosques, el bosque de chopos, todos pertenecen a plantaciones del Vivero Forestal de Valladolid, de la Junta de Castilla y León.

7.4.1.1 - Bosque de chopos

Este caso es una plantación extensa de unos 300 m de larga por 66 m de ancha. Los chopos fueron plantados regularmente en hileras y distan 5 m unos de otros dentro de cada hilera; la distancia entre hileras también es de 5 m. La altura media de los árboles es de 9 m y el perímetro de los troncos varía entre 75 y 98 cm, resultando un diámetro medio de 0.27 m. La densidad de árboles es aproximadamente de 0.042 árboles/m^2. El suelo es básicamente tierra con muy pocas hierbas y se regaba frecuentemente. En el anexo III se muestran fotografías de este bosque.

En este lugar se realizaron medidas en tres direcciones distintas, a las que nos referiremos con el nombre de transversal, longitudinal y oblicua. En la dirección transversal la medida se efectuó a lo ancho de la chopera, con la fuente cerca del borde y en la longitudinal a lo largo del bosque. En ambos casos la dirección fuente-receptor era paralela a las hileras de los árboles y equidistante a las dos más próximas. En la tercera medida, dirección oblicua, la dirección fuente-receptor formaba un ángulo de 15 grados aproximadamente con la hilera de los árboles. En la dirección longitudinal y oblicua la fuente y el receptor se colocaron en el interior del bosque. En la dirección transversal se realizaron 2 medidas, una en verano, árboles con hojas y otra en invierno, árboles sin hojas.

Por tanto, en este bosque se realizaron tres medidas en verano y una en

invierno. Los resultados correspondientes se muestran en las gráficas de las figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 respectivamente.

Se ha construido a modo de resumen la tabla 7.1 con las resistividades al flujo, para cada una de las distancias fuente-receptor, en las cuatro medidas realizadas. En ella se muestra que los valores de la resistividad al flujo son más pequeños en verano que en invierno. Además de la misma tabla se deduce que cuando los árboles tienen hojas, los valores de la resistividad al flujo más pequeños, se obtienen en el caso de la dirección longitudinal, con el receptor y la fuente en el interior del bosque, y son similares a los obtenidos en la dirección oblicua. En este último caso la fuente y el receptor estaban muy alejados de los bordes del bosque, para todas las distancias de medida, lo que hace que el efecto del bosque sea más notable y justifique los menores valores para la resistividad al flujo. A grandes distancias fuente-receptor (60 y 80 m) los resultados son más parecidos en las tres direcciones en las que se midió en verano, que a cortas distancias. En el caso de distancias cortas aparecen diferencias significativas entre la dirección de medida transversal y las otras dos, obteniéndose valores de resistividad al flujo muy diferentes. Esto puede ser debido a que al aumentar la distancia el bosque se homogeiniza y por lo tanto los resultados de las medidas se hacen más independientes de la dirección.

	CHOPOS (Valores de σ en KNs/m^4)			
Distancia	Invierno (sin hojas)	Verano (con hojas)		
	Transversal	Transversal	Longitudinal	Oblicua
2	55	50	20	20
10	800	300	100	100
20	900	400	40	85
40	1000	90	50	100
60	500	100	60	80

80	400	90	60	80
87	-	100	75	70

Table 7.1: Valores de la resistividad al flujo σ (kNs/m^4) para diferentes distancias (m) fuente-receptor en cada una de las direcciones de medida.

Del análisis comparativo de los resultados recogidos en las gráficas de las figuras 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 se pueden hacer los siguientes comentarios:

Para cortas distancias (2 y 10 m) el modelo predice los mismos valores con y sin bosque. Por tanto a estas distancias el modelo no es sensible a la presencia de árboles cualquiera que sea la dirección de la medida. Por otra parte el modelo predice bastante bien el comportamiento real de la propagación del sonido. Cualitativamente se predicen los máximos y los mínimos en cada caso, y cuantitativamente las diferencias entre los valores experimentales y los predichos son pequeñas (en promedio menores de 2 dB).

Para 20 m únicamente aparece un mínimo y un máximo en las gráficas, y a partir de 40 m sólo el mínimo. Para estas distancias el modelo predice una ligerísima diferencia entre la ausencia o no del bosque (mayor atenuación con bosque a frecuencias altas, pero menor a las frecuencias próximas al mínimo). Los valores experimentales están por encima de los teóricos, sobre todo entorno al mínimo. La frecuencia del mínimo depende del cambio de fase de la reflexión en el suelo, y el valor del SPL del mínimo depende también de la absorción del suelo. En el modelo se utiliza sólo σ para caracterizar el comportamiento del suelo y parece que a estas distancias para ajustar el mínimo haría falta otros parámetros. En el caso de árboles sin hojas para bajas frecuencias la atenuación experimental es mayor que la predicha.

Para 60 m aumenta la separación entre los valores predichos con árboles y sin árboles. En los bosques con hojas los resultados obtenidos se ajustan bastante bien a los predichos. En el caso de árboles sin hojas la atenuación experimental es bastante mayor que la predicha. Estas discrepancias entre los valores experimentales y los predichos pensamos que pueden ser debidos a que el modelo no predice bien los resultados en este caso posiblemente porque no se tiene en cuenta la presencia o ausencia de hojas.

Para las distancias mayores (80 y 87 m) la tendencia es que los valores experimentales superan a los teóricos, sobre todo a frecuencias altas. Esto quiere decir que a frecuencias altas la atenuación es menor que la predicha.

BIBLIOTECA VIRTUAL

En términos generales podemos asumir que, el modelo predice muy bien los resultados a bajas frecuencias, presentándose las mayores discrepancias a frecuencias medias y altas. En la mayoría de los casos la diferencia entre los valores medidos y los predichos son menores de 5 dB.

El modelo predice un comportamiento diferente con árboles y sin árboles a partir de una frecuencia más baja cuanto mayor sea la distancia fuente-receptor.

Las discrepancias que se presentan entre los valores teóricos y experimentales pueden ser debidas a fenómenos no contemplados en el modelo, como puede ser la refracción atmosférica, aunque si la velocidad del viento es baja y la temperatura prácticamente constante, este fenómeno es poco importante, sobre todo a cortas distancias. También puede ser debido a que el

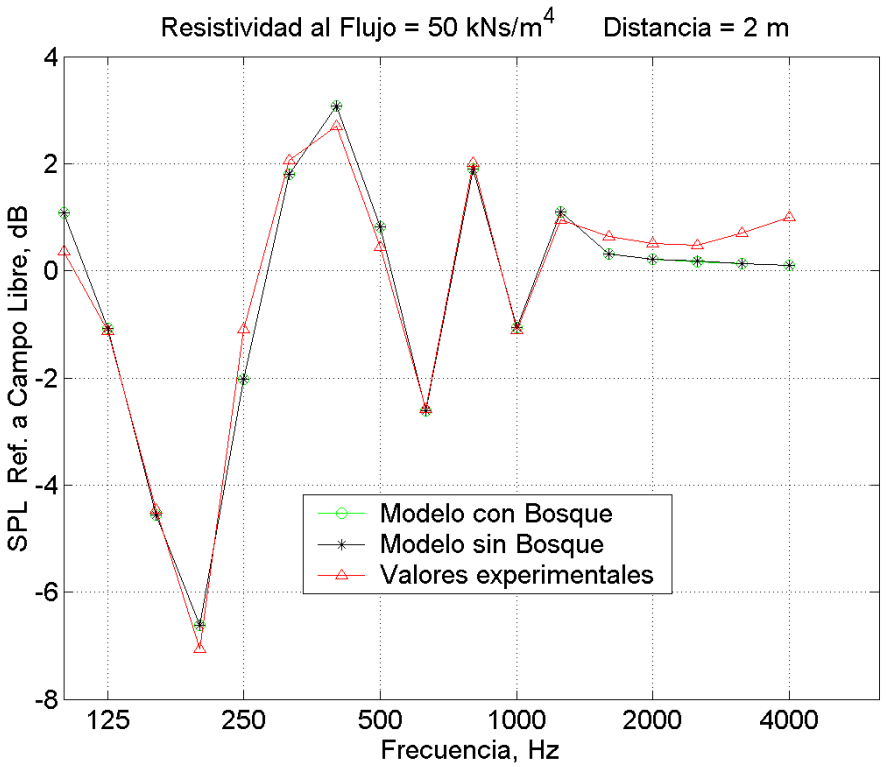
suelo no era totalmente plano. Pero también, la diferencia entre los valores predichos por el modelo y los experimentales podría ser, al menos parcialmente, debida a la sobreestimación de la incoherencia entre el sonido directo y el reflejado por los árboles. Este efecto se observar en las gráficas de las figuras 7.1g, 7.2f, 7.2g ,7.3f, 7.3g, 7.4e y 7.4f. En todas ellas los valores predichos a frecuencias medias son mayores que los experimentales.

De todas las gráficas que se han presentado solamente en 7.1g. 7.3f, 7.4e y 7.4f aparece una atenuación adicional debida al bosque.

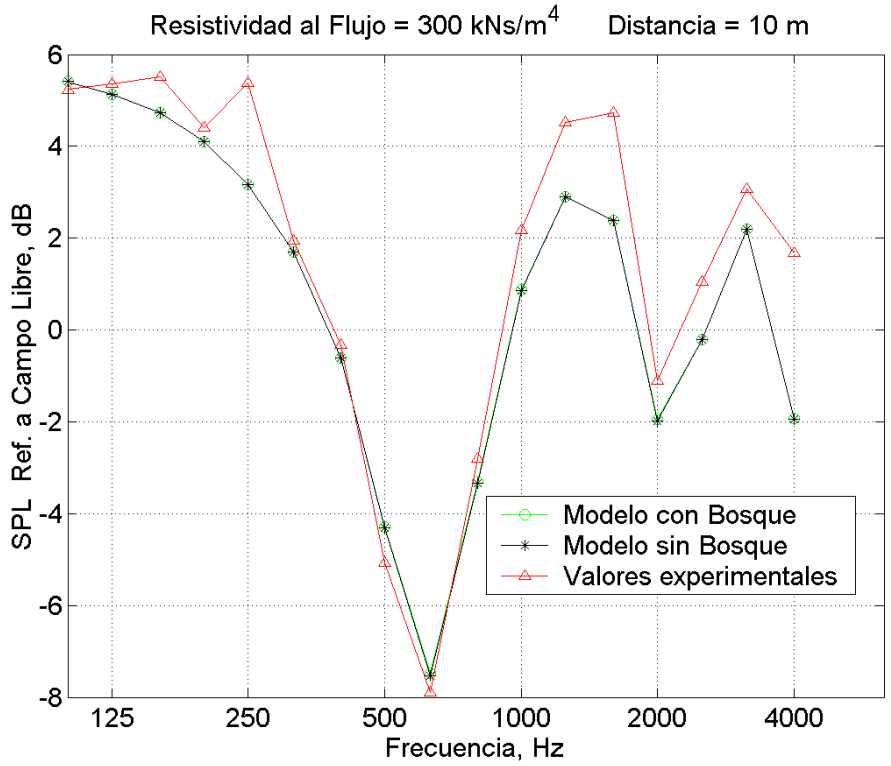
Uno de los casos en los que se presentan discrepancias grandes entre los valores predichos por el modelo con bosque y los datos experimentales para todas las frecuencias, y sobre todo en las altas, es el representado en la figura 7.4f, árboles sin hojas.

Figura 7.1: Medida transversal en una ***CHOPERA, árboles con hojas.*** *Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: verano, Temperatura = 24ºC; Humedad relativa = 30 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.27 m y Altura= 9 m. Densidad = 0.042 árboles/m^2, nQ = 0.01.*

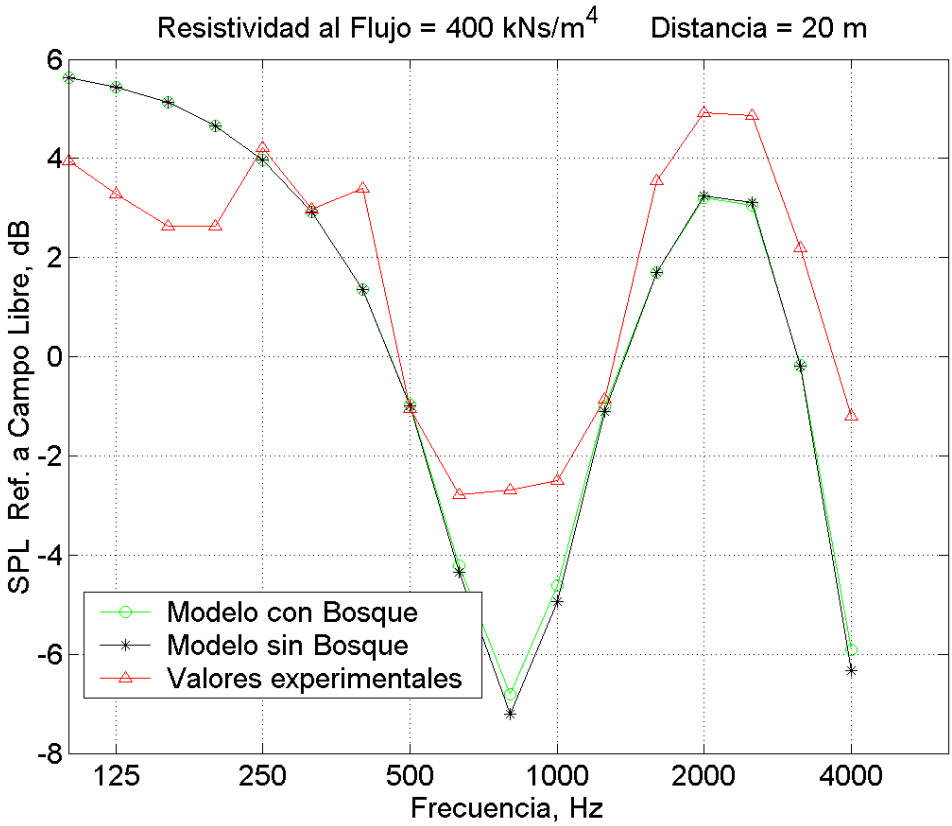
a)



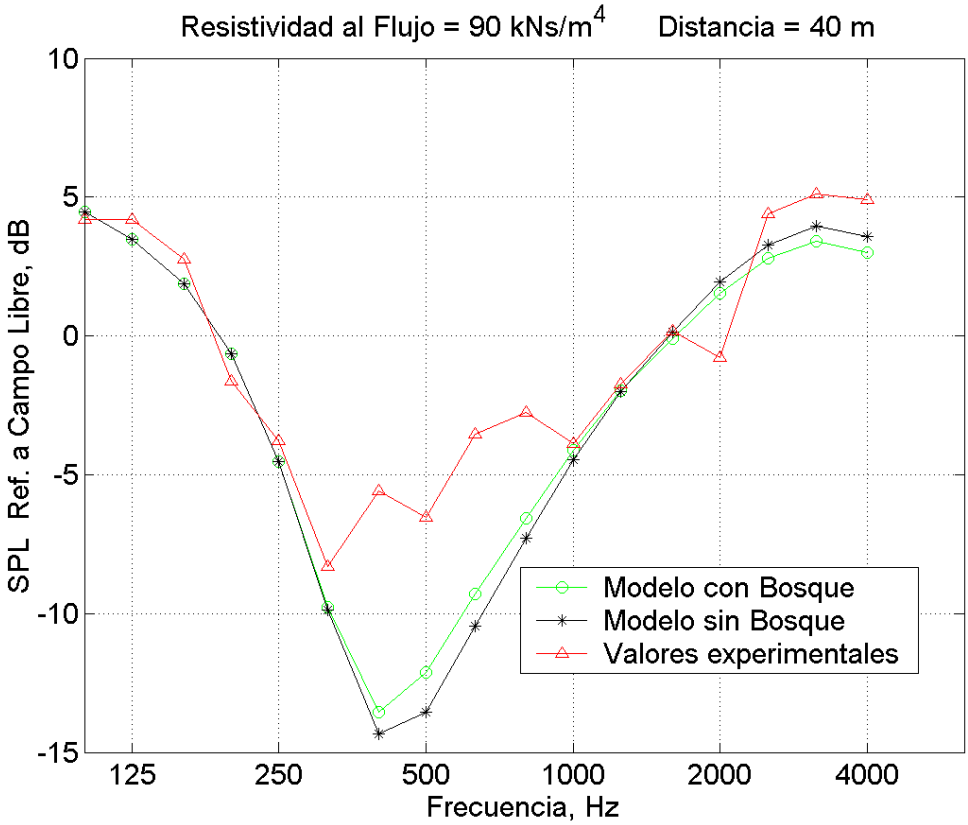
b)



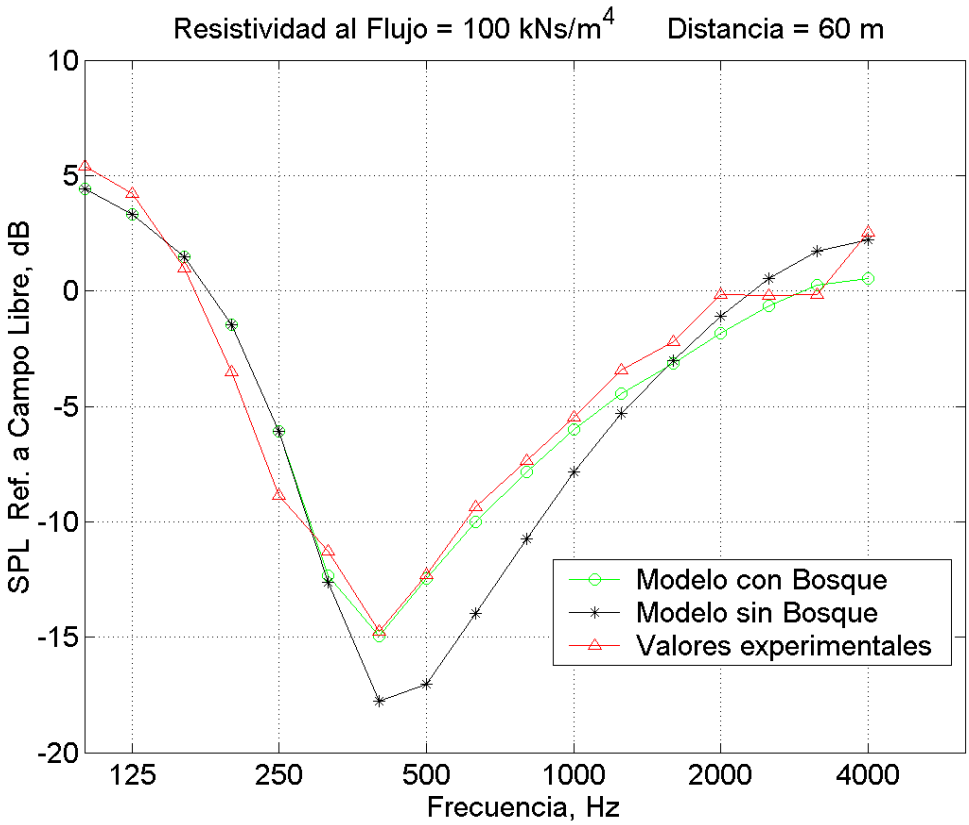
c)


Resistividad al Flujo = 400 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
125
250
500
1000
2000
4000

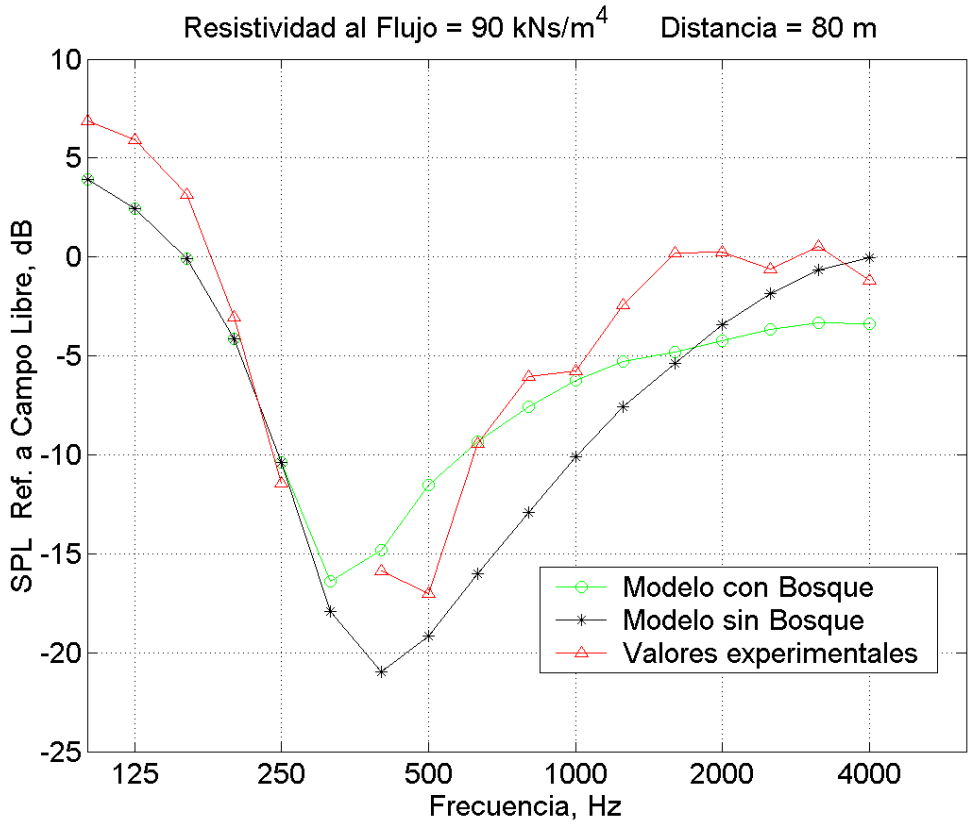
d)


Resistividad al Flujo = 90 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
10
5
0
-5
-10
-15
125
250
500
1000
2000
4000

e)


Resistividad al Flujo = 100 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)


Resistividad al Flujo = 90 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

g)

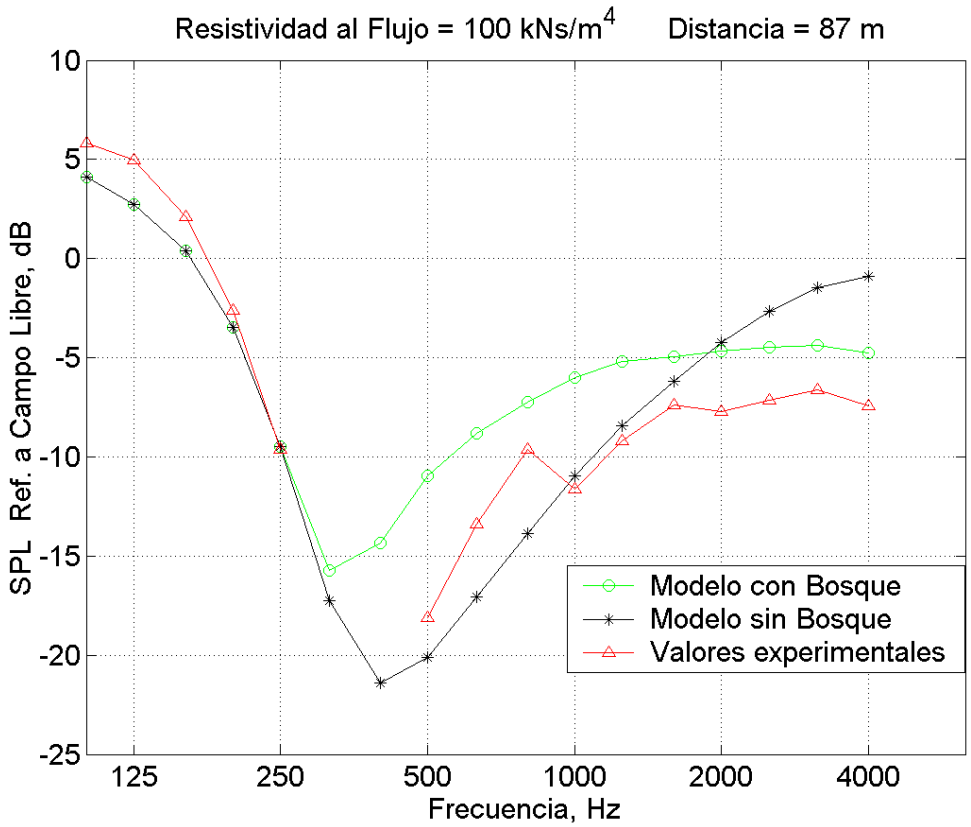
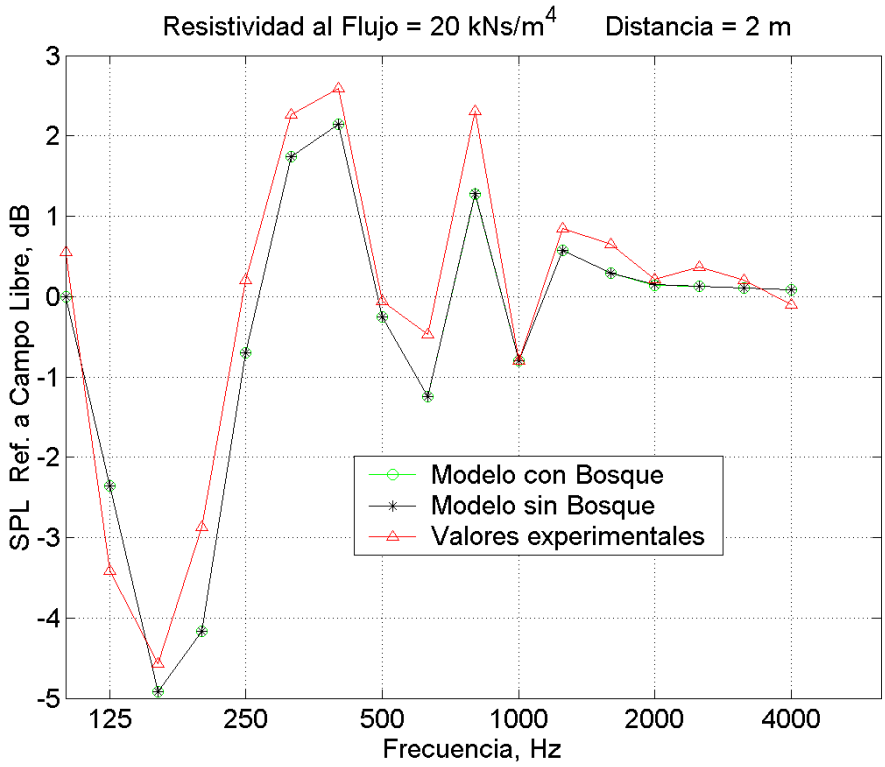
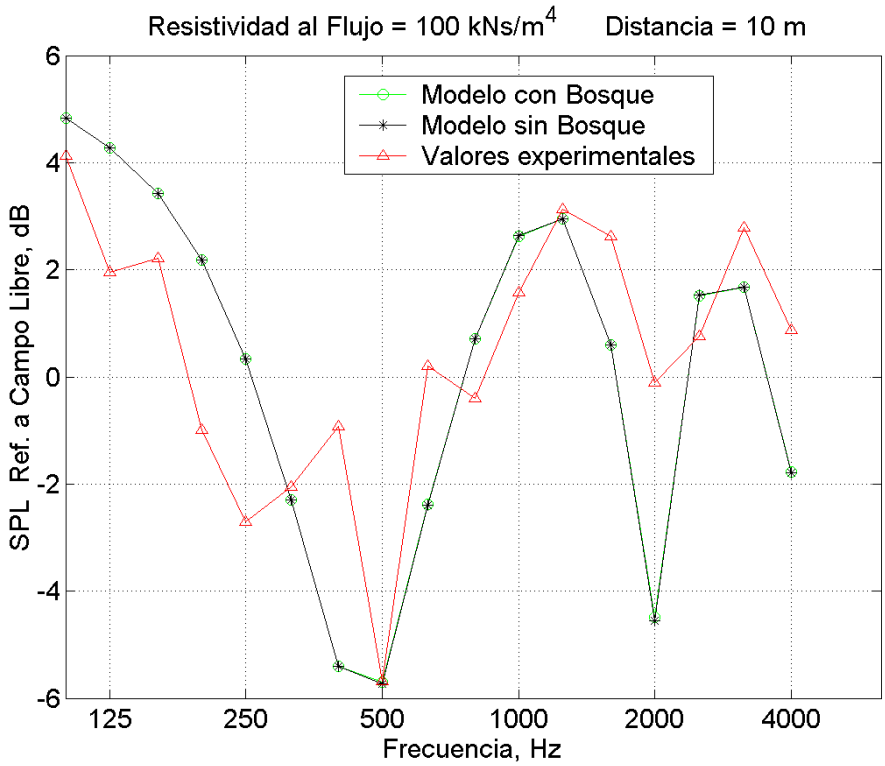

Resistividad al Flujo = 100 kNs/m4
Distancia = 87 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

*Figura 7.2: Medida longitudinal en una **CHOPERA, árboles con hojas**. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: verano, Temperatura = 24ºC; Humedad relativa = 30 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.27 m y Altura = 9 m. Densidad = 0.042 árboles/m^2, nQ = 0.01.*

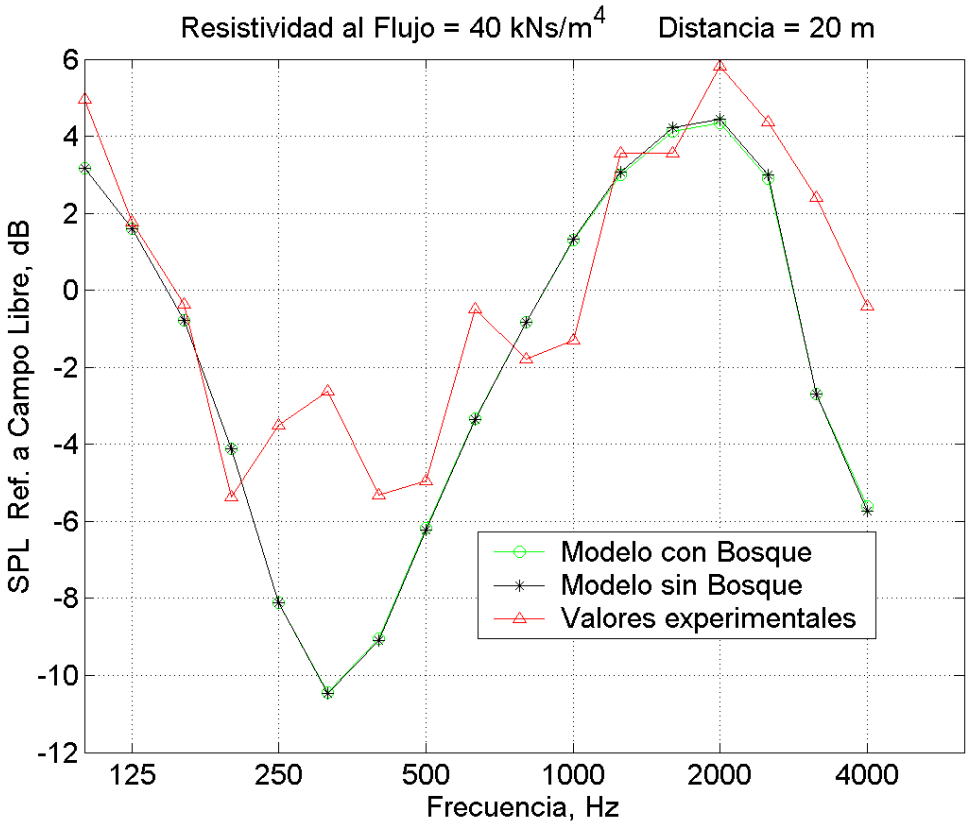
a)



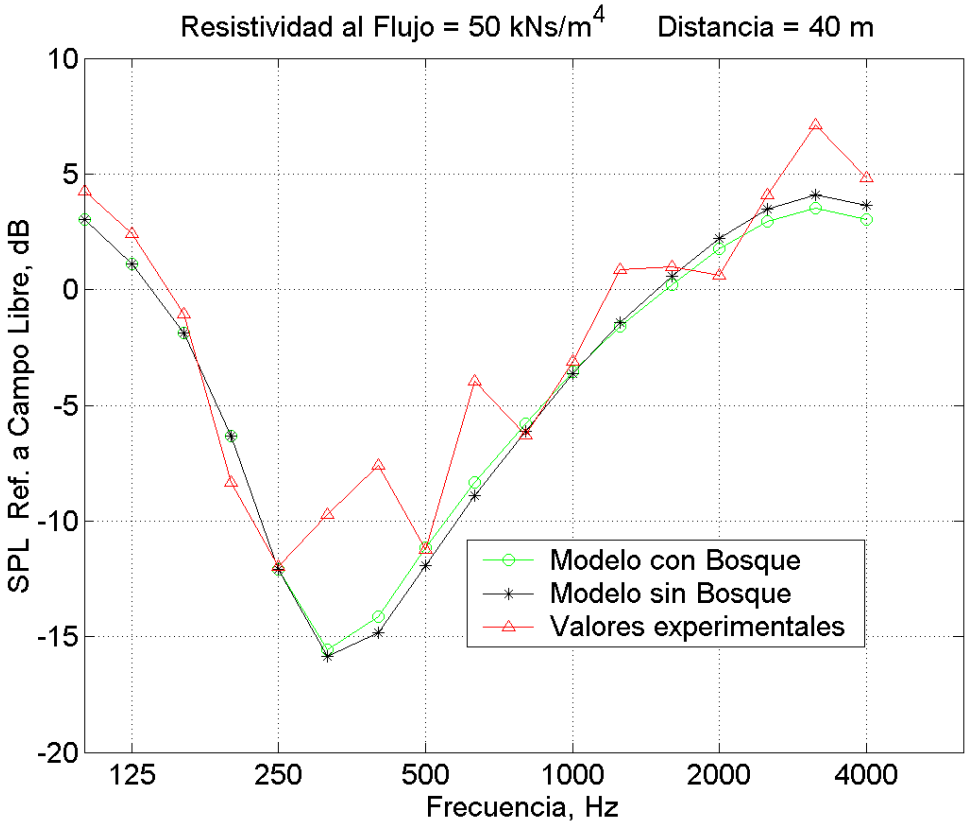
b)



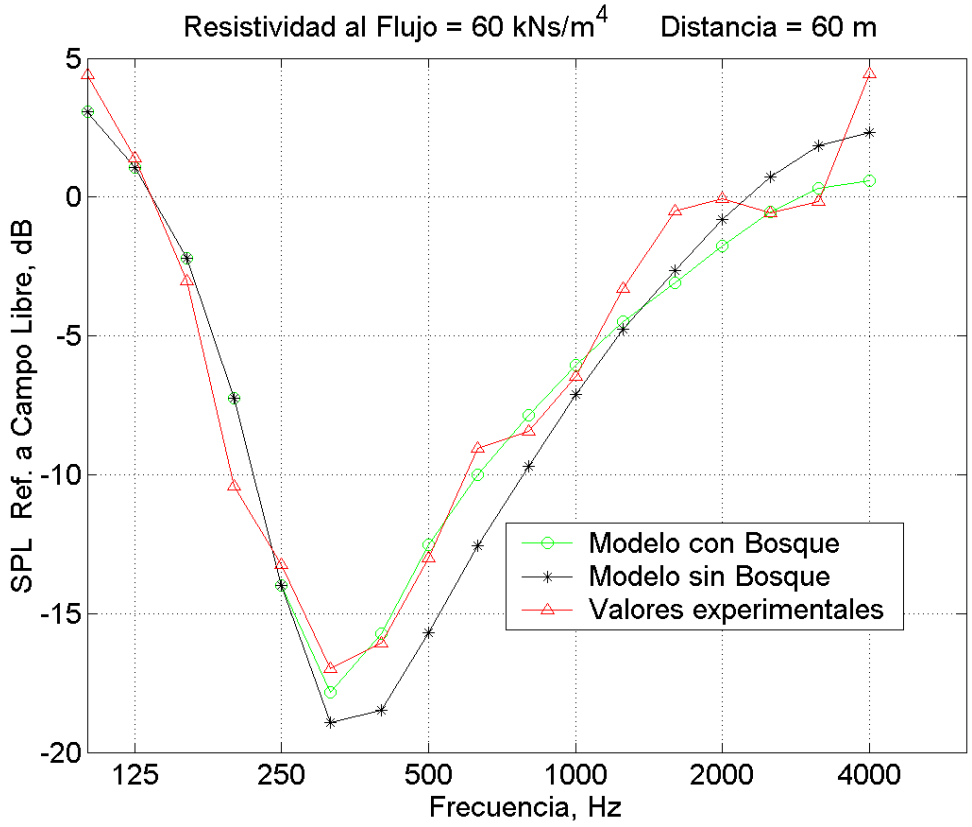
c)


Resistividad al Flujo = 40 kNs/m4 Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
125
250
500
1000
2000
4000

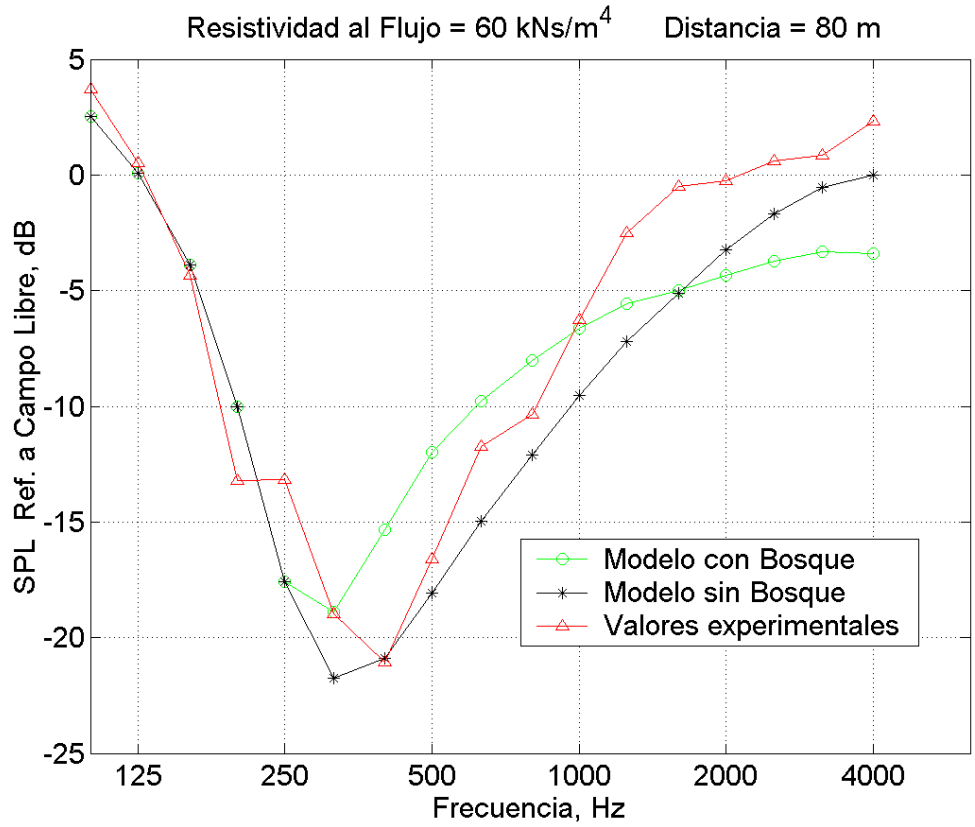
d)


Resistividad al Flujo = 50 kNs/m4 Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000

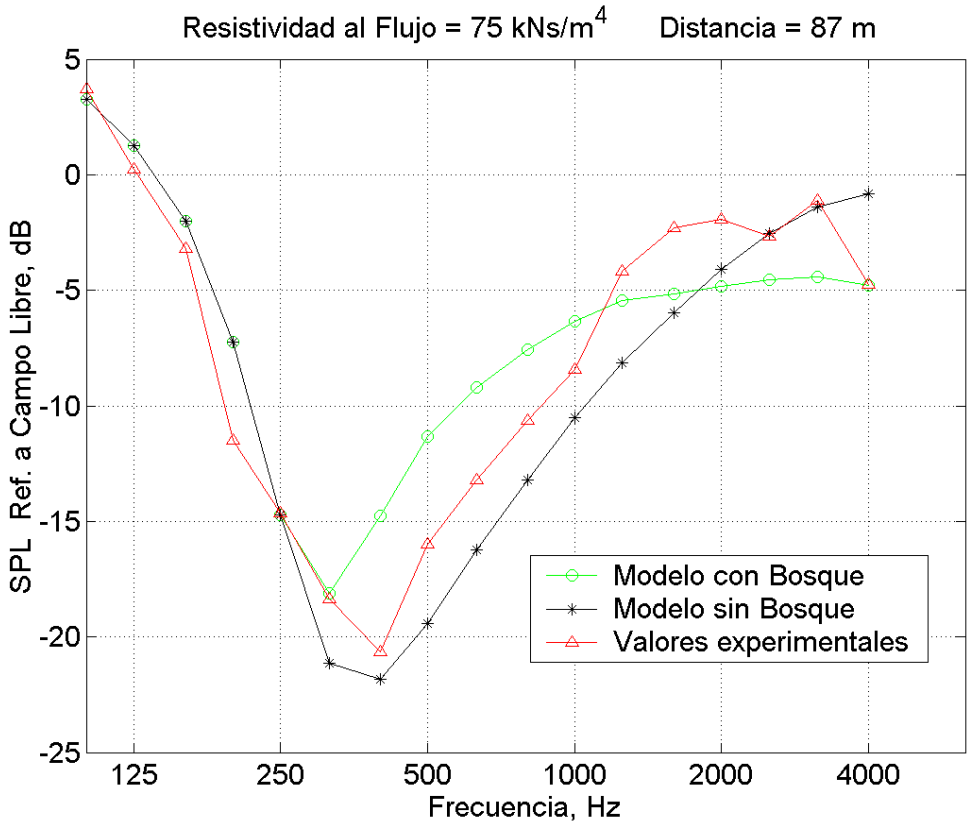
e)


Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)


Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

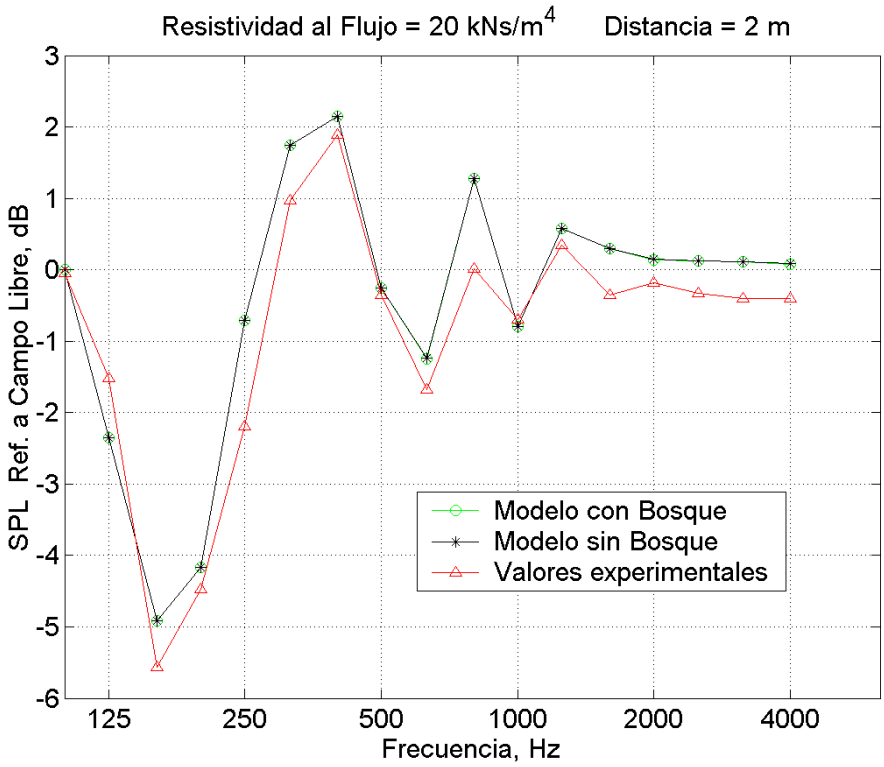
g)


Resistividad al Flujo = 75 kNs/m4
Distancia = 87 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

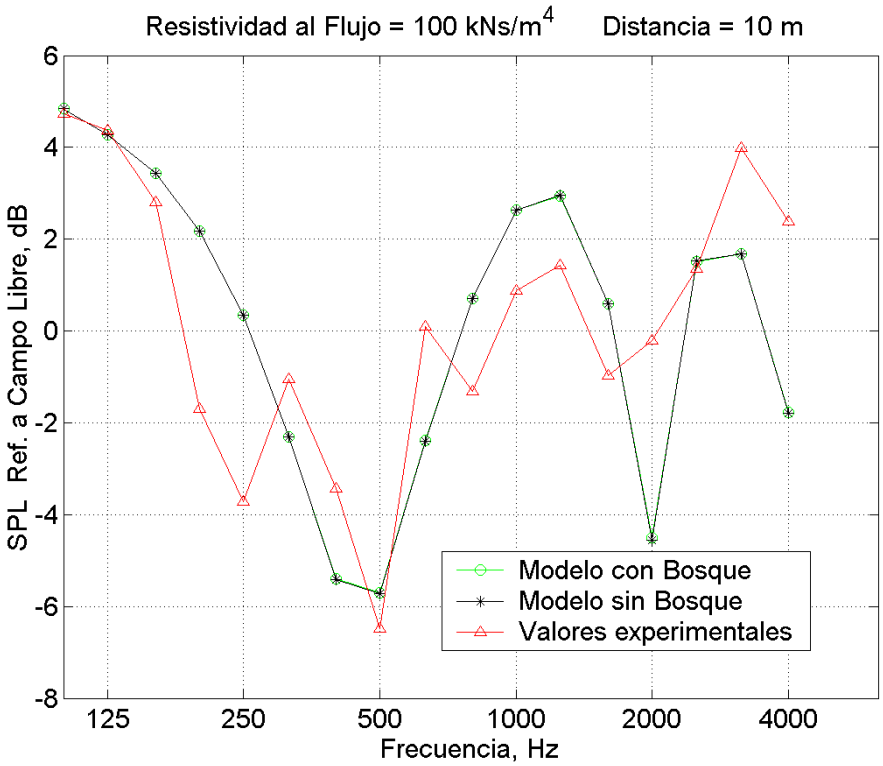
CERVANTES

Figura 7.3: Medida oblicua en una ***CHOPERA, árboles con hojas****. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: verano, Temperatura = 24ºC; Humedad relativa = 30 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.27 m y Altura = 9 m. Densidad = 0.042 árboles/m^2, nQ = 0.01.*

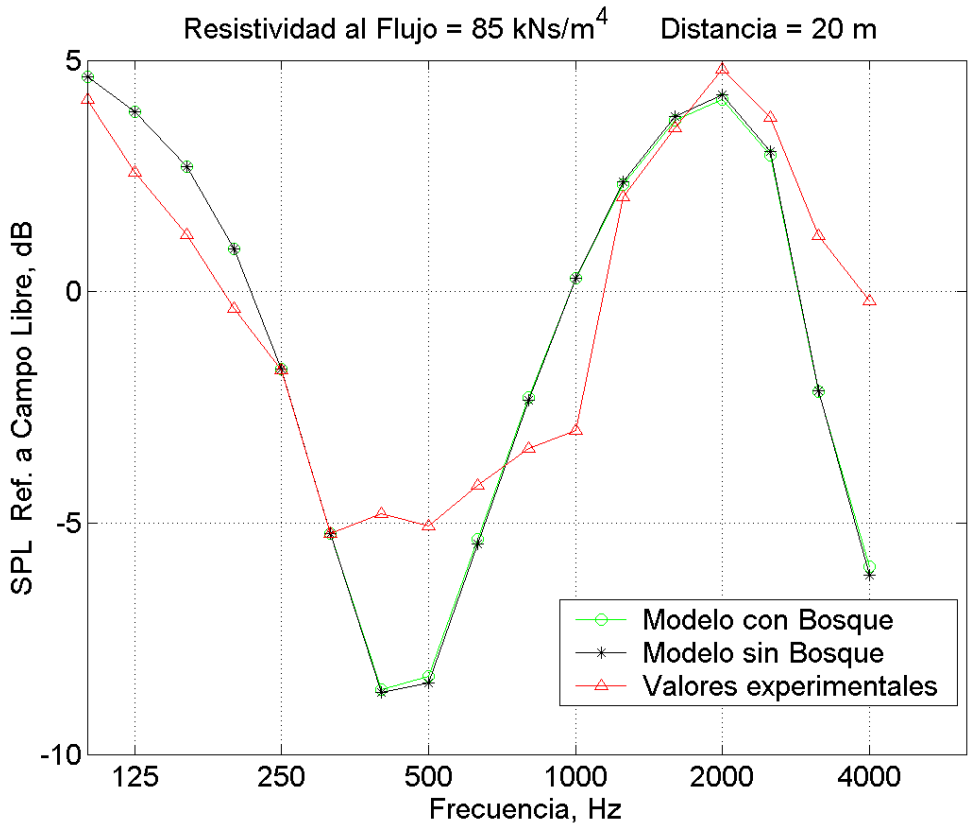
a)



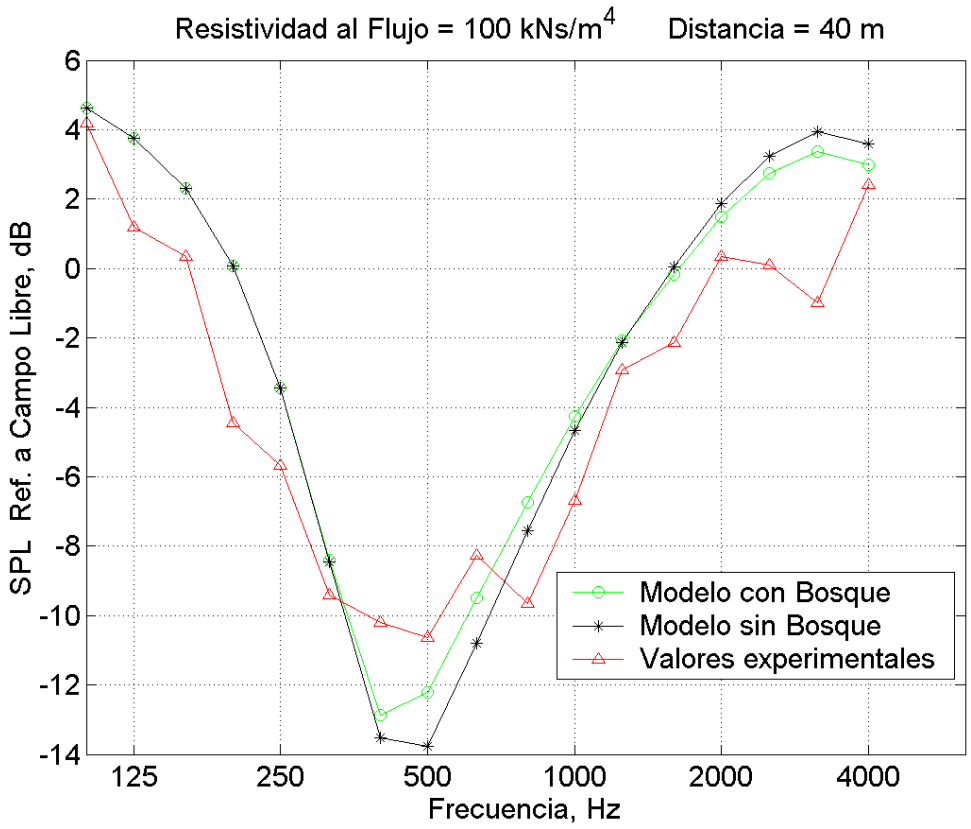
b)



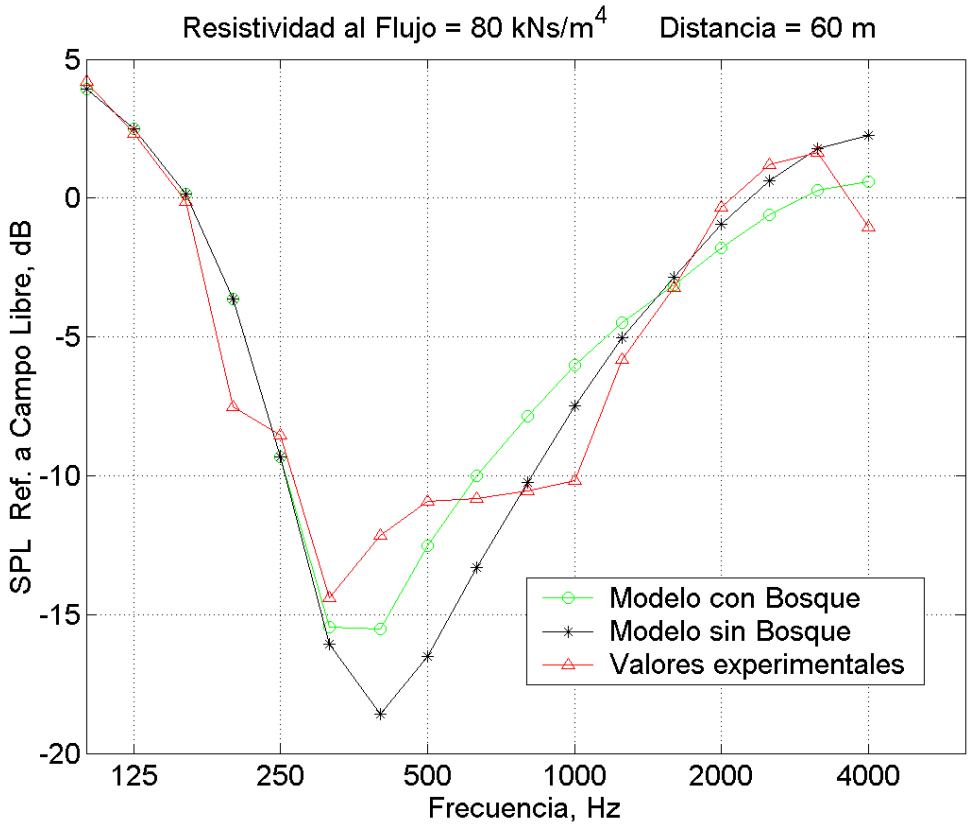
c)


Resistividad al Flujo = 85 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

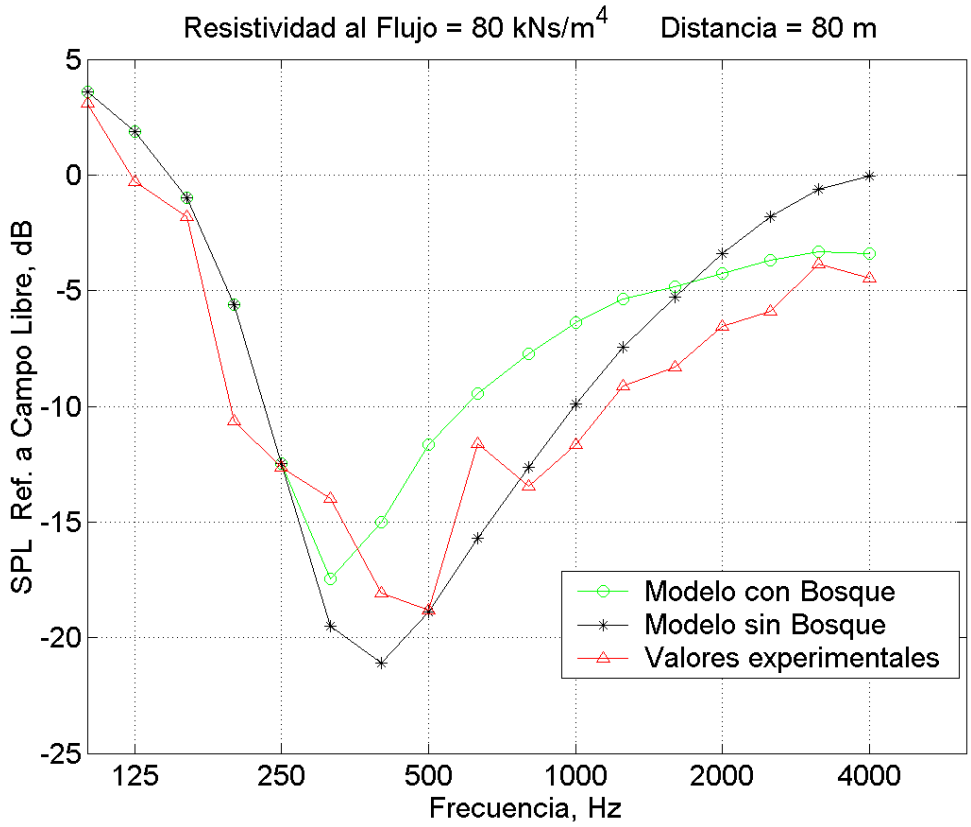
d)


Resistividad al Flujo = 100 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)


Resistividad al Flujo = 80 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)


Resistividad al Flujo = 80 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

g)

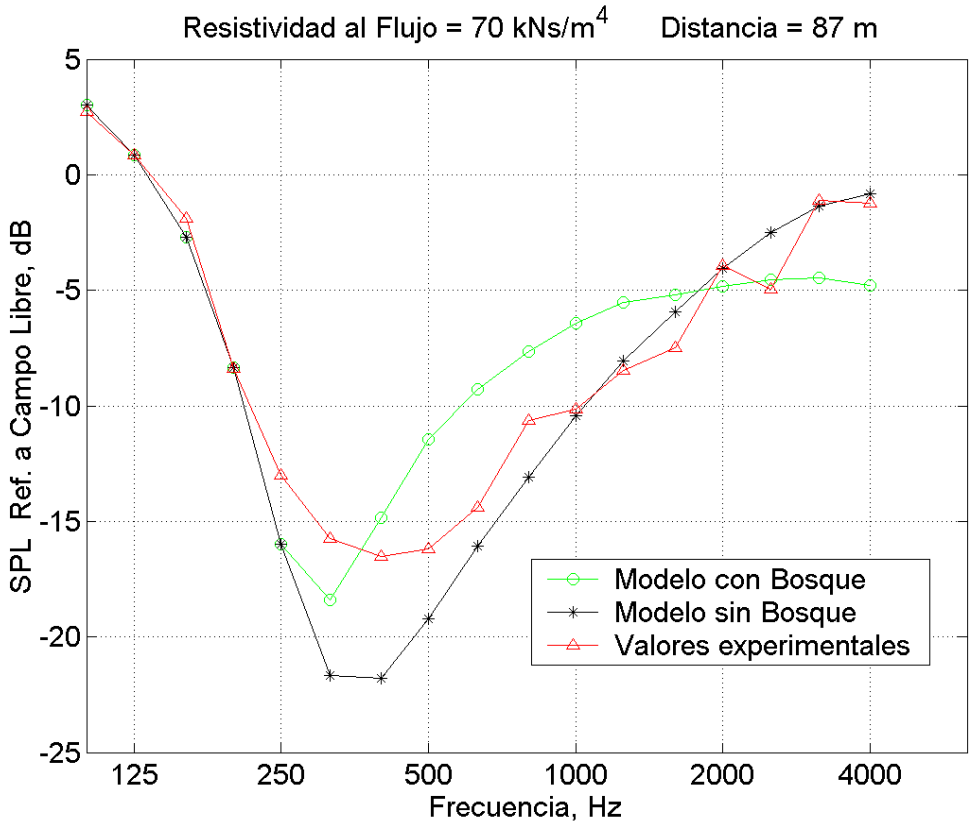
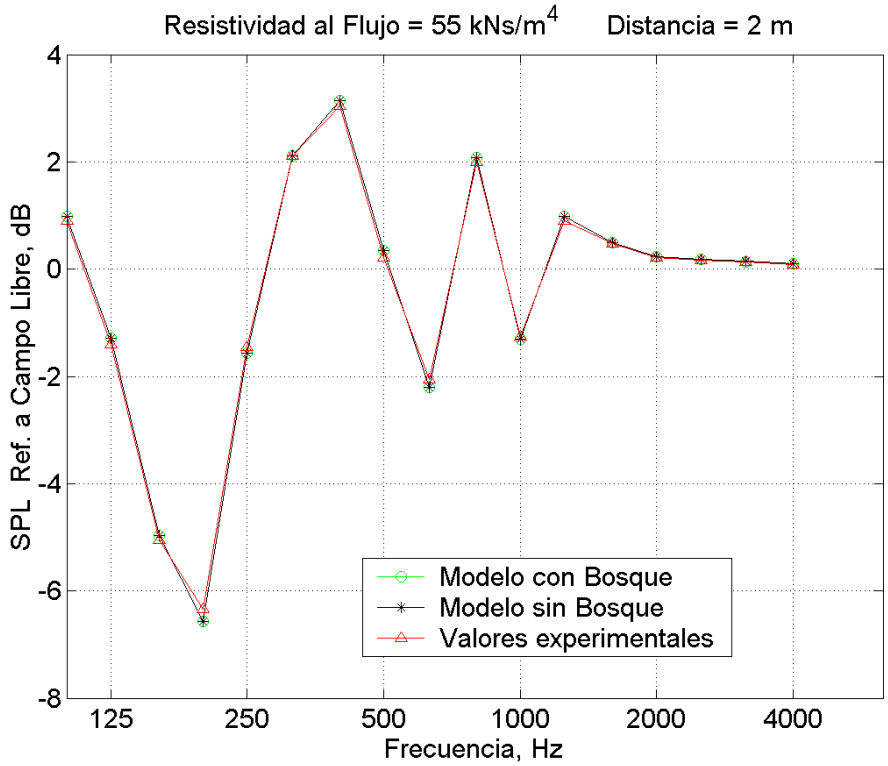
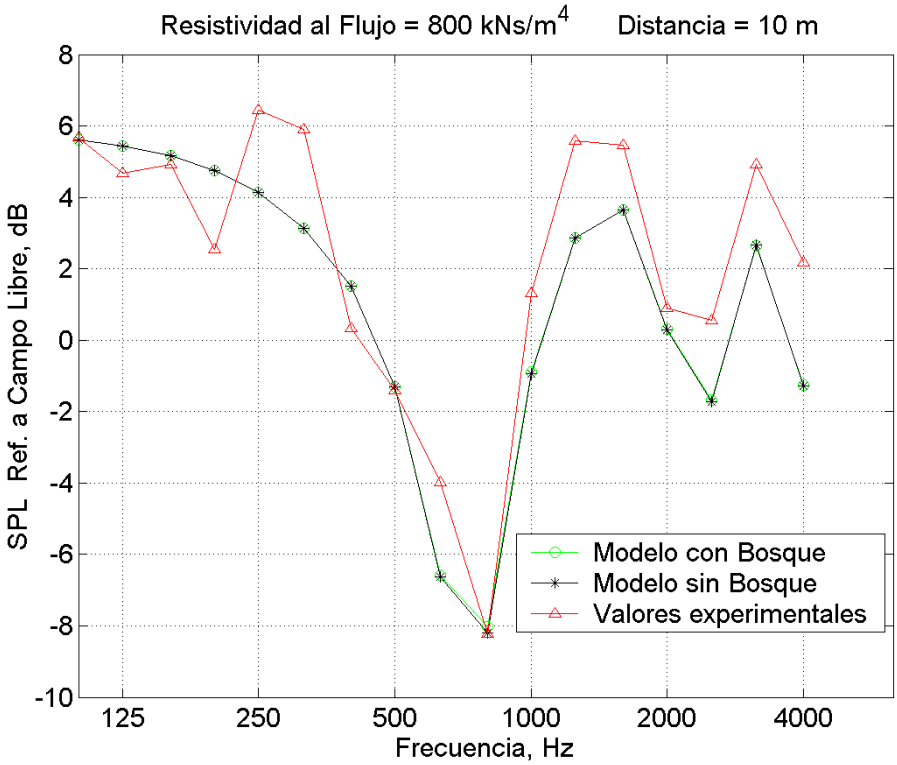

Resistividad al Flujo = 70 kNs/m4
Distancia = 87 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

Figura 7.4: Medida transversal en una ***CHOPERA, árboles sin hojas****. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: Invierno, Temperatura = 7ºC; Humedad relativa = 60 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.27 m y Altura = 9 m. Densidad = 0.042 árboles/m^2, nQ = 0.01.*

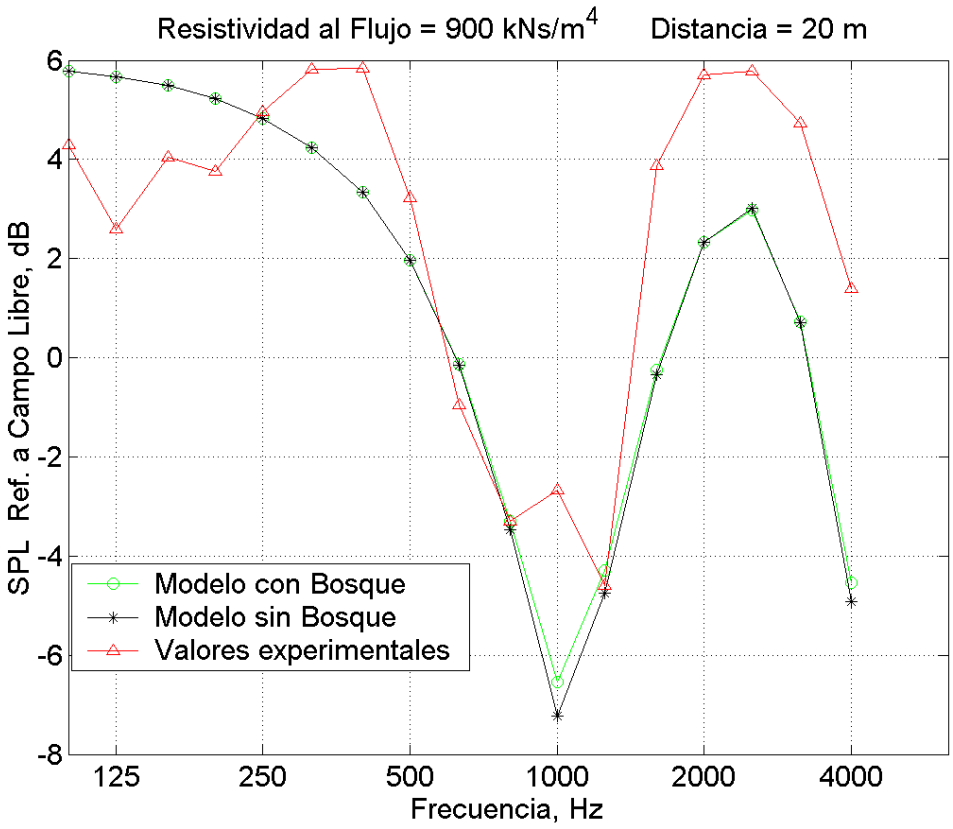
a)



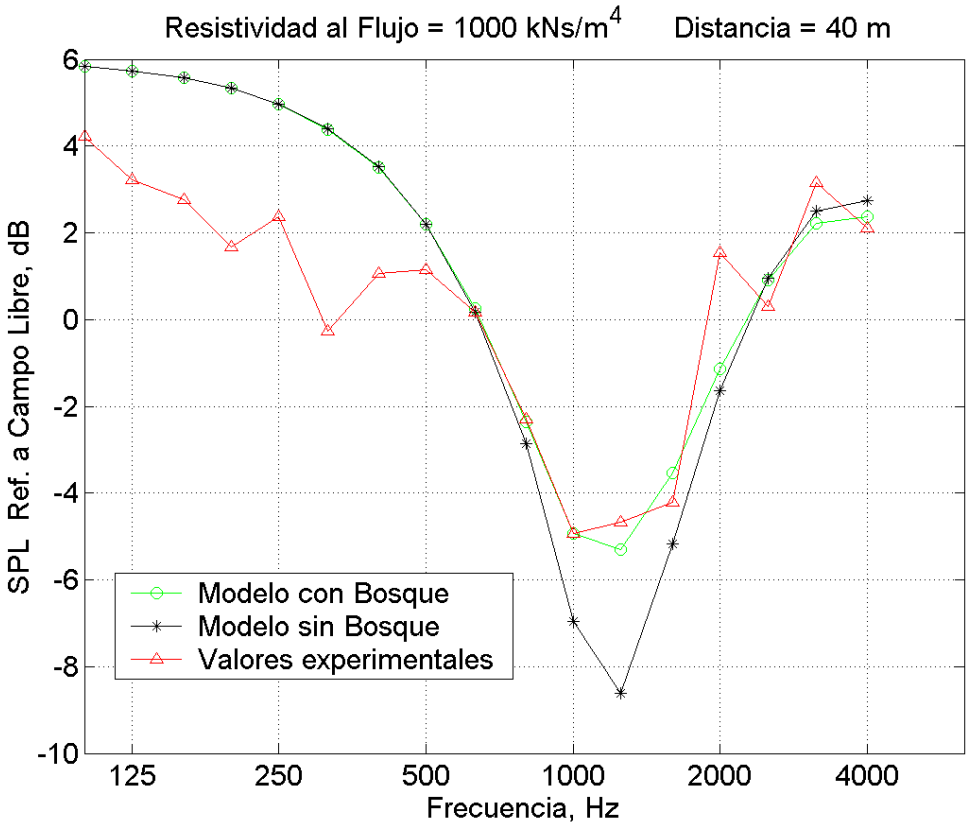
b)



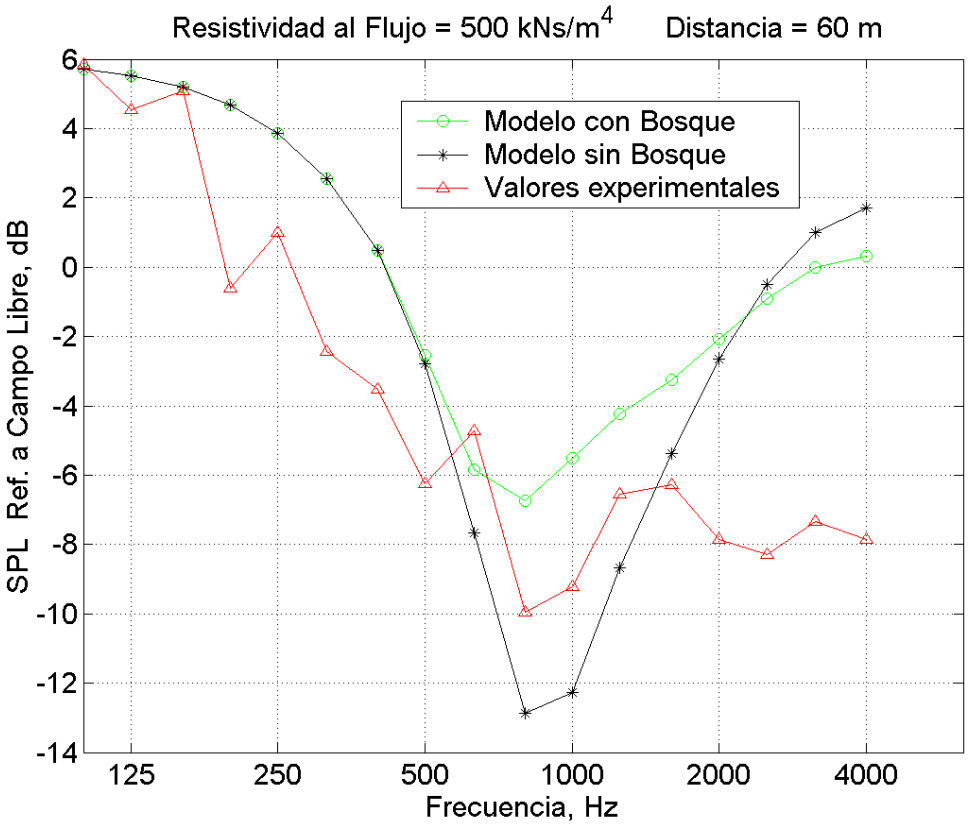
c)


Resistividad al Flujo = 900 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
125
250
500
1000
2000
4000

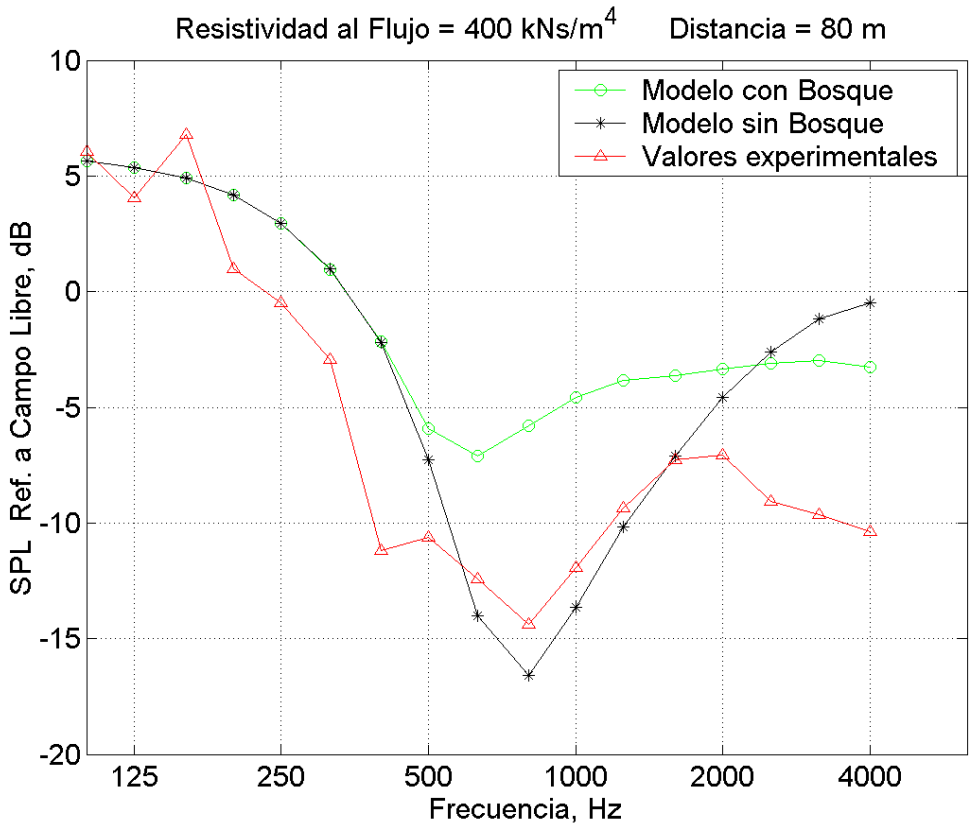
d)


Resistividad al Flujo = 1000 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
125
250
500
1000
2000
4000

e)


Resistividad al Flujo = 500 kNs/m4
Distancia = 60 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
125
250
500
1000
2000
4000

f)


Resistividad al Flujo = 400 kNs/m4
Distancia = 80 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000

7.4.1.2 - Bosque de catalpas

Este bosque fue plantado en una parcela rectangular de dimensiones 12.80 m por 100 m. Por el lado izquierdo limita con una plantación de fresnos y por el resto de los lados con caminos de acceso. Los árboles, de tres años de edad, estaban plantados en hileras separadas unas de otras 1,5 m y dentro de cada hilera, la distancia entre árboles era de 0.50 m. La densidad era de 1.33 árboles/m^2, el perímetro de los troncos variaba de unos a otros alrededor de 18 cm, con un diámetro medio de 0.057 m. La altura del tronco era de unos 3 m y la de la copa de 1m, es decir la altura total rondaba los 4 m. Sus hojas eran bastante grandes de unos 200 cm^2. El suelo era de tierra limpia, sin hierbas, blando, se removía al transitar por él, es una superficie que se riega con frecuencia. En este lugar se hicieron medidas del L_{eq} como en los casos anteriores con 3 configuraciones distintas:

1ª Configuración: Se colocaron 6 micrófonos a 2, 10, 20, 40, 60 y 80 m de la fuente, todos a una altura de 1,2 m. Los 5 primeros estaban unidos al analizador 2144 mediante un multiplexor y el último al 2260. El tiempo de medida en cada uno de los 5 primeros micrófonos fue de 36 segundos (6 pasadas por cada micrófono de 6 segundos cada una). La dirección fuente-receptor era paralela a las hileras de los árboles. Con esta configuración se realizó una medida en verano y otra en invierno.

2ª Configuración: A 40 m de la fuente se colocaron 3 micrófonos como receptores a tres alturas diferentes: 0.65, 1.35 y 2.7 m. La dirección fuente-receptor era paralela a las hileras de los árboles.

3ª Configuración: Este caso es similar al anterior, la distancia fuente-receptor también fue de 40 m y las alturas de los receptores fueron 0.65 y 1.35 m pero en este caso la dirección fuente receptor formaba un ángulo de 15 grados aproximadamente con la dirección de las hileras de los árboles.

Los resultados obtenidos para todas las distancias fuente-receptor se presentan en las gráficas de las figuras 7.5 y 7.6 para la primera configuración, y 7.7 y 7.8 para la segunda y la tercera respectivamente.

Del análisis comparativo de las figuras 7.5 y 7.6 puede decirse que:

A cortas distancias (2, 10 y 20 m) el modelo predice bien las frecuencias a las que se producen los máximos y los mínimos. A 20 m el modelo predice más atenuación que la que muestran los resultados experimentales. También a 20 m el modelo predice una ligerísima diferencia entre la ausencia o no de bosque.

A 40, 60 y 80 m el modelo predice valores distintos, según que contemple el bosque o no, a partir de 1600 Hz. Desde los 100 Hz hasta 1600 Hz los valores predichos están próximos a los experimentales. A partir de 1600 Hz los valores experimentales siempre están por encima de los predichos. Esto quiere decir que el modelo predice más atenuación que la obtenida experimentalmente, lo cual puede ser debido a que los efectos de dispersión del sonido por la presencia del bosque aumentan con la distancia y son importantes a frecuencias altas.

En este bosque se realizaron medidas en verano y en invierno, árboles con hojas y sin hojas, y los valores de la resistividad al flujo encontrados se muestran en la tabla 7.2. Excepto para la medida de 10 m, la resistividad al flujo en verano, está comprendida entre 30 y 60 KNs/m^4, y en invierno entre 250 y 600 KNs/m^4.

Esto pone de manifiesto una mayor impedancia en invierno. El motivo puede ser que después de una noche helada el suelo está más duro que en verano, con un suelo regado frecuentemente.

CATALPAS (valores de σ en kNs/m^4)		
Distancia	**Verano** (con hojas)	**Invierno** (sin hojas)
2	30	400
10	300	600
20	50	600
40	60	250
60	35	250
80	60	300

Tabla 7.2: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias (m) fuente-receptor.

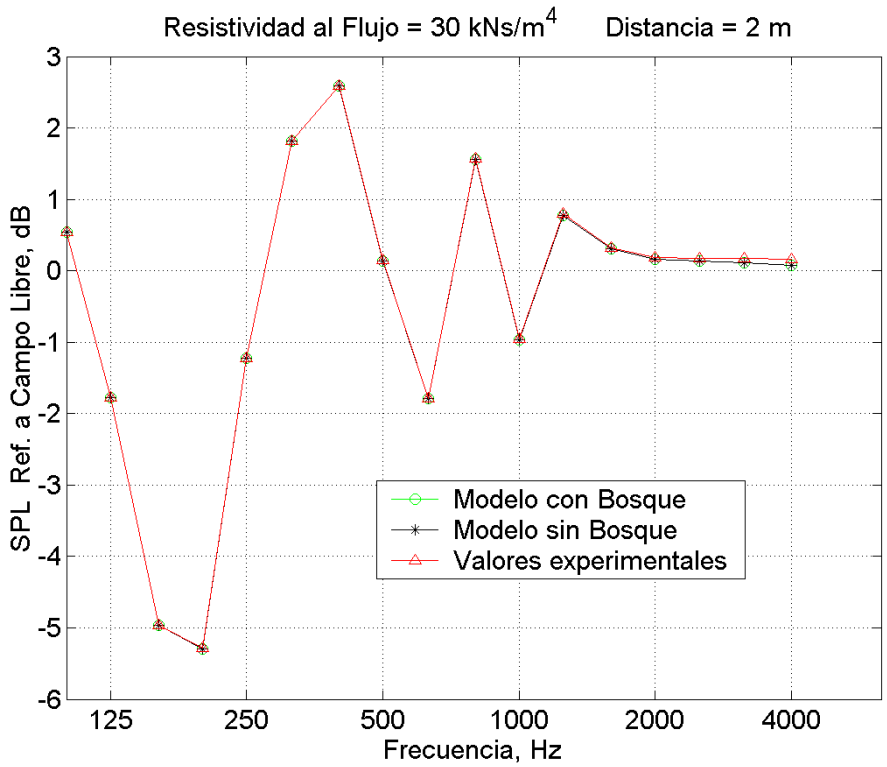
Para la configuración 2, manteniendo la distancia fuente-receptor constante e igual a 40 m, se midió para tres alturas del micrófono receptor, h=0.65, h =1.25 y h = 2.7 m, los resultados se muestran en la figura 7.7. A frecuencias altas los valores experimentales son más altos que los valores teóricos para las dos primeras alturas. En estos dos casos el acuerdo entre los resultados teóricos y experimentales es mucho mejor que para h =2.7 m, donde las diferencias son grandes para todas las frecuencias. Del análisis de las gráficas de la figura 7.7 puede decirse que el modelo predice mayor atenuación cuanto menor sea la altura, resultado que también se comprobó en el capítulo 5. El SPL ref a campo libre en el mínimo, predicho por el modelo, en el caso de h=0.65 m es unos 5 dB menor que para h=1.25 m y unos 10 dB menor que para h =2.7 m.

Para la configuración 3 se ha medido también a dos alturas del receptor, h= 0.65 y 1.25 m a una distancia de 40 m de la fuente pero en este caso la dirección fuente-receptor formaba un ángulo de unos 15 grados con la línea de los árboles. Los resultados se representan en la figura 7.8. Para ambas alturas los niveles de presión sonora medidos son mucho más bajos que los predichos por el modelo a frecuencias altas. La sorprendente atenuación a frecuencias altas podría ser debido a las hojas, que son completamente ignoradas en el modelo, ya que al elevar el receptor este está mas cerca de la copa del árbol. También en este caso la atenuación es mayor cuanto menor es la altura.

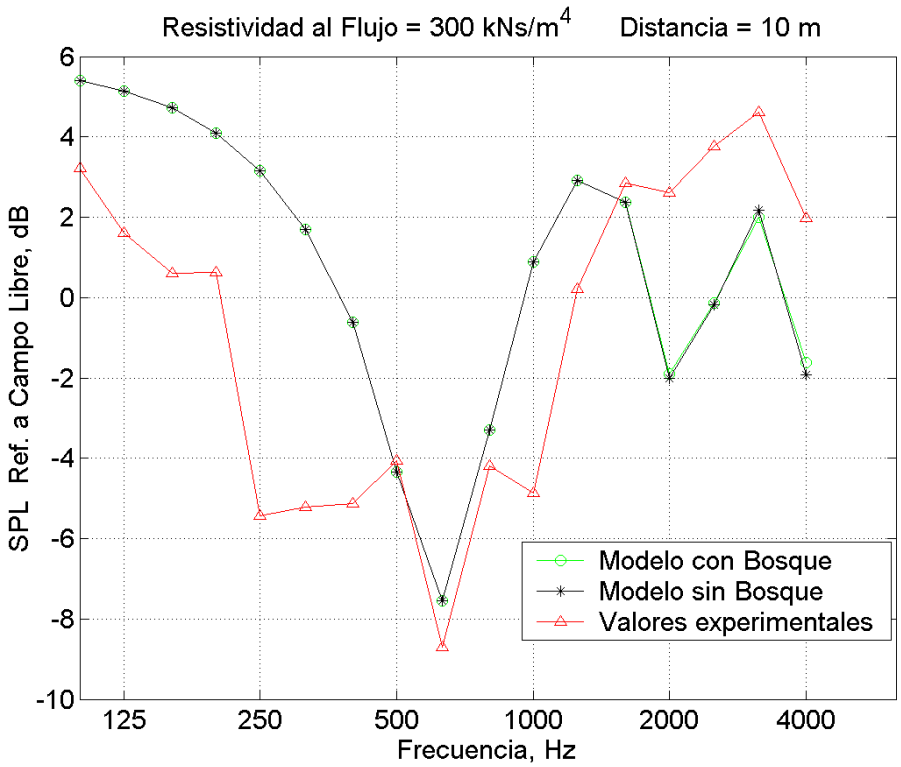
Si comparamos los resultados de la figura 8b con los de la 7b (la única diferencia en el proceso de medida entre ambas es cambiar la dirección fuente – receptor) vemos que los resultados experimentales obtenidos son muy distintos. Mientras en la figura 7b los valores experimentales para frecuencias altas están por encima de los predichos, en la figura 8b están muy por debajo. En ambos casos la resistividad al flujo es casi similar. Este resultado puede ser debido a que al variar la dirección fuente-receptor los troncos “bloqueen” en parte la propagación del sonido.

Figura 7.5: Medidas en un ***bosque de CATALPAS, árboles con hojas****. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: Verano, Temperatura = 23ºC; Humedad relativa = 40 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.057 m y Altura = 4 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2, nQ = 0.08.* ***1ª Configuración***

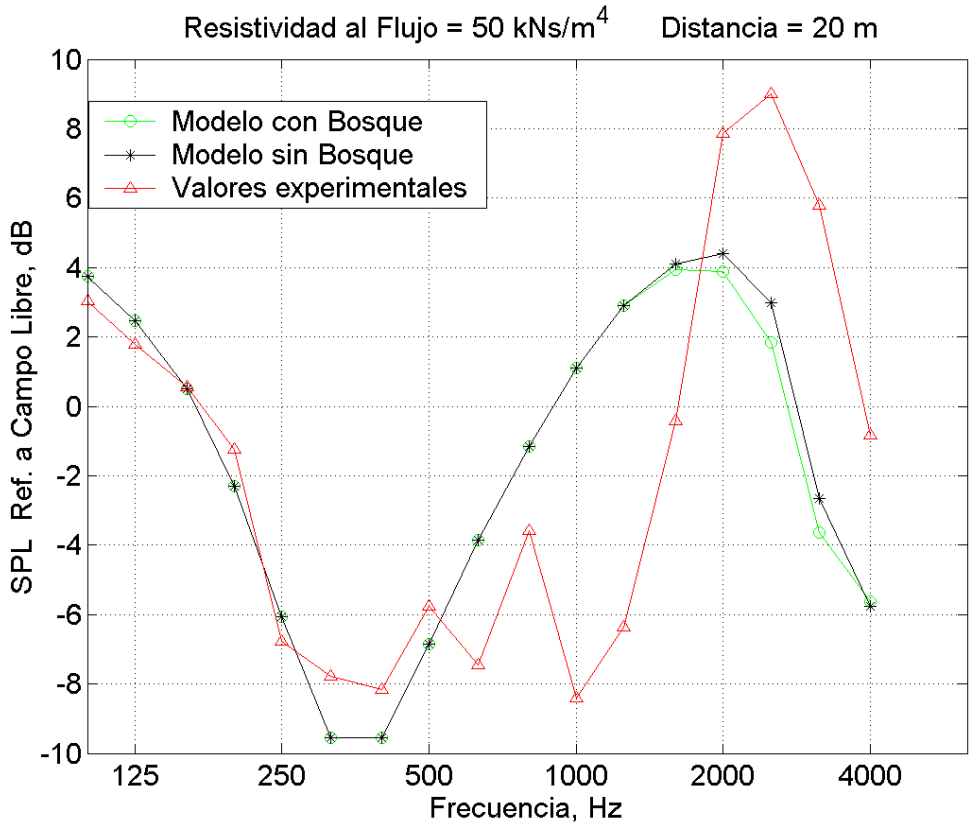
a)



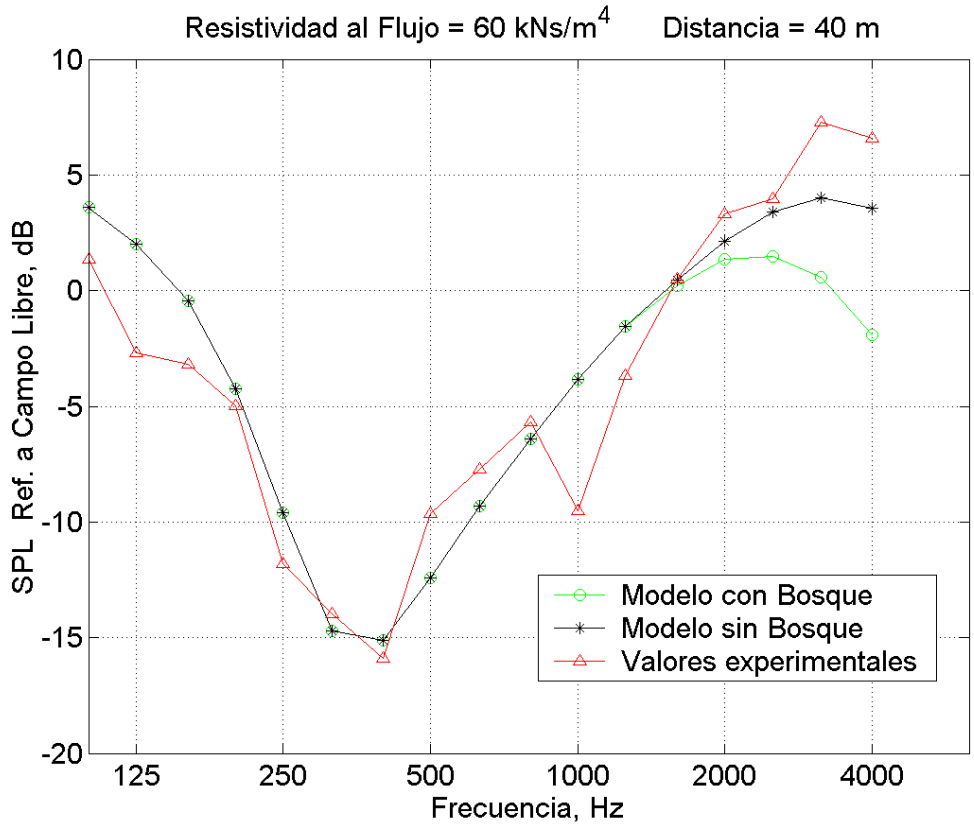
b)



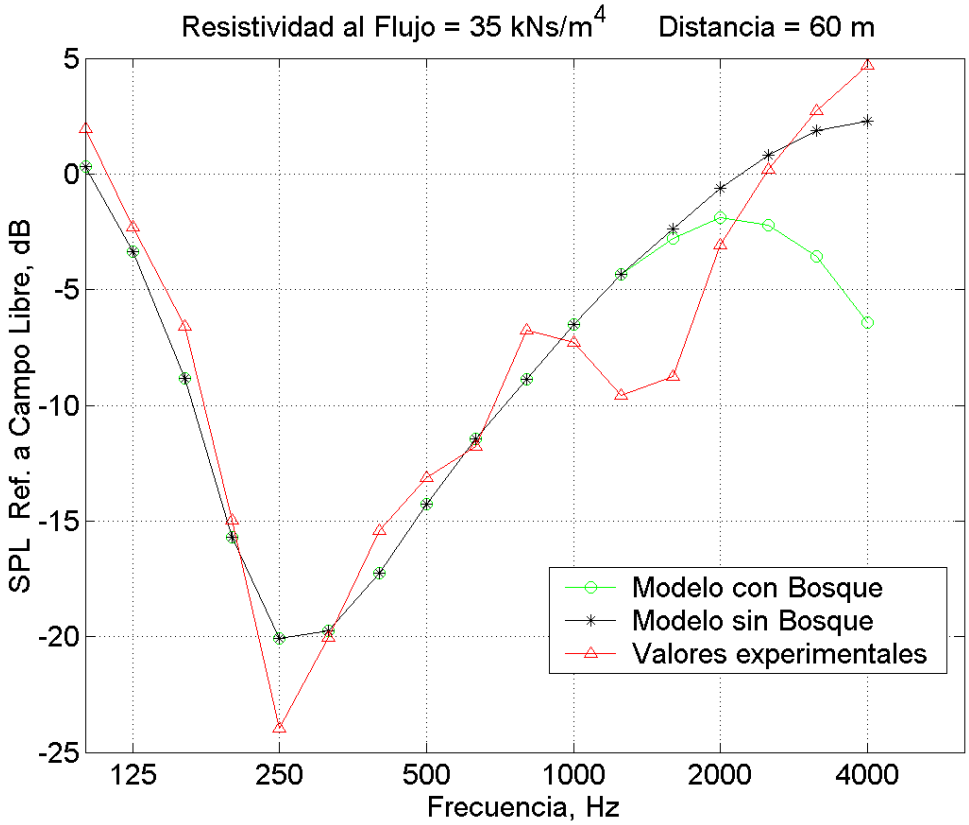
c)


Resistividad al Flujo = 50 kNs/m4
Distancia = 20 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
125
250
500
1000
2000
4000

d)


Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4
Distancia = 40 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000

e)


Resistividad al Flujo = 35 kNs/m4 Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)

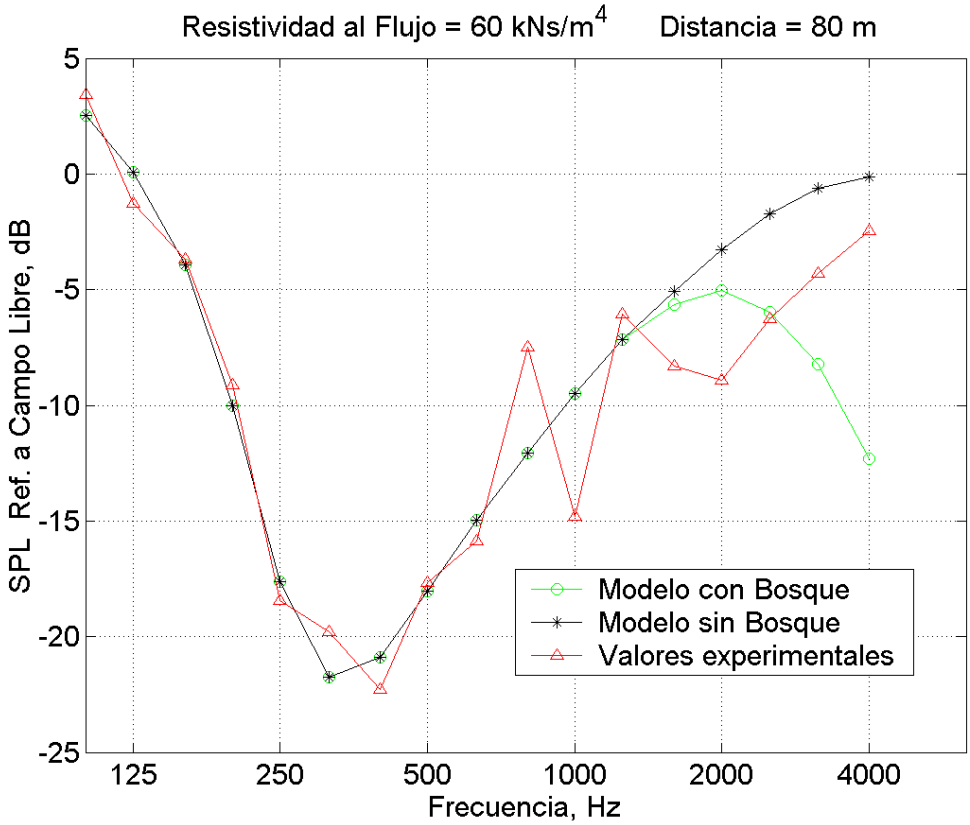
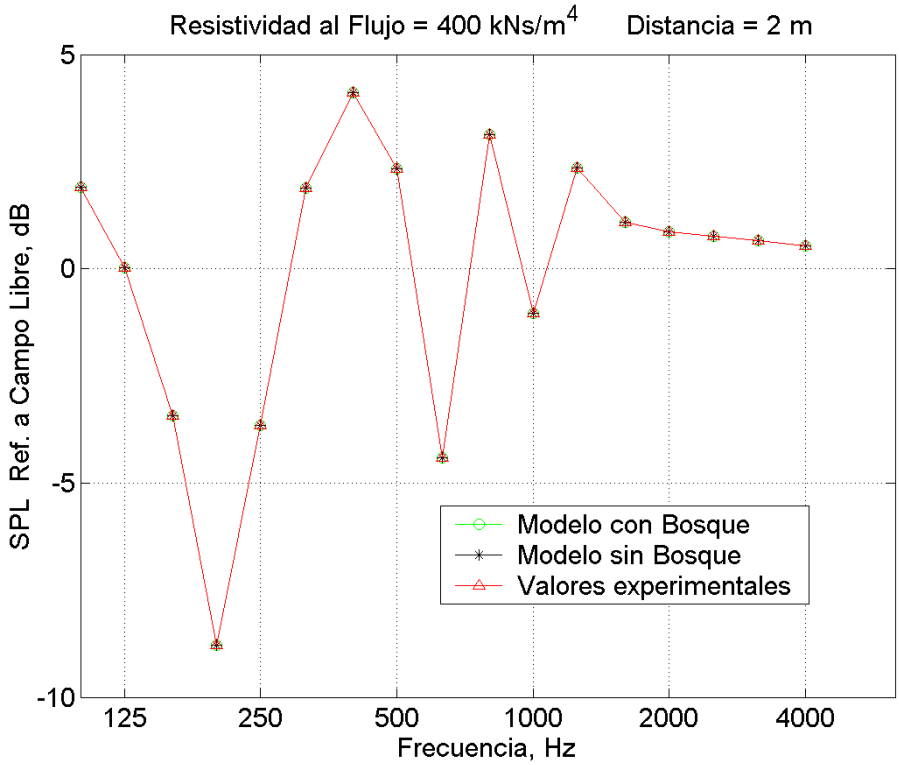
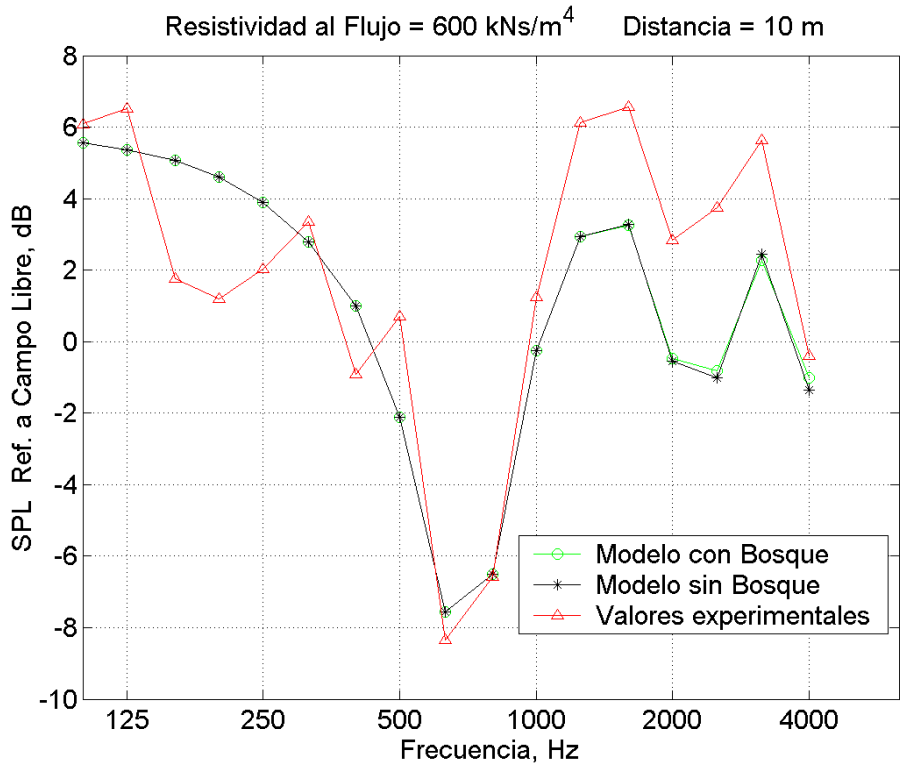

Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4 Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

Figura 7.6: Medidas en un ***bosque de CATALPAS, árboles sin hojas****. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: Invierno, , Temperatura = 7ºC; Humedad relativa =64 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.057 m y Altura = 4 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2, nQ = 0.08.* ***1ª Configuración***

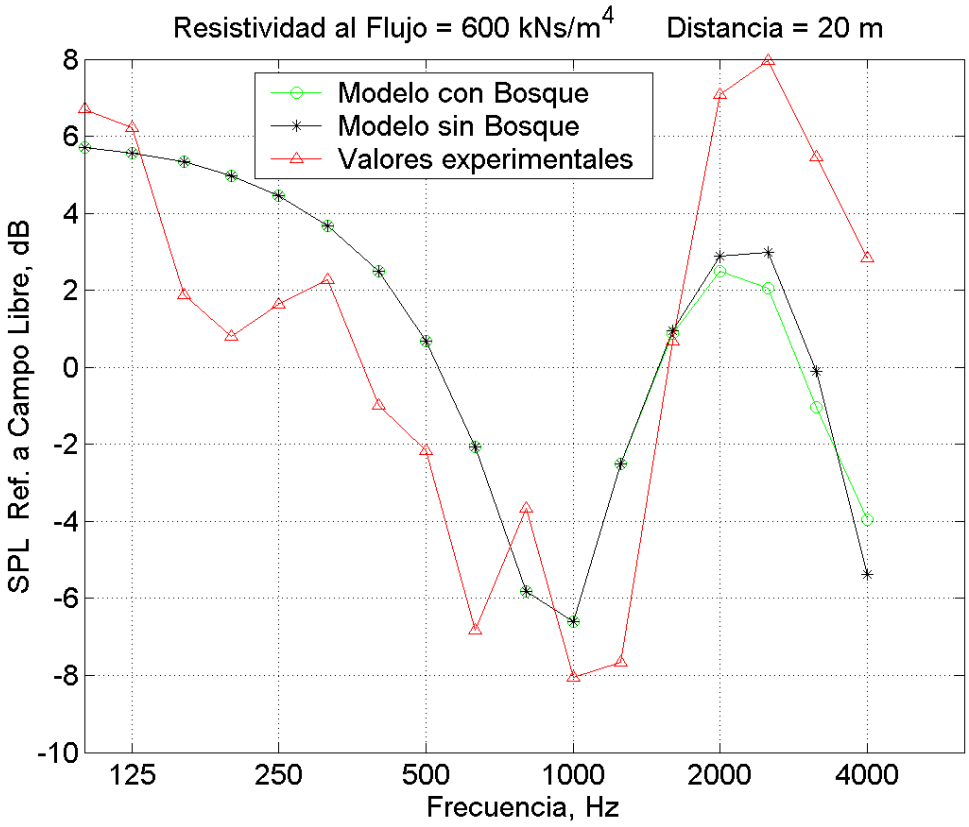
a)



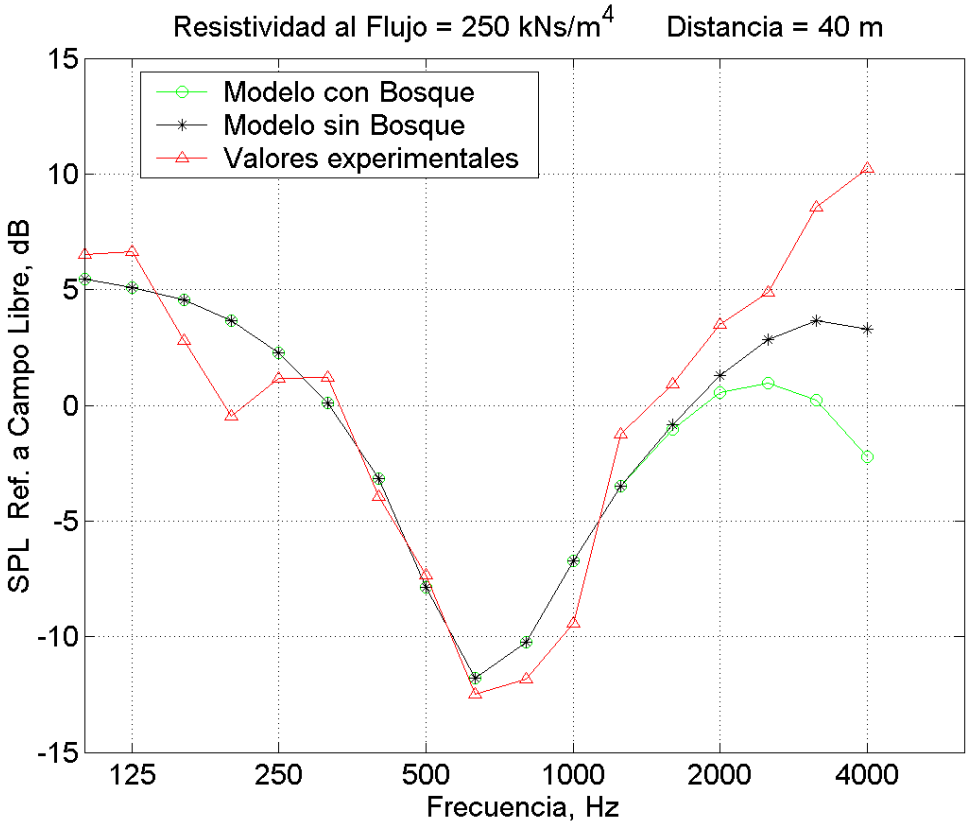
b)



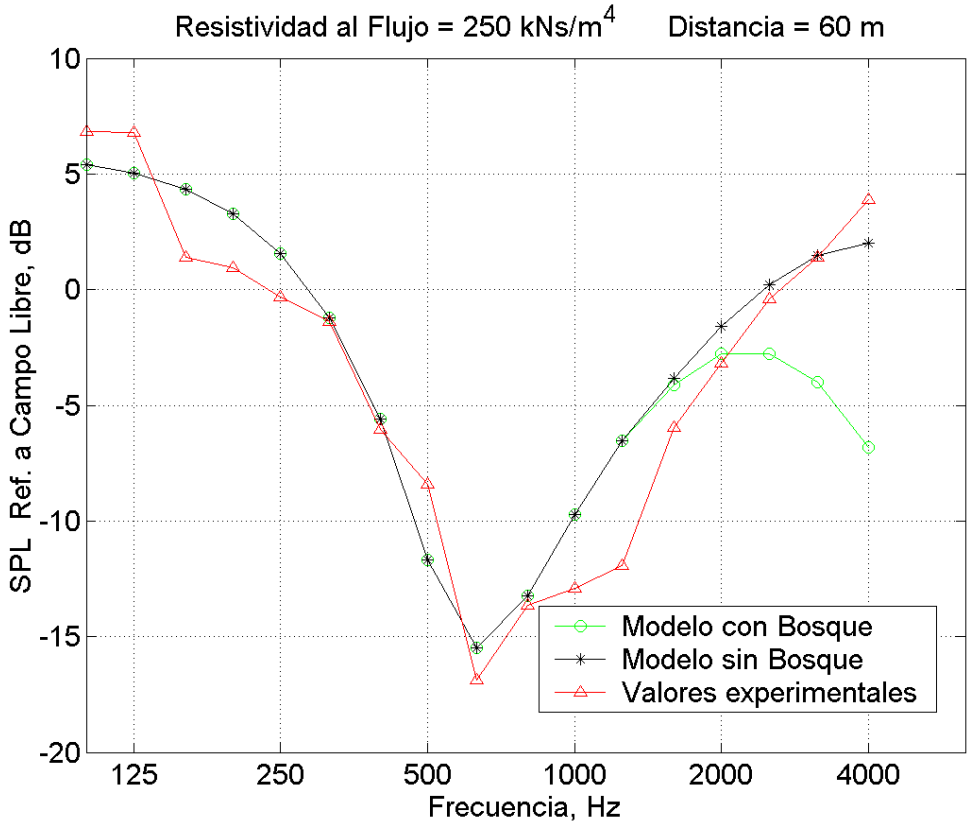
c)


Resistividad al Flujo = 600 kNs/m4
Distancia = 20 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
125
250
500
1000
2000
4000

d)


Resistividad al Flujo = 250 kNs/m4
Distancia = 40 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
15
10
5
0
-5
-10
-15
125
250
500
1000
2000
4000

e)


Resistividad al Flujo = 250 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)

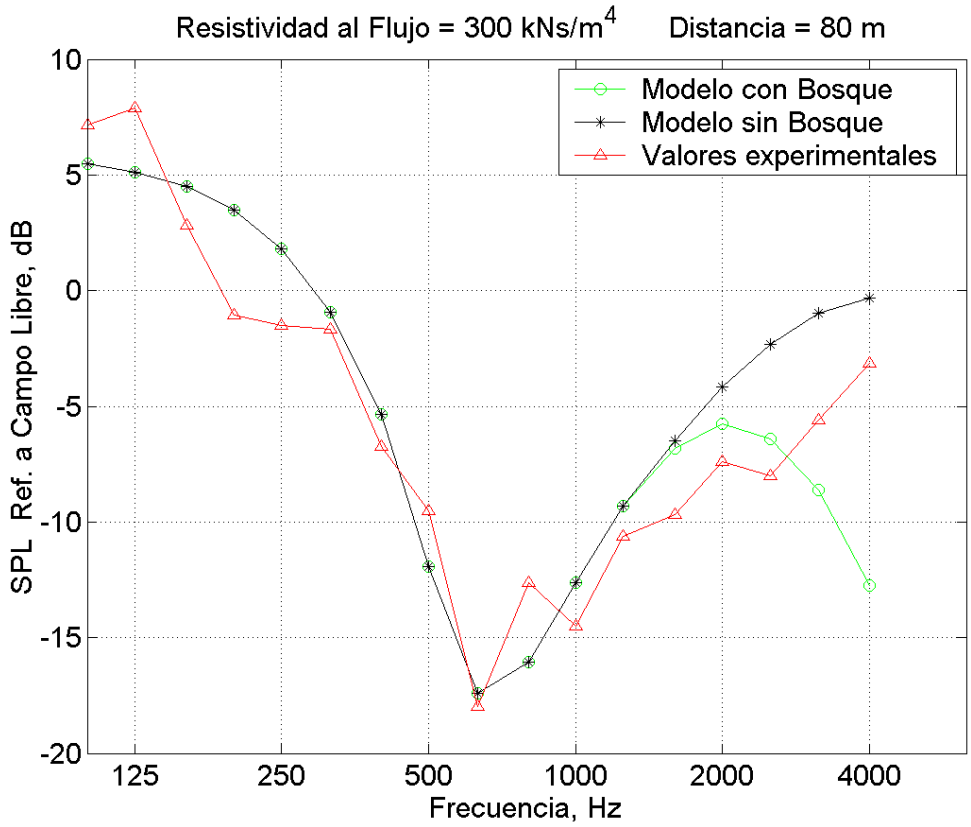
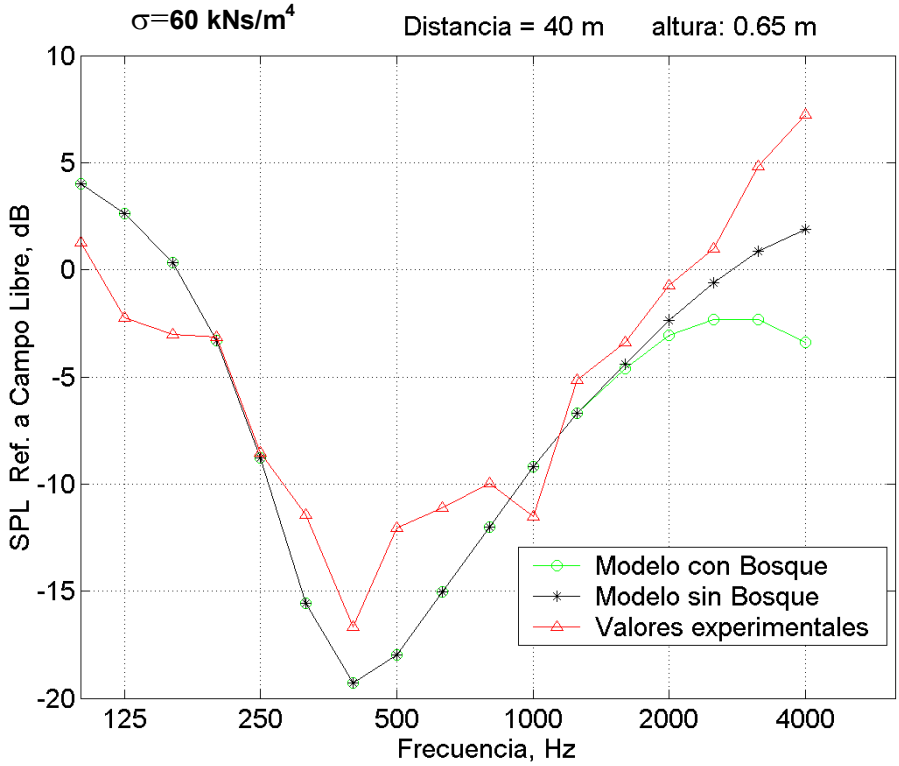
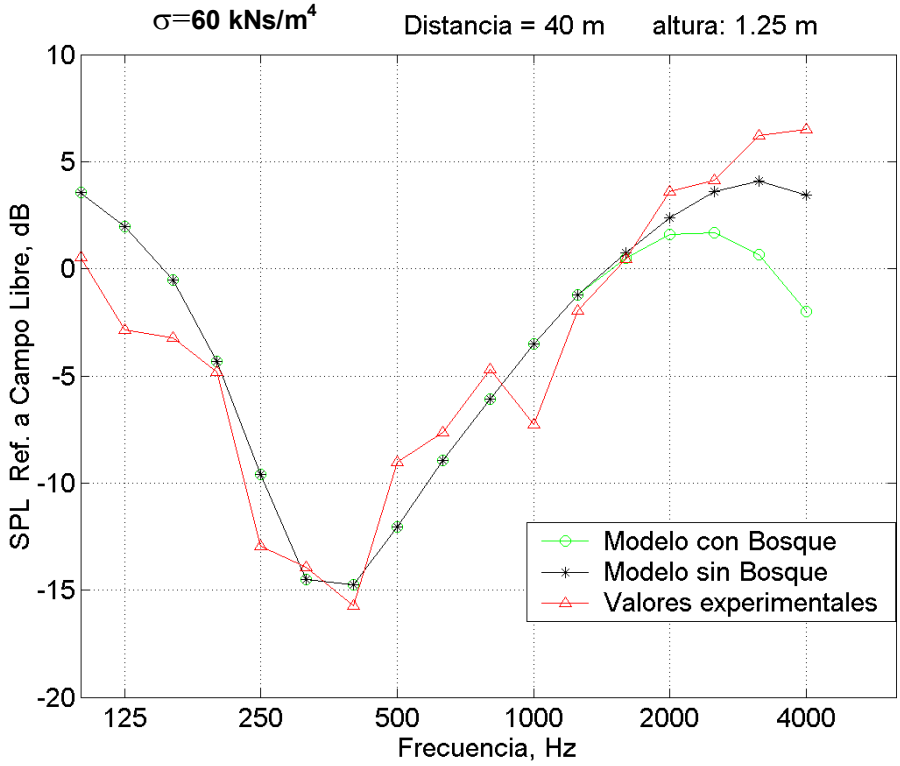

Resistividad al Flujo = 300 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

Figura 7.7: Medidas en un ***bosque de CATALPAS, árboles con hojas****. Comparación entre resultados predichos y medidos para una distancias fuente-receptor de 40 m. Condiciones de medida: Verano, Temperatura = 23ºC; Humedad relativa =40 %. Altura de la fuente = 0.8 m, Altura del receptor: se especifica en la figura. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.057 m y Altura = 4 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2, nQ = 0.08.* ***2ª configuración****.*

a)



b)



c)

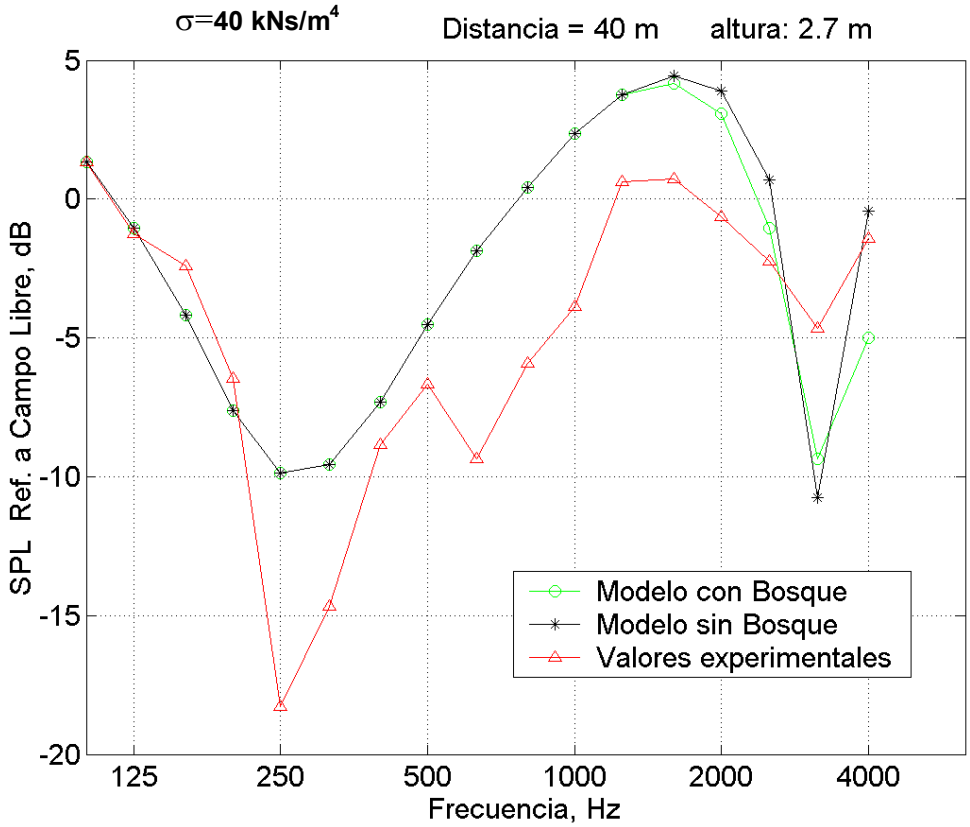
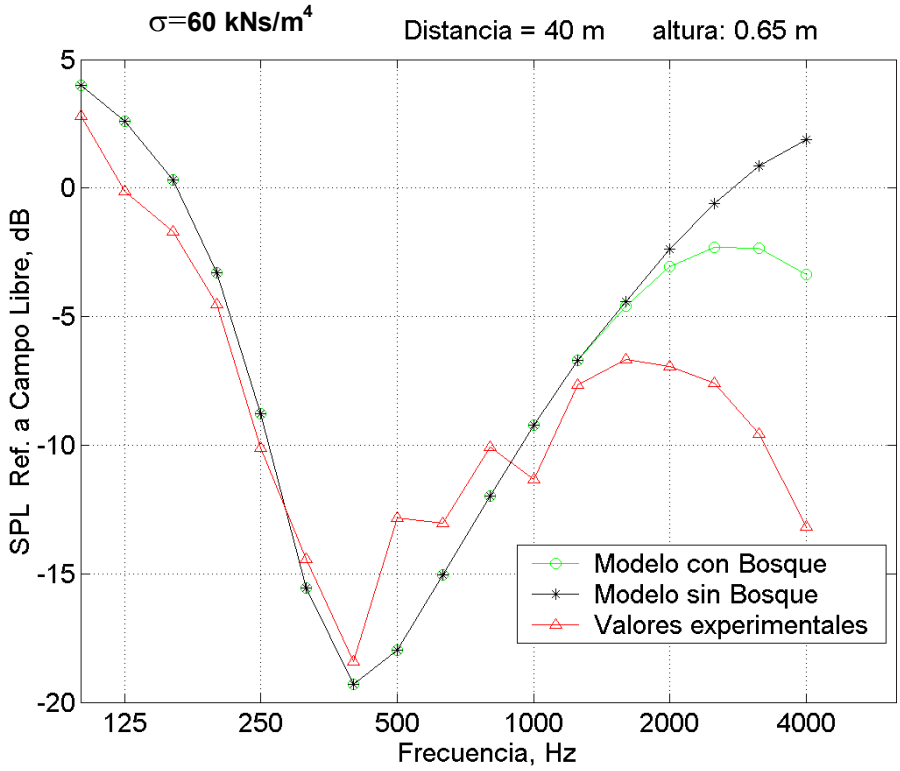
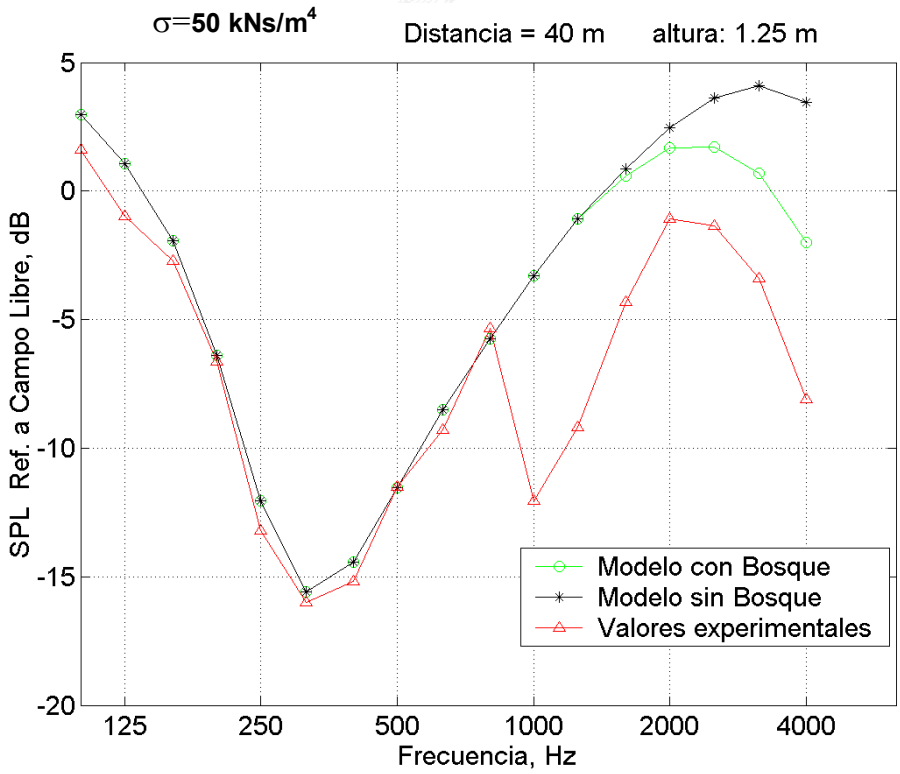

σ=40 kNs/m4
Distancia = 40 m
altura: 2.7 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

*Figura 7.8: Medidas en un **bosque de CATALPAS, árboles con hojas**. La dirección fente-receptor forma un ángulo de 15 º con la línea de los árboles. Comparación entre resultados predichos y medidos para una distancias fuente-receptor de 40 m. Condiciones de medida: Verano, Temperatura = 23ºC; Humedad relativa =40 %. Altura de la fuente = 0.8 m, Altura del receptor: se especifica en la figura. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.057 m y Altura = 4 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2, nQ = 0.08. **3º configuración**.*

a)



b)



7.4.1.3 - Bosque de plátanos

Esta plantación tenía 100 m de longitud por 20 m de ancho y contenía plátanos de 3 años de edad, distribuidos de la misma forma que en el caso anterior, en hileras separadas 1,5 m. La distancia entre 2 árboles consecutivos, dentro de cada hilera, era 0.50 m y la densidad de 1.33 árboles/m^2. El diámetro medio de los troncos era de 0.045 m y su longitud de unos 2 metros, y en ellos había algunas ramas pequeñas, la copa, que medía otro metro aproximadamente, tenía hojas grandes de unos 170 cm^2 por tanto la altura media de los árboles era de 3 m aproximadamente.

Los resultados se muestran en las gráficas de la figura 7.9 y en ella se observa que:

A 10 m el modelo predice bien la posición de los máximos y los mínimos.

El acuerdo entre los valores teóricos y experimentales es mejor a las distancias de 40 y 60 m que a cortas distancias, 10 y 20 m.

El modelo predice un efecto de los árboles solamente para las distancias de 40 y 60 m, por encima de los 2000 Hz.

El valor del mínimo experimental siempre es menor que el calculado por el modelo.

En los días soleados y sin viento puede haber un gradiente de temperatura que origine zonas de sombra. En las gráficas se visualizan porque a frecuencias medias y altas los valores experimentales siguen una curva paralela a la dada por el modelo a partir del mínimo de la curva, pero desplazada hacia abajo en la dirección vertical, (los valores experimentales son mucho menores que los predichos). A la distancia de 60 m se produce una zona de sombra no muy

marcada ya que a partir de los 500 Hz los valores experimentales siguen una curva paralela a la dada por el modelo sin bosque para todas las frecuencias y de valores más bajos.

Los valores de la resistividad al flujo para cada una de las distancias de medida se exponen en la tabla 7.3, en ella puede verse que le tendencia es que los valores más bajos corresponden a las distancias mayores.

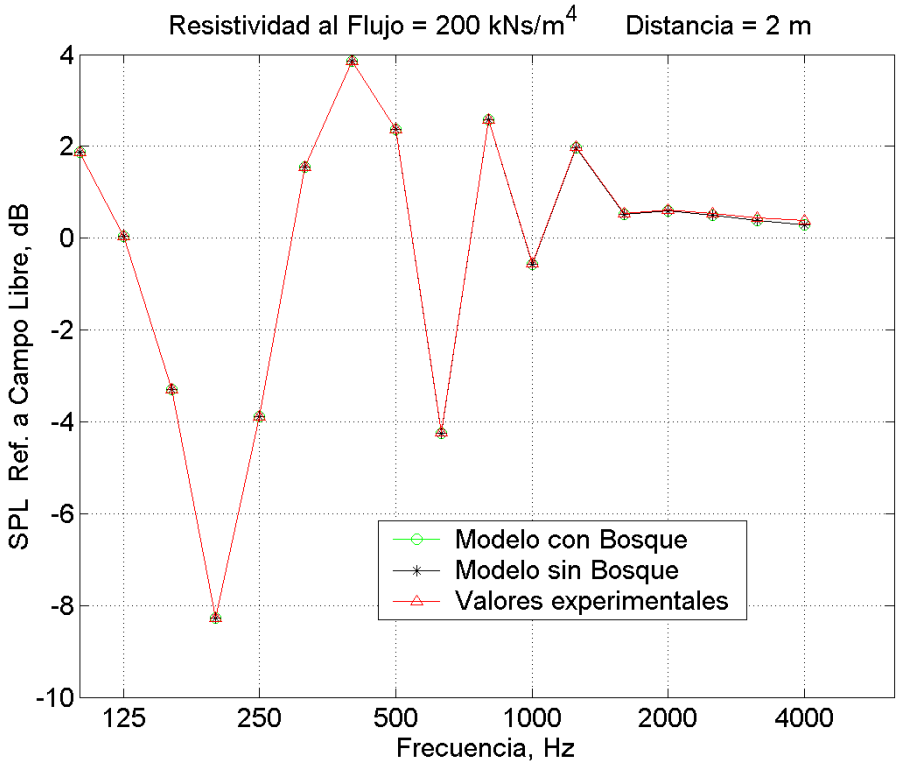
PLATANOS	
Valores de σ en KNs/m^4	
Distancia	**Verano** (con hojas)
2	200
10	300
20	160
40	90
60	110

Tabla 7.3: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias (m) fuente-receptor.

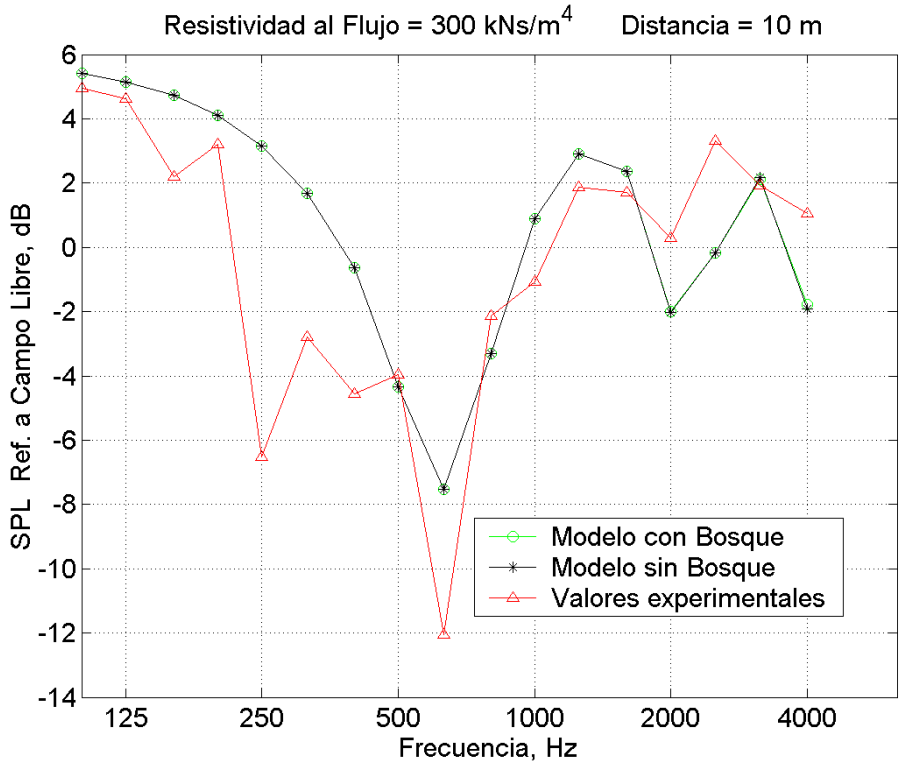
BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

*Figura 7.9: Medidas en un **bosque de PLATANOS**, **árboles con hojas**. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: Verano, Temperatura = 23ºC; Humedad relativa =30 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.045 m y Altura = 3 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2, nQ = 0.06.*

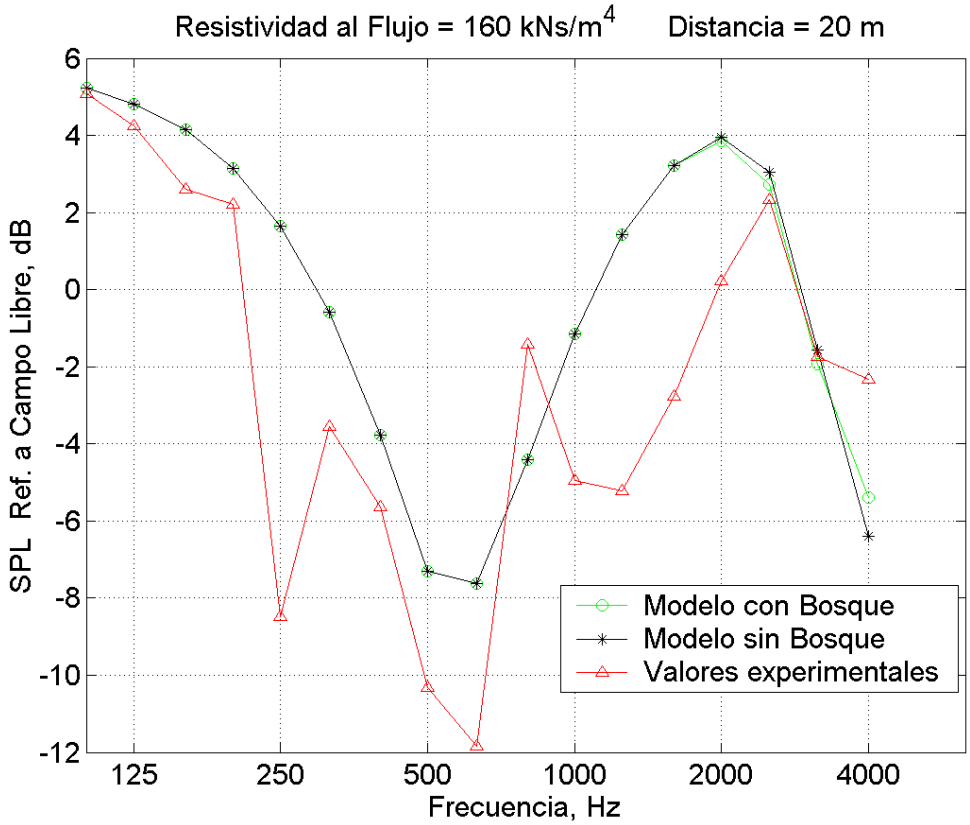
a)



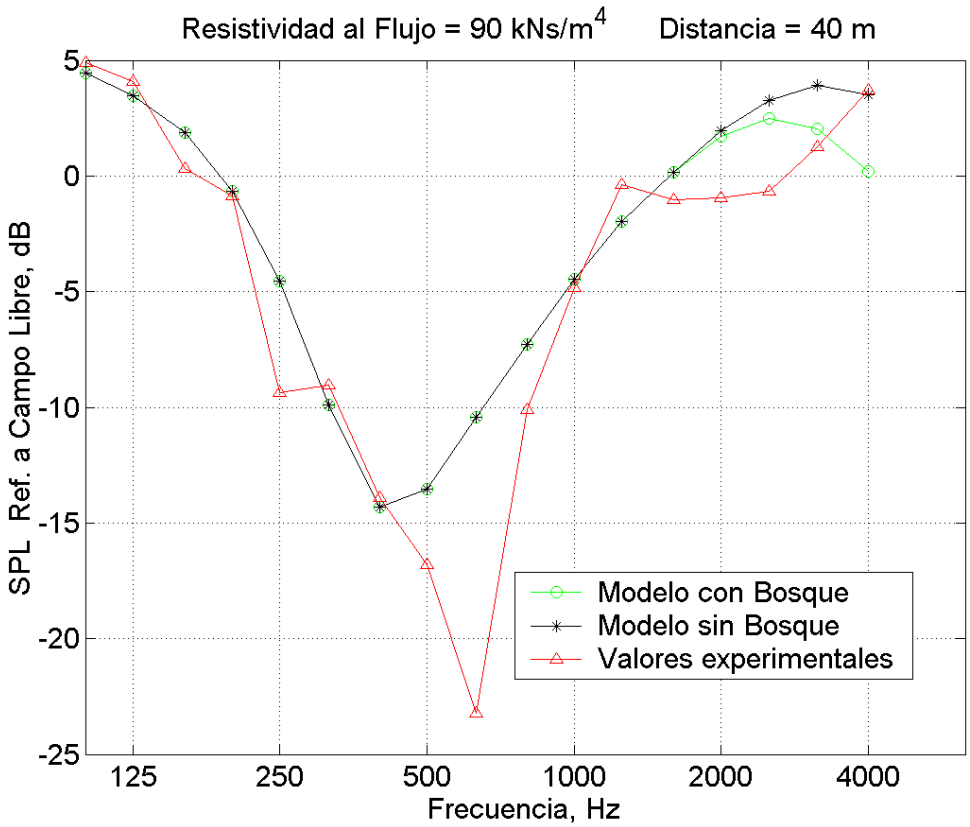
b)



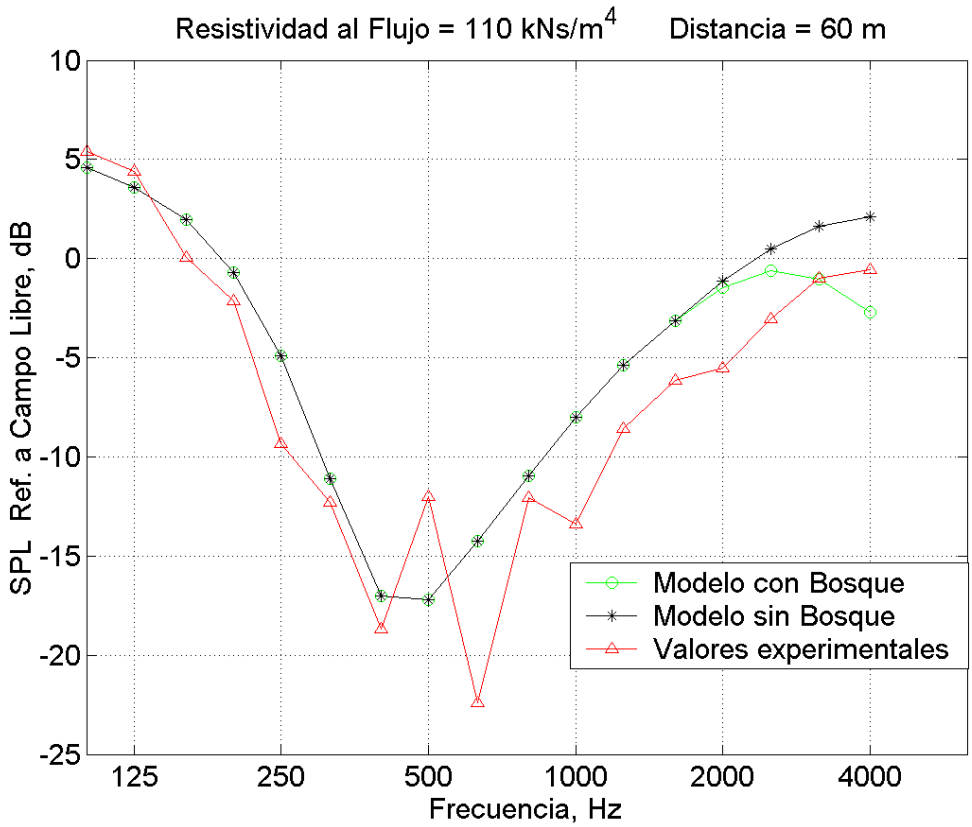
c)


Resistividad al Flujo = 160 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

d)


Resistividad al Flujo = 90 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)


Resistividad al Flujo = 110 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

CERVANTES

7.4.1.4 – Bosque de chopos de 2 años

Esta plantación era cuadrada de 100 m de lado y estaba cubierta con chopos de 2 años de edad. Los árboles estaban distribuidos de la misma forma que en el caso anterior, es decir, en hileras separadas unas de otras 1,5 m y dentro de cada hilera la distancia entre árboles era de 50 cm, por tanto la densidad era de 1.33 árboles/m^2. El perímetro de sus troncos oscilaba entre 10 y 15 cm dando 0.048 m su diámetro medio. El suelo era de tierra únicamente, estaba muy limpio, no tenía hierbas y el día anterior al de la medida había sido regado abundantemente y había lugares en los que el suelo estaba más blando e incluso sin secar. La longitud del tronco era de unos 2 metros y la de la copa de otro metro aproximadamente. La superficie media de las hojas era de unos 35 cm^2. Una fotografía de este bosque se muestra en el anexo III.

Los resultados se muestran en las gráficas de las figuras 7.10 y 7.11 y de su análisis podemos decir a grandes rasgos que:

A 10 y 20 m el modelo predice las frecuencias de los máximos y los mínimos, pero la posición se desplaza un tercio de octava en el caso de 20 m. A 10 m el ajuste es bueno. Para estas distancias los valores experimentales son más bajos en el caso de árboles con hojas.

A 40 y 60 m el modelo predice bien la propagación del sonido para las frecuencias bajas y medias pero no en las altas, a estas frecuencias los valores experimentales están por debajo de los predichos más de 5 dB.

A 60 y 80 m en el caso de los árboles sin hojas parece que hay un corrimiento de los valores experimentales de la atenuación respecto de los

valores predichos en un rango amplio de frecuencias produciéndose sombra acústica a partir de la frecuencia del mínimo.

Al igual que se ha visto en el caso anterior, bosque de plátanos, el modelo predice una influencia del bosque solamente para distancias iguales o superiores a 40 m y frecuencias por encima de los 2000 Hz ya que la densidad del bosque era la misma y el diámetro de los troncos similares, ambos tienen el mismo valor de nQ.

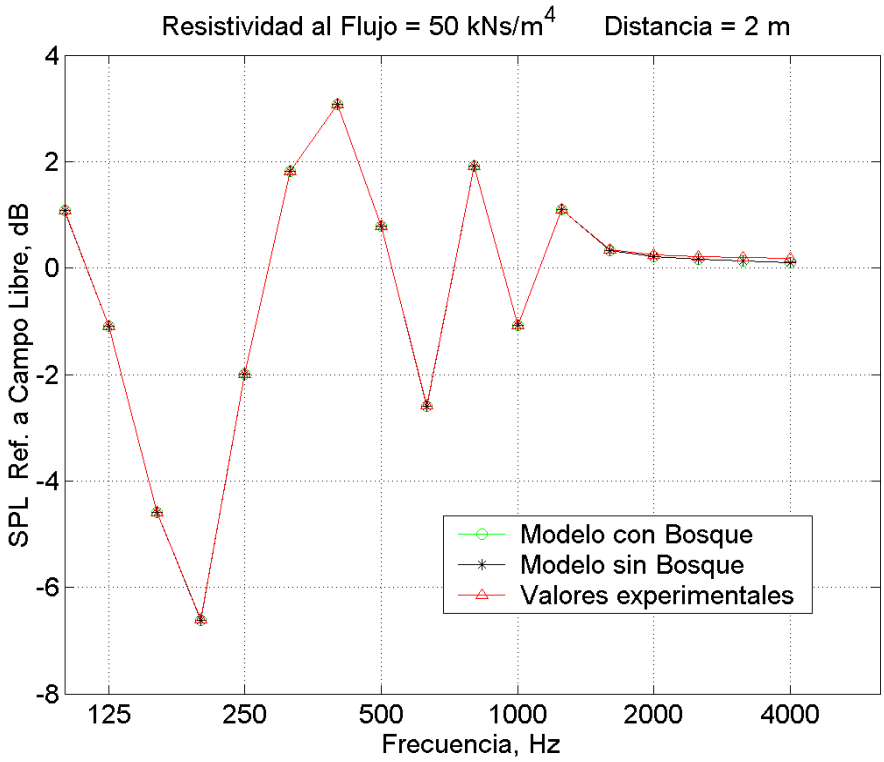
En este bosque se observa de nuevo que los valores de la resistividad al flujo determinados son menores con hojas que sin hojas, tabla 7.4, y excepto anomalías, los valores tienden a disminuir con la distancia.

Chopos 2 años Valores de σ en KNs/m^4		
Distancia	Verano (con hojas)	Invierno (sin hojas)
2	50	500
10	250	300
20	200	200
40	110	250
60	80	250
80	-	220

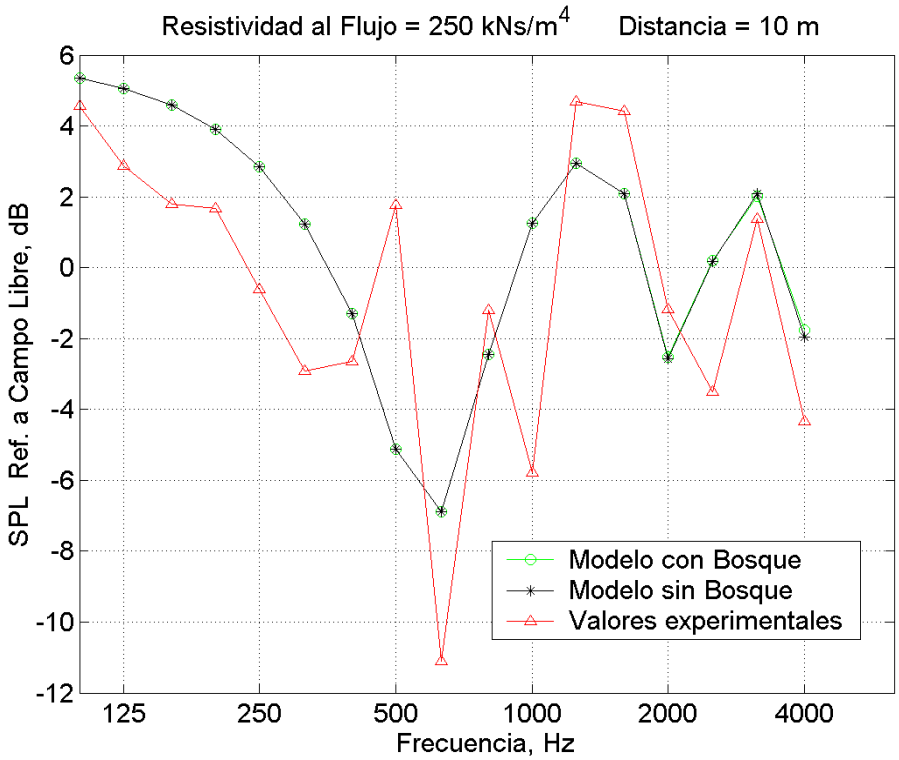
Table 7.4: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias (m) fuente-receptor y diferentes lugares.

Figura 7.10: Medidas en un ***bosque de CHOPOS DE 2 AÑOS, árboles con hojas*** *Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: Verano, Temperatura = 23ºC; Humedad relativa =30 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.048 m y Altura = 3 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2, nQ = 0.06.*

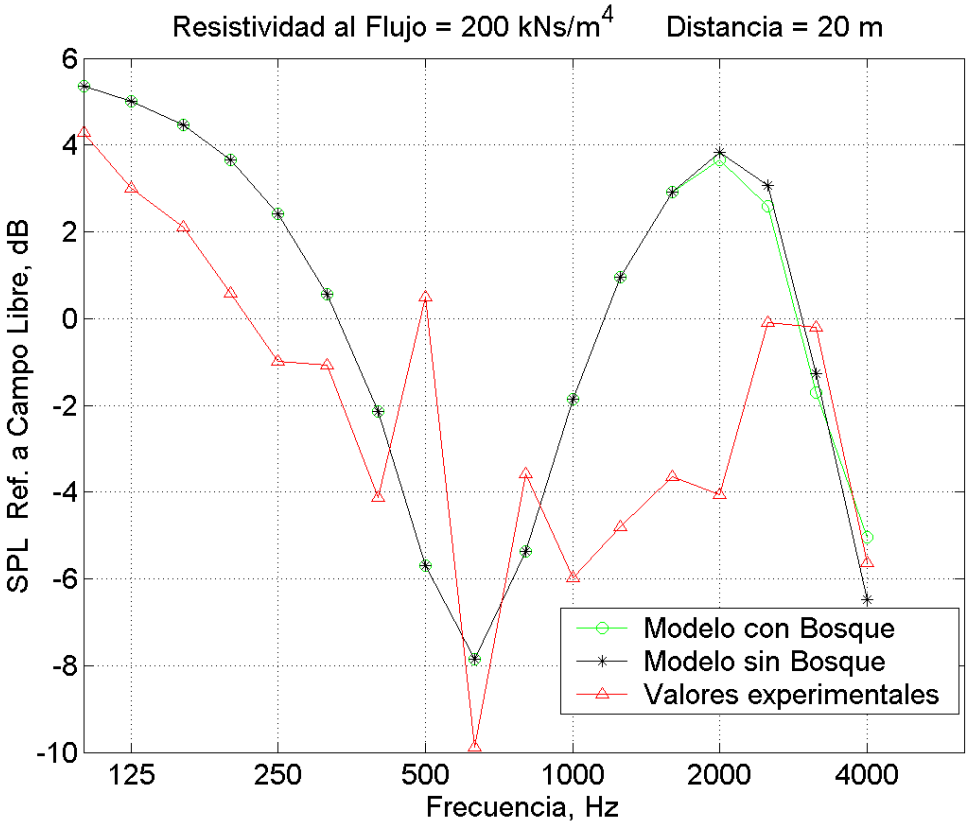
a)



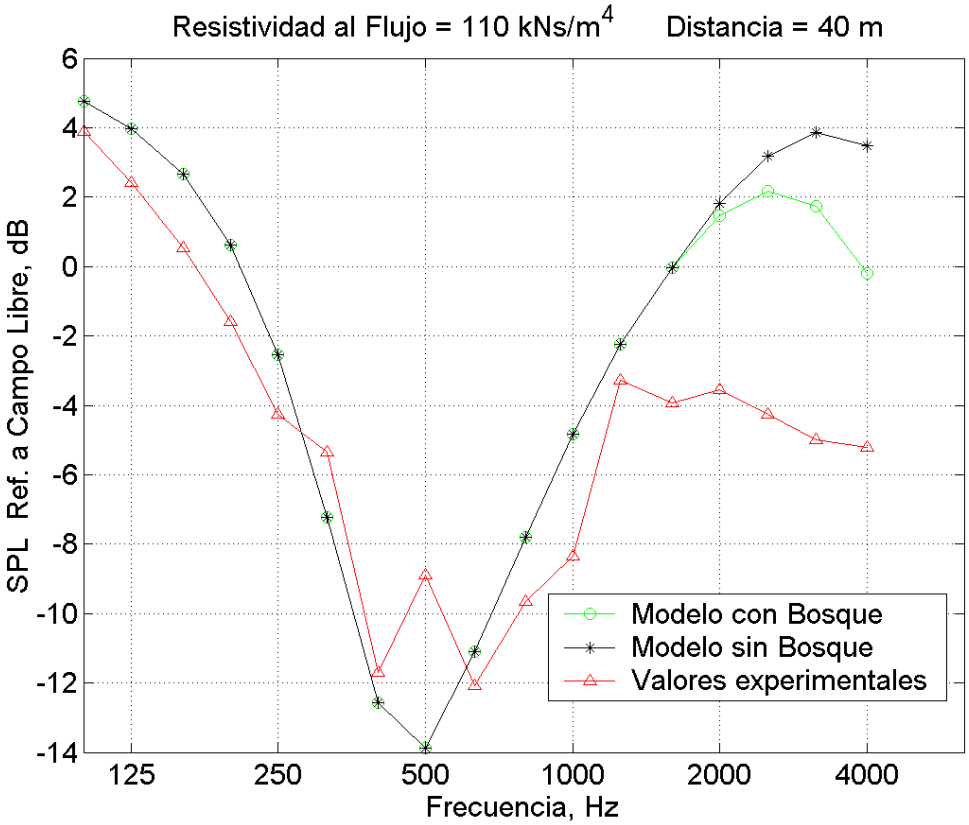
b)



c)


Resistividad al Flujo = 200 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

d)


Resistividad al Flujo = 110 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)

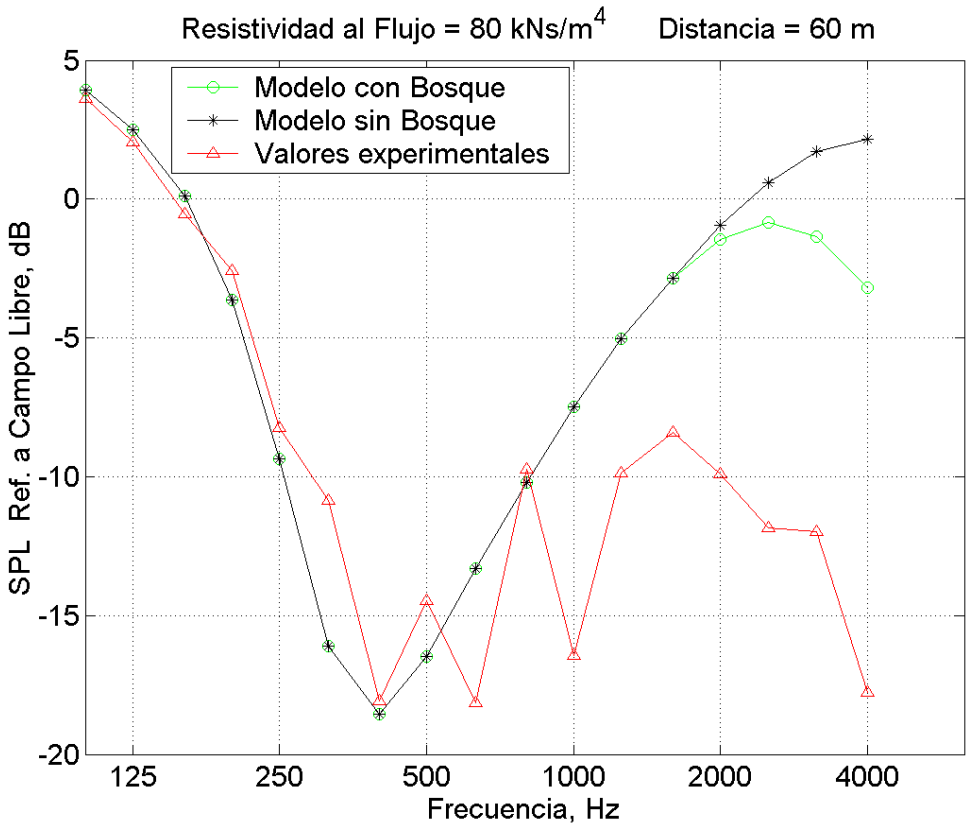
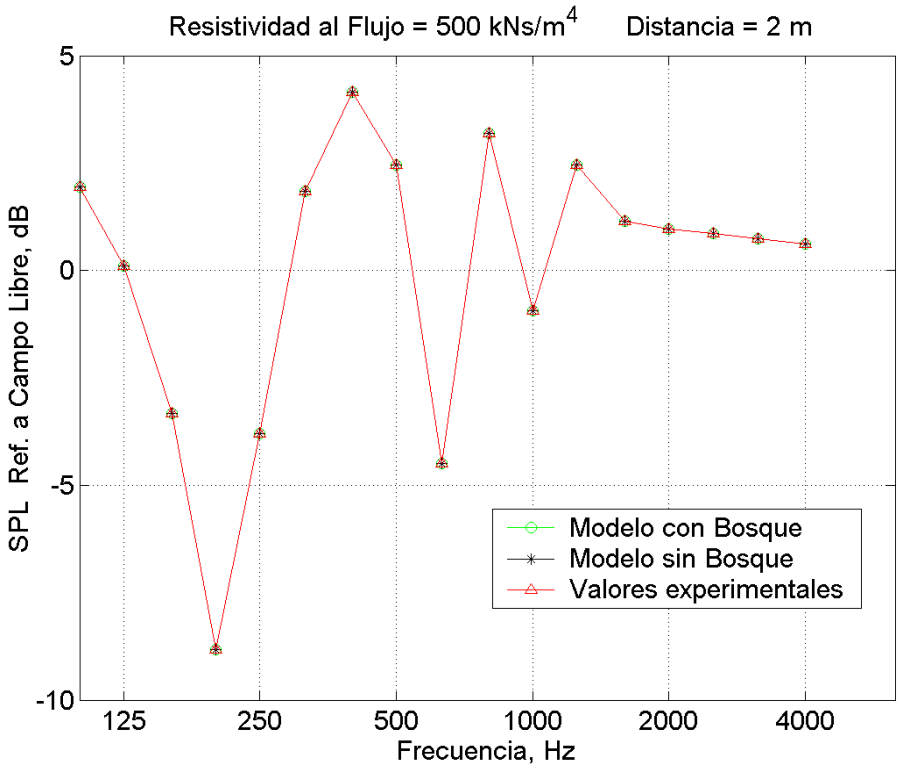
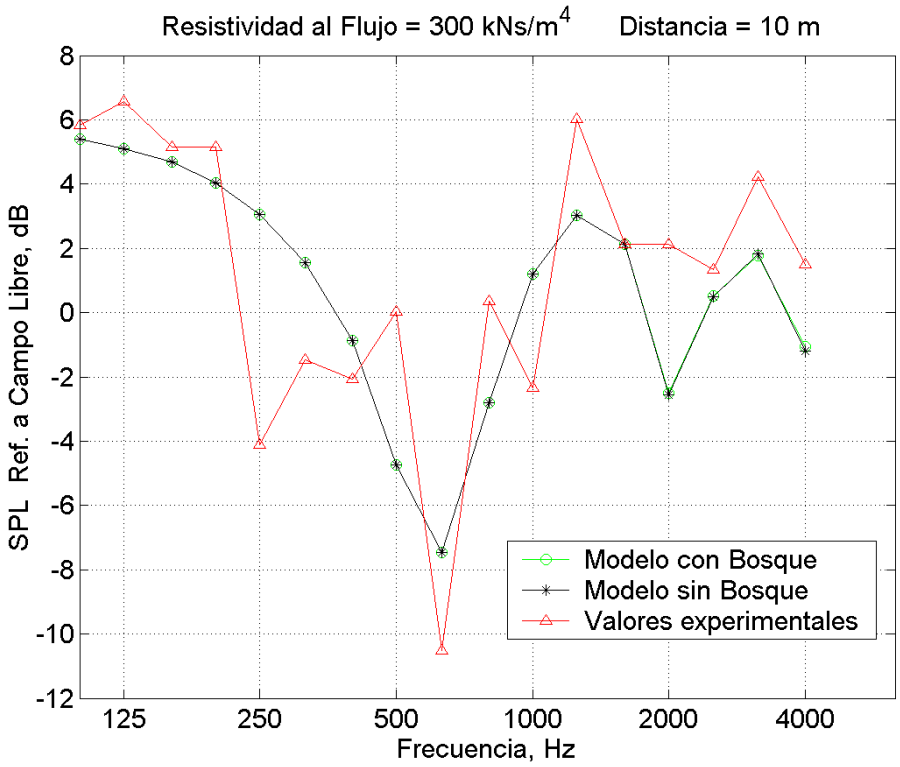

Resistividad al Flujo = 80 kNs/m4
Distancia = 60 m
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000

Figura 7.11: Medidas en un ***bosque de CHOPOS DE 2 AÑOS, árboles sin hojas****. Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Condiciones de medida: Invierno, Temperatura = 7ºC; Humedad relativa =64 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro= 0.048 m y Altura = 3 m. Densidad = 1.33 árboles/m^2 nQ = 0.06*

a)

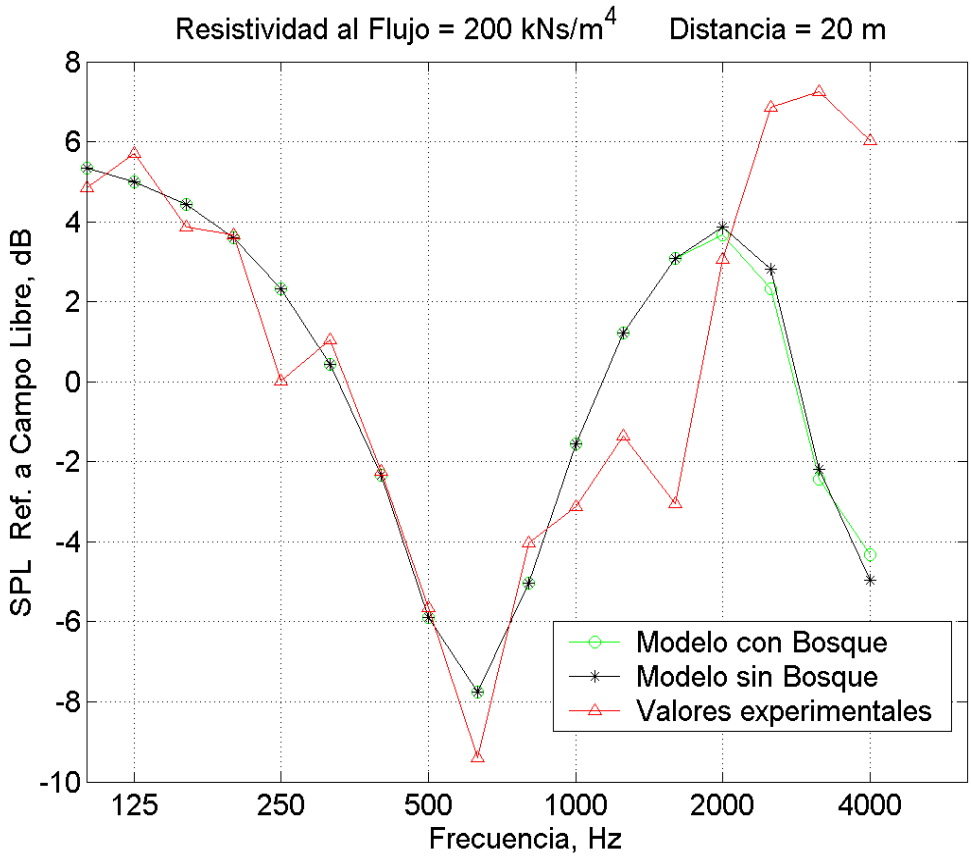


b)

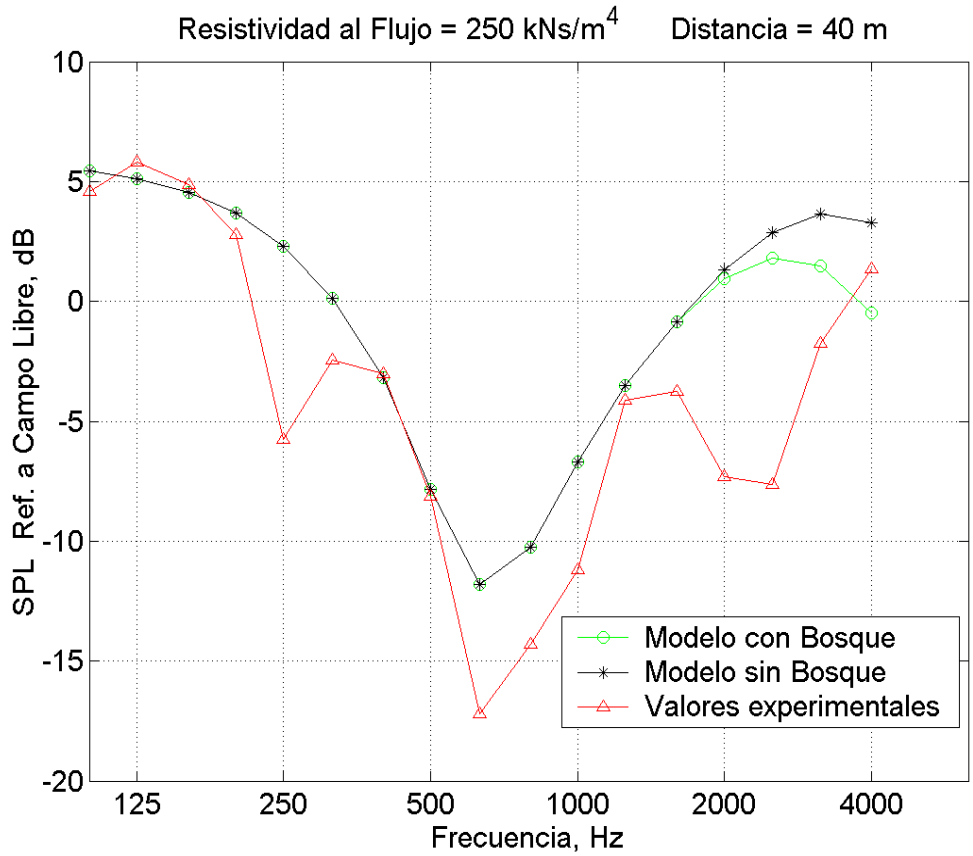


BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

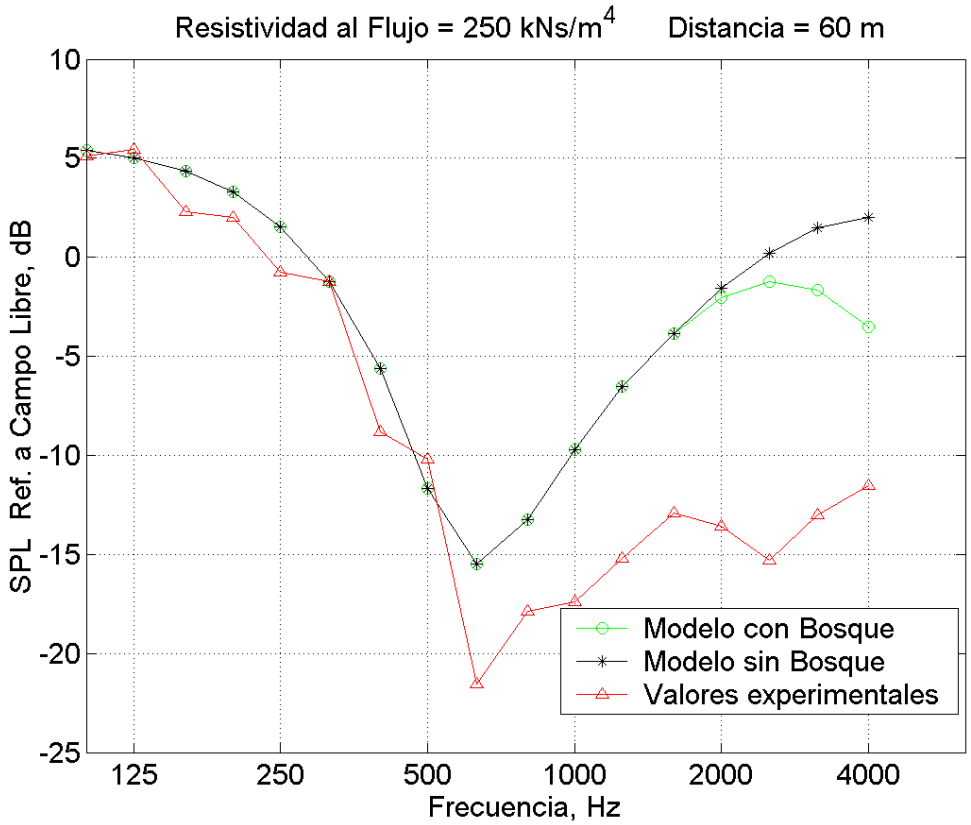
c)


Resistividad al Flujo = 200 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

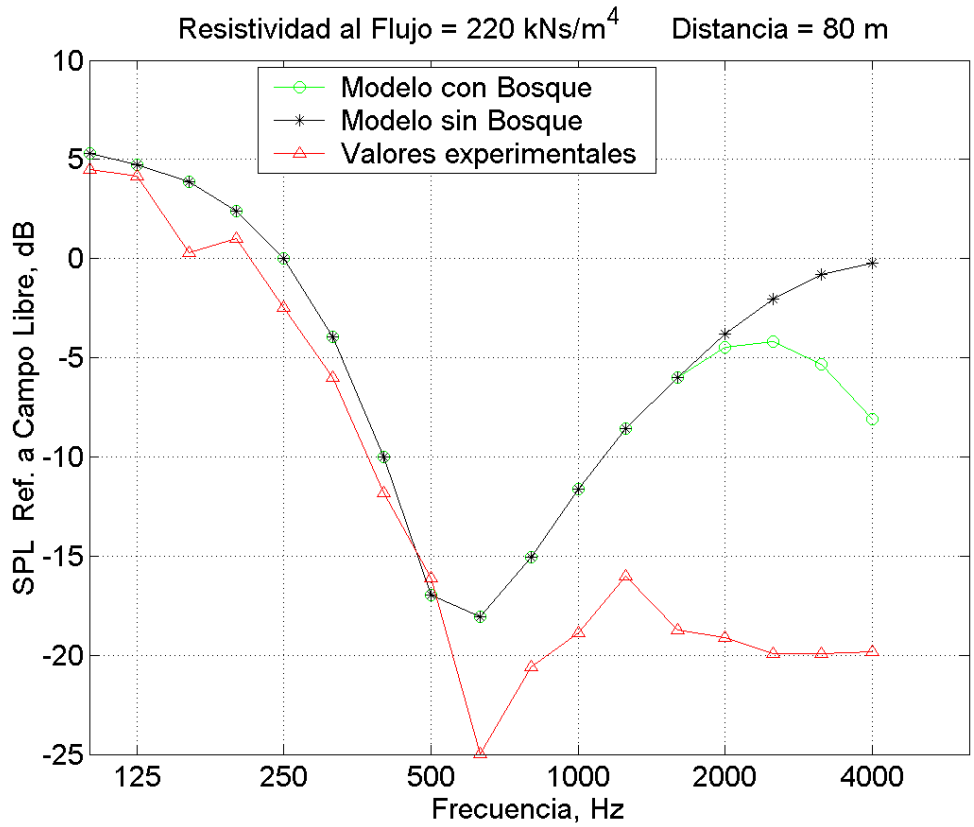
d)


Resistividad al Flujo = 250 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)


Resistividad al Flujo = 250 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)


Resistividad al Flujo = 220 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

4.2 - Bosques irregulares

Se incluyen en el grupo de bosques irregulares aquellos en los que los árboles están distribuidos en el suelo de forma aleatoria, y por tanto, forman una distribución no homogénea. Estos bosques tienen árboles de hoja perenne y en uno de ellos se realizaron medidas en dos épocas del año muy diferentes, verano e invierno y en dos direcciones en las que variaba la densidad de árboles. Los bosques en los que se midió fueron dos: uno de pinos y otro de encinas que describimos a continuación.

4.2.1 - Bosque de pinos

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Este bosque corresponde con una extensión no demasiado grande de pinos, colocados de forma totalmente irregular y con alturas y troncos de diámetros también muy variados. De las medidas geométricas realizadas en varios de los árboles se estimó que el valor medio del diámetro era de 0.15 m, pero con gran dispersión, y la altura media de unos 10 m. En este lugar se podían distinguir zonas con distintas densidades de vegetación de las que se tomaron 2 muy diferentes, una estimada en 0.027 árboles/m^2 y la otra bastante menor, unas 4 veces más pequeña, es decir de un valor aproximado de 0.0067 árboles/m^2 a las que nos referiremos con pinos(1) y pinos(2) respectivamente. En este Bosque se realizaron medidas en verano y en invierno. Fotografías de este bosque se muestran en el anexo III.

Los resultados se representan en las gráficas de la figuras 7.12 y 7.13 para pinos (1), y 7.14 y 7.15 para pinos (2). Del análisis de todas ellas se deduce que

el modelo predice los mismos valores con presencia y ausencia de bosque, para todas las distancias fuente-receptor consideradas, debido a los valores tan pequeños de la densidad de árboles.

Si comparamos las figuras 7.12 y 7.13 se observa que:

A 20 m el modelo predice bien la frecuencia a la que aparece el mínimo y su valor. Las mayores discrepancias con los valores experimentales se presentan a frecuencias altas.

A 40 y 60 m el modelo predice bien la frecuencia del mínimo y su valor pero hay diferencias con los datos experimentales a frecuencias altas. En el caso de las medidas en invierno se observa que las gráficas teórica y experimental tienen la misma forma a partir del mínimo pero una está desplazada verticalmente respecto de la otra, encontrándose la correspondiente a los datos experimentales por debajo, lo que pone de manifiesto la presencia de una zona de sombra.

A 80 m en general el modelo predice bien la propagación.

Del análisis de las figuras 7.14 y 7.15 se puede decir que:

A 20 m el modelo predice muy bien la posición del mínimo y del máximo así como la propagación del sonido para todas las frecuencias excepto las altas ya que el modelo predice la existencia de un mínimo que no aparece en los valores experimentales, también se detecta que el modelo predice más atenuación que lo que muestran los datos experimentales.

A 40 m el acuerdo entre los valores experimentales y los predichos por el modelo es muy bueno para todas las frecuencias, esto pone de manifiesto la adecuación del modelo en este caso concreto.

A 60 y 80 m el modelo predice bien la propagación del sonido para las frecuencias bajas y medias. Sin embargo en las frecuencias altas los datos experimentales son mucho más pequeños que los predichos, en algunas frecuencias las diferencias son mayores de 5 dB. Creemos que esto es debido a que los árboles sí atenúan pero el modelo no lo predice ya que la densidad del bosque es muy pequeña.

En este caso la densidad es menor que en pinos (1) y la atenuación de los árboles se presenta a 60 m en lugar de 40 como en pinos (1).

Los valores de la resistividad al flujo son bajos en todos los casos y muy similares para las medidas de verano y de invierno como se muestra en la tabla 7.5. En ella se observa que a partir de los 10 m en todos los casos la resistividad disminuye a medida que aumenta la distancia fuente-receptor, ya que se considera más cantidad de bosque y por tanto más blando es el suelo.

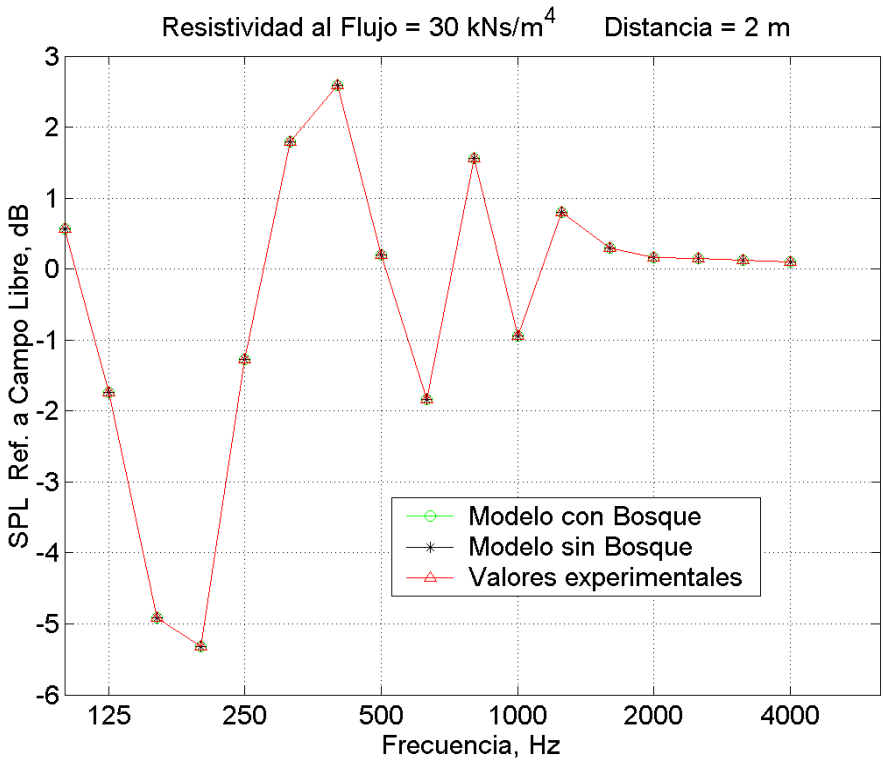
BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

	Valores de σ en KNs/m^4			
	Pinos(1)		**Pinos(2)**	
d	Verano	Invierno	Verano	Invierno
2	30	-	20	50
10	-	-	-	130
20	100	-	100	100
40	50	50	90	80
60	50	-	60	70
80	40	65	60	60

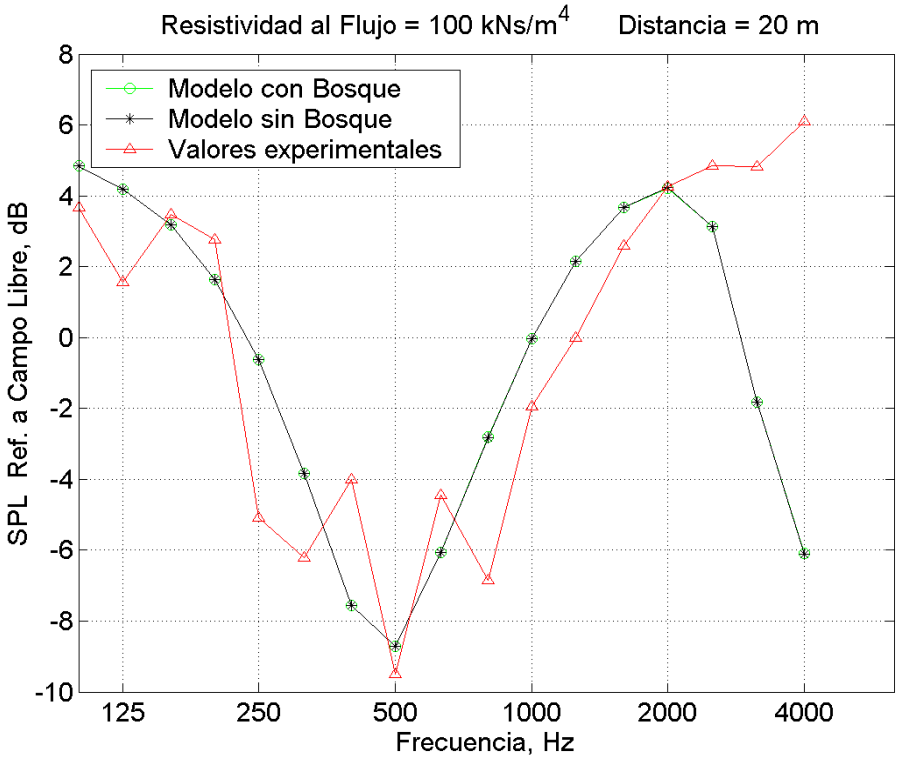
Tabla 7.5: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias d (m) fuente-receptor.

Figura 7.12: Medidas en un ***bosque de PINOS (1), medida en Verano.*** *Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Temperatura=25ºC; Humedad relativa =40 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.15 m y Altura = 10 m. Densidad = 0.027 árboles/m^2 nQ = 0.004.*

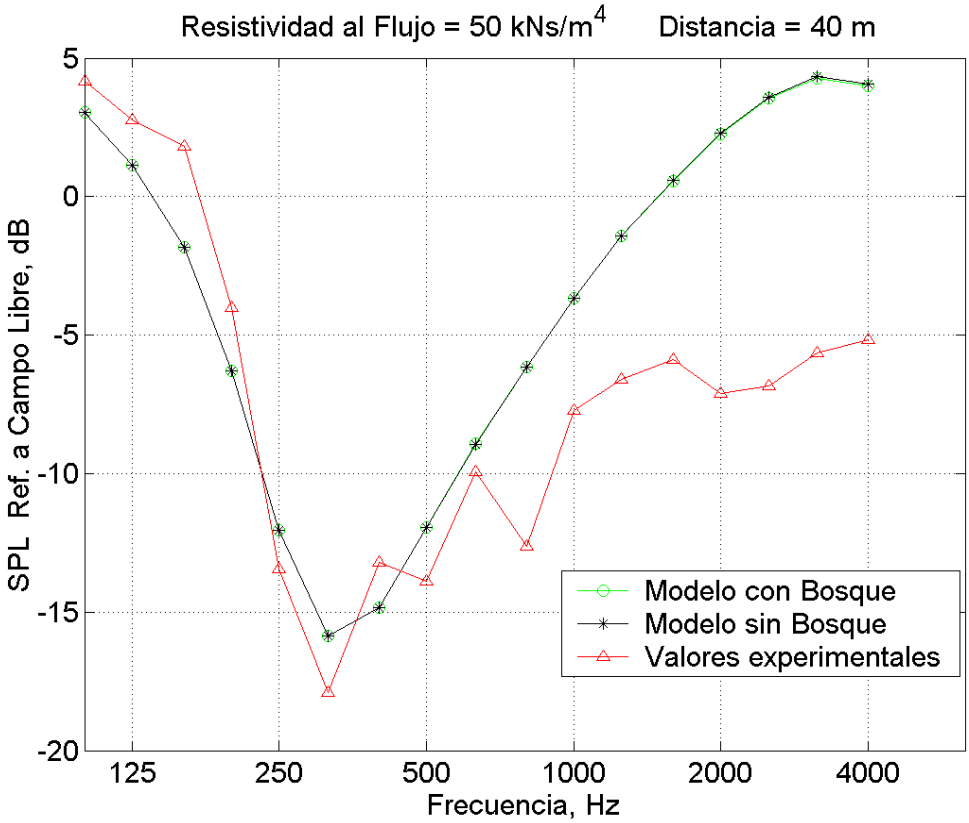
a)



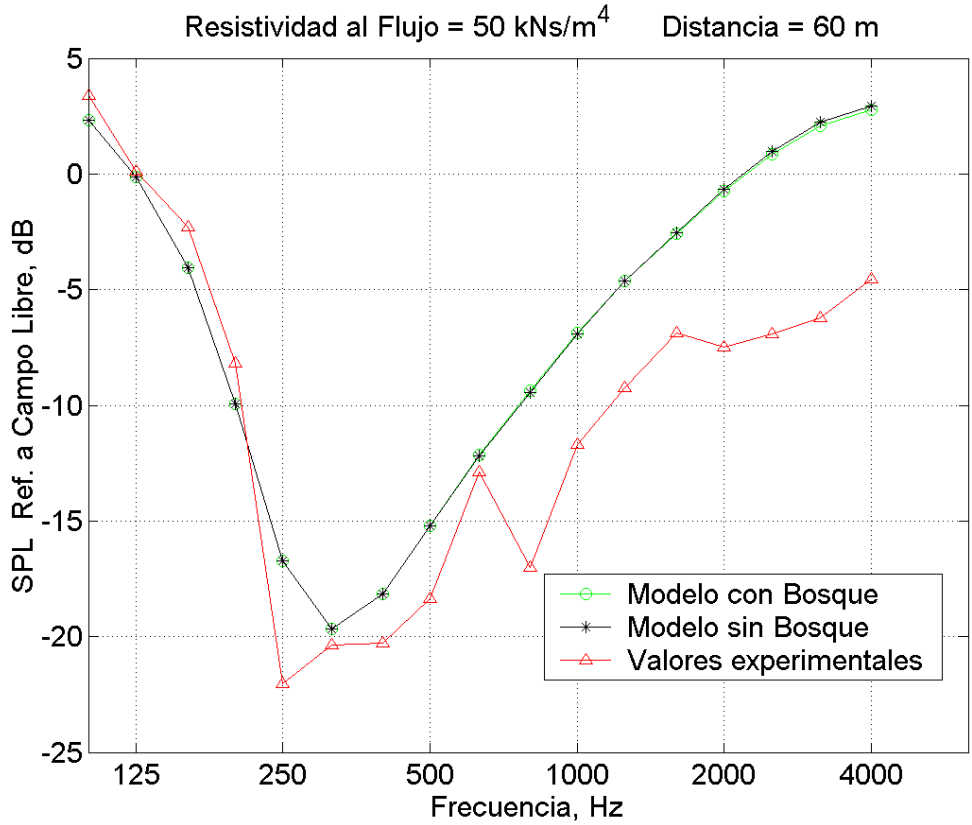
b)



c)


Resistividad al Flujo = 50 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

d)


Resistividad al Flujo = 50 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)

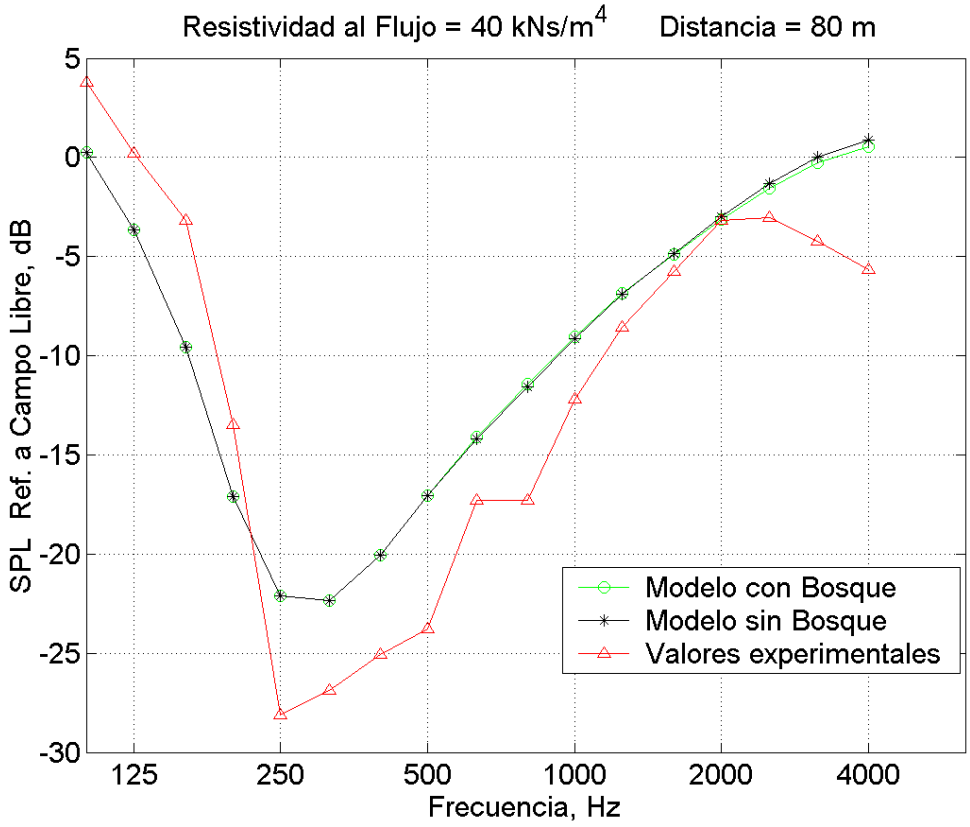
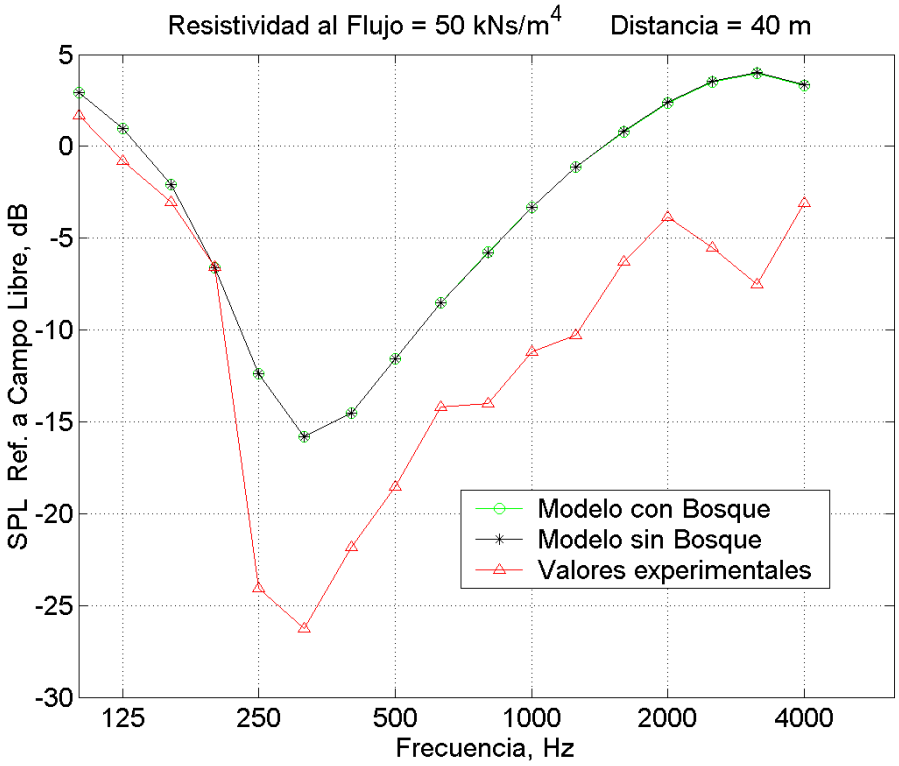

Resistividad al Flujo = 40 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
125
250
500
1000
2000
4000
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

*Figura 7.13: medidas en un **bosque de PINOS (1), en Invierno**, Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Temperatura = 7ºC; Humedad relativa =60 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.15 m y Altura = 10 m. Densidad = 0.027 árboles/m^2 nQ = 0.001.*

a)



b)

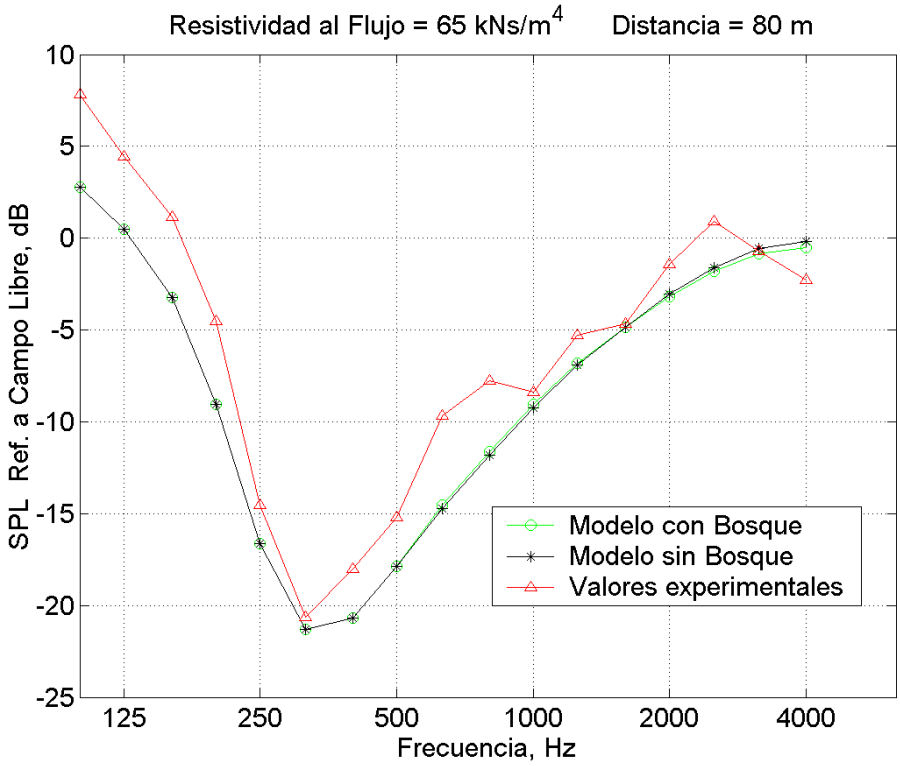
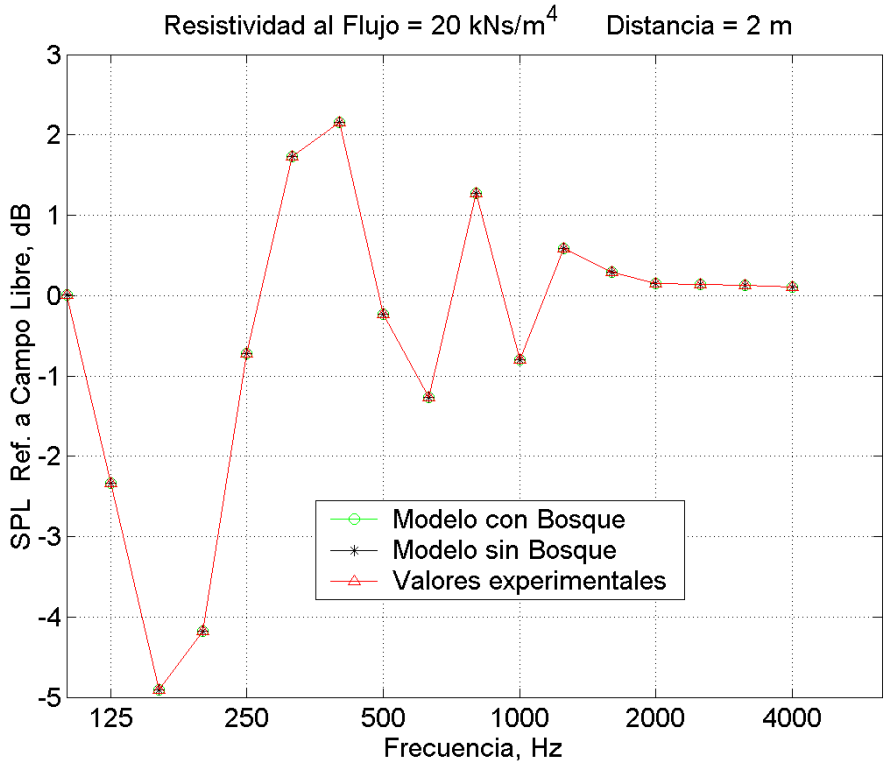
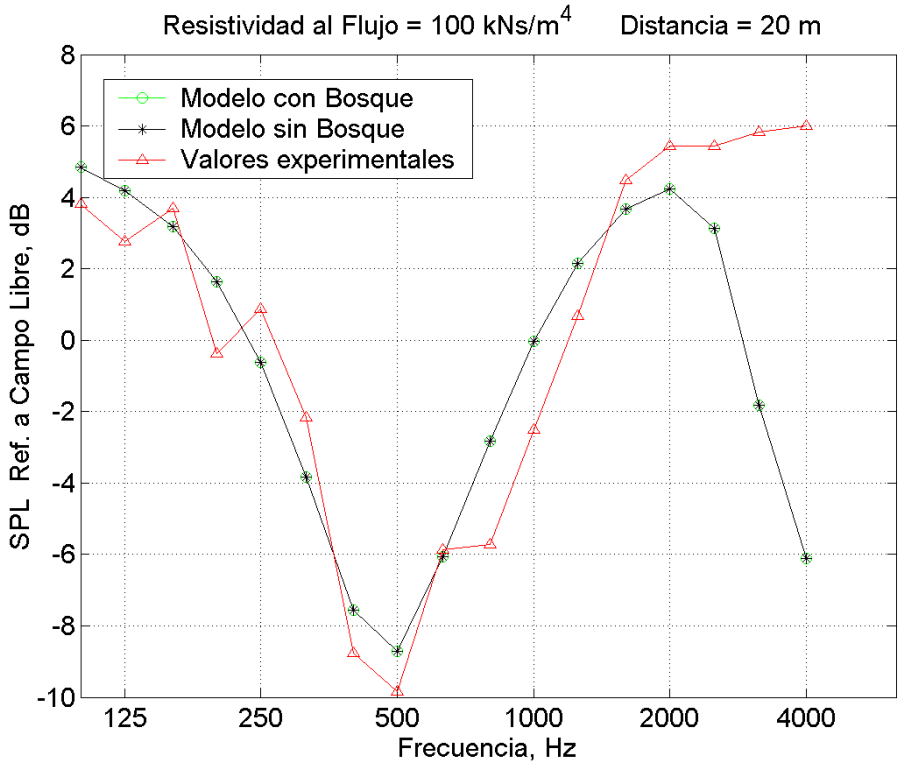


Figura 7.14: Medidas en un ***bosque de PINOS (2) en Verano.*** *Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Temperatura = 25ºC; Humedad relativa =40 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.15 m y Altura = 10 m. Densidad= 0.0067 árboles/m^2 nQ = 0.001.*

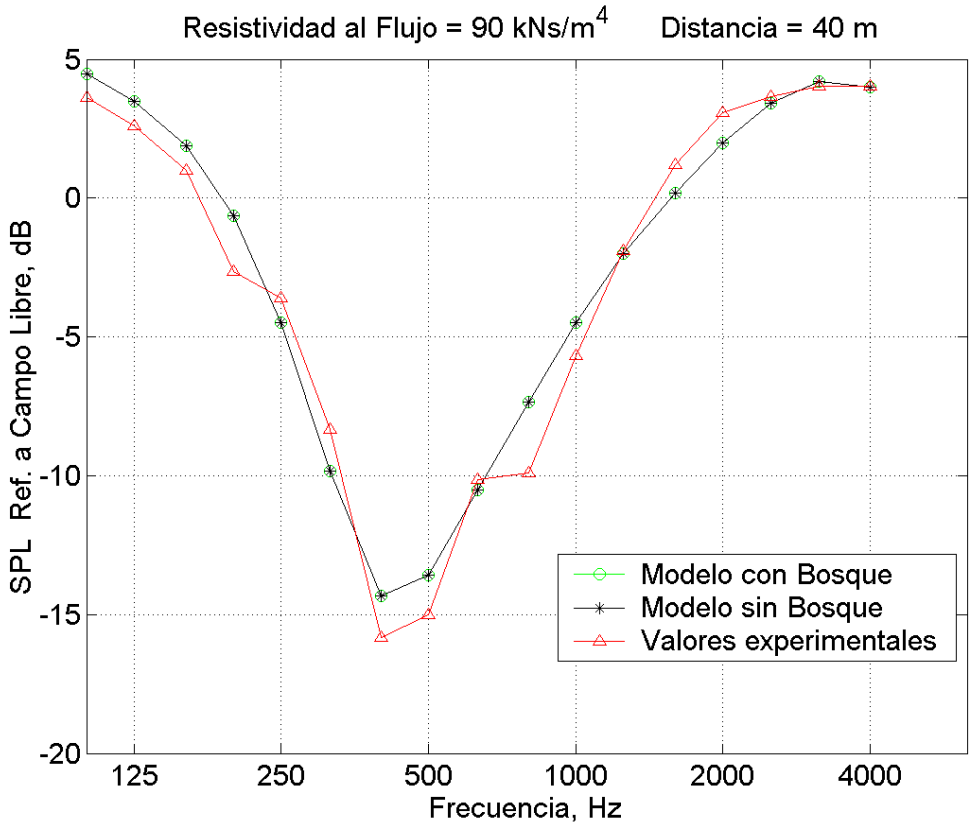
a)



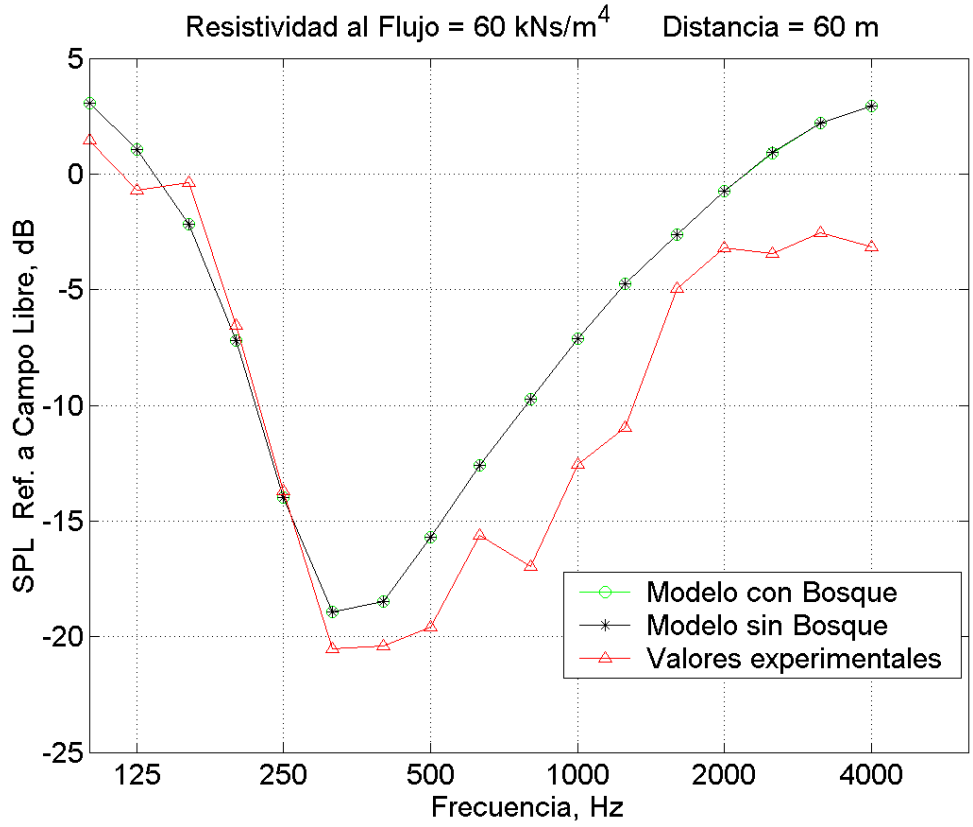
b)



c)


Resistividad al Flujo = 90 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

d)


Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)

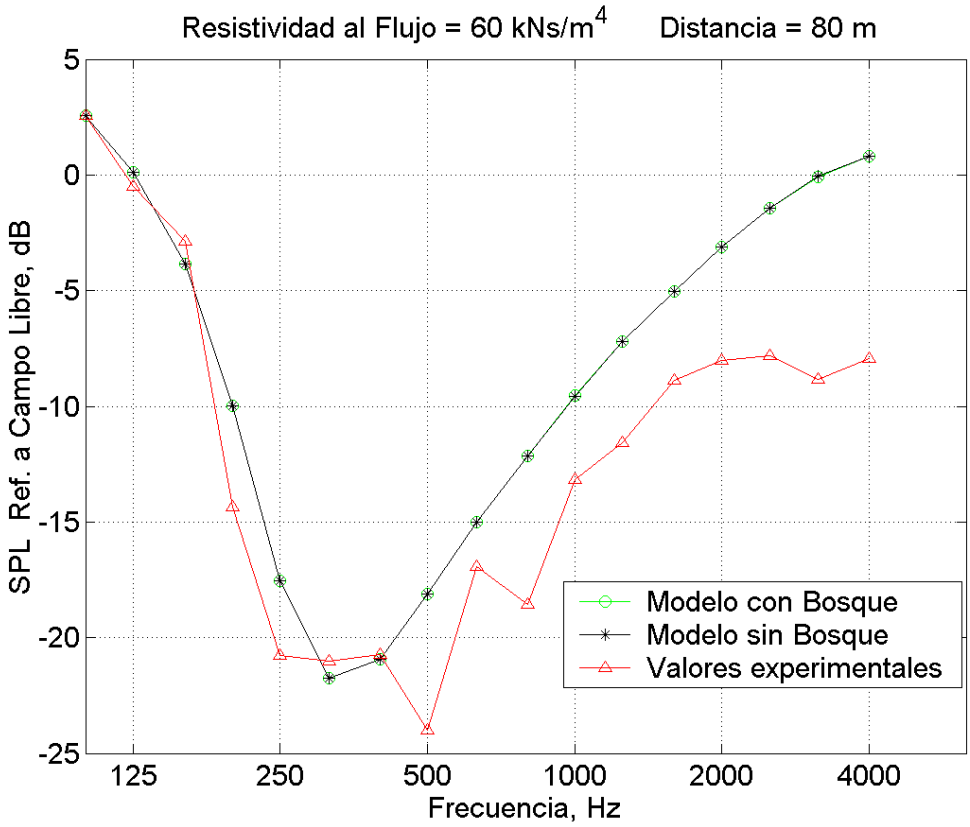
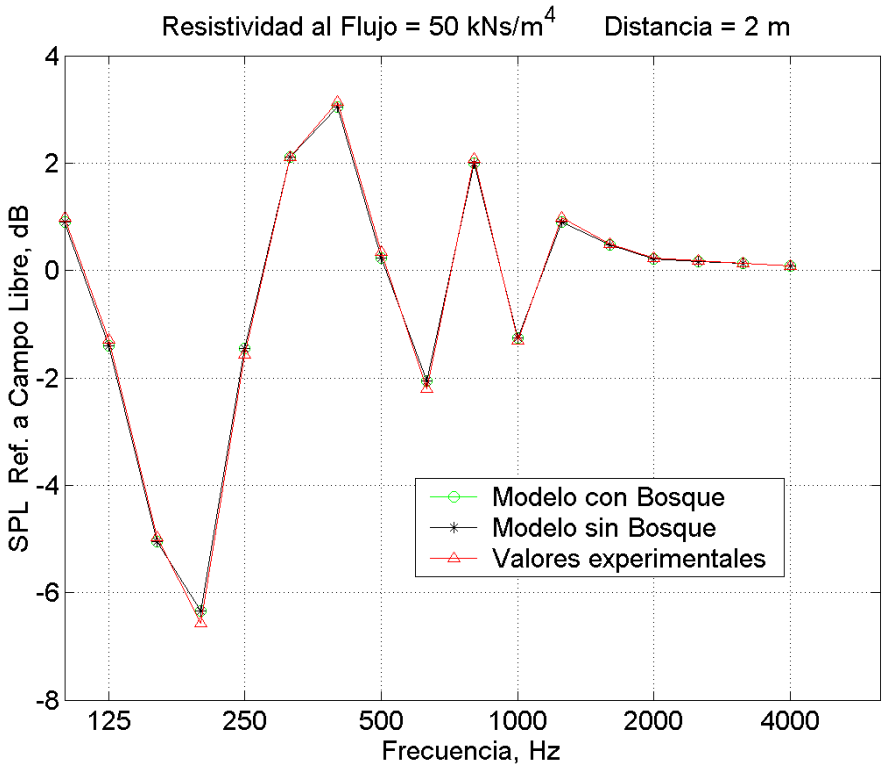
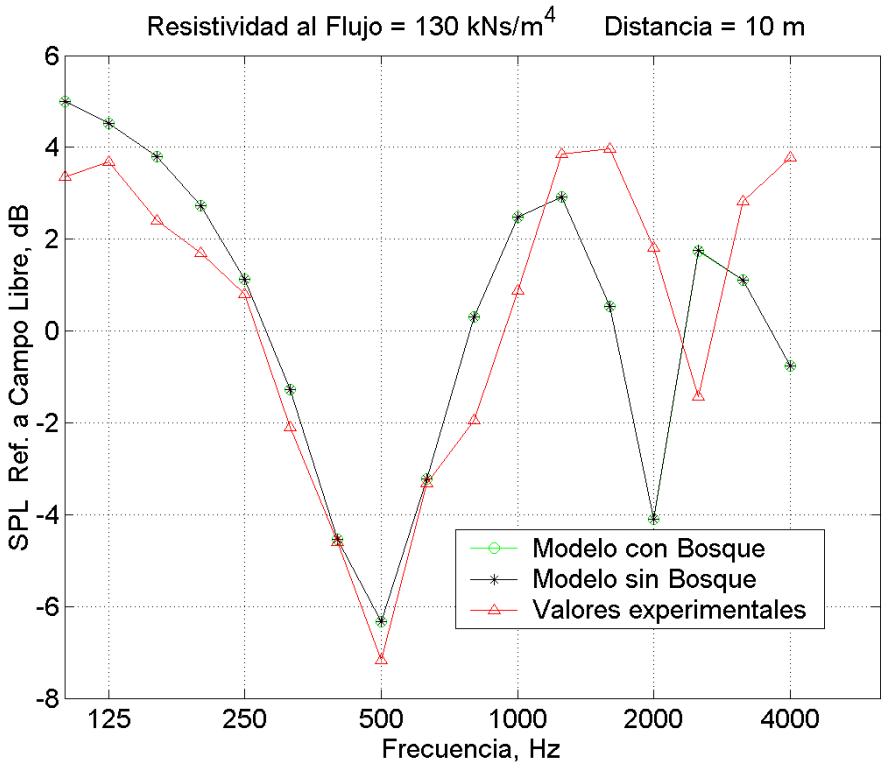

Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Frecuencia, Hz
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

*Figura 7.15: Medidas en un **bosque de PINOS (2) en Invierno.** Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Temperatura = 7ºC; Humedad relativa =60 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.15 m y Altura = 10 m. Densidad = 0.0067 árboles/m^2, nQ=0.001.*

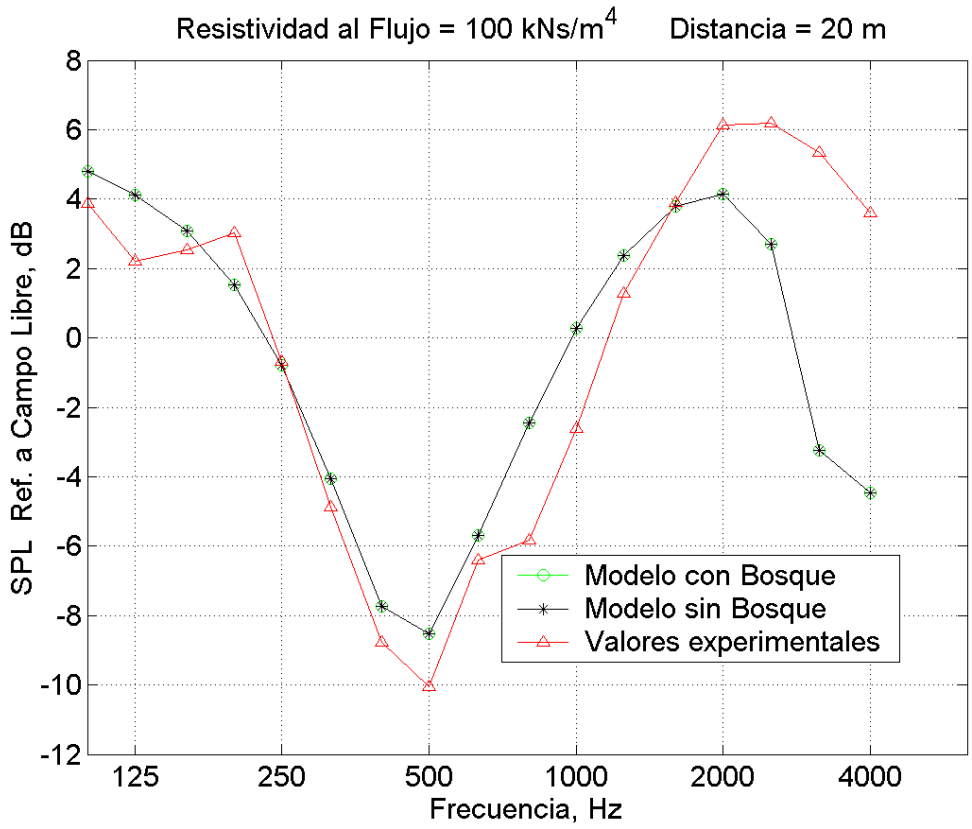
a)



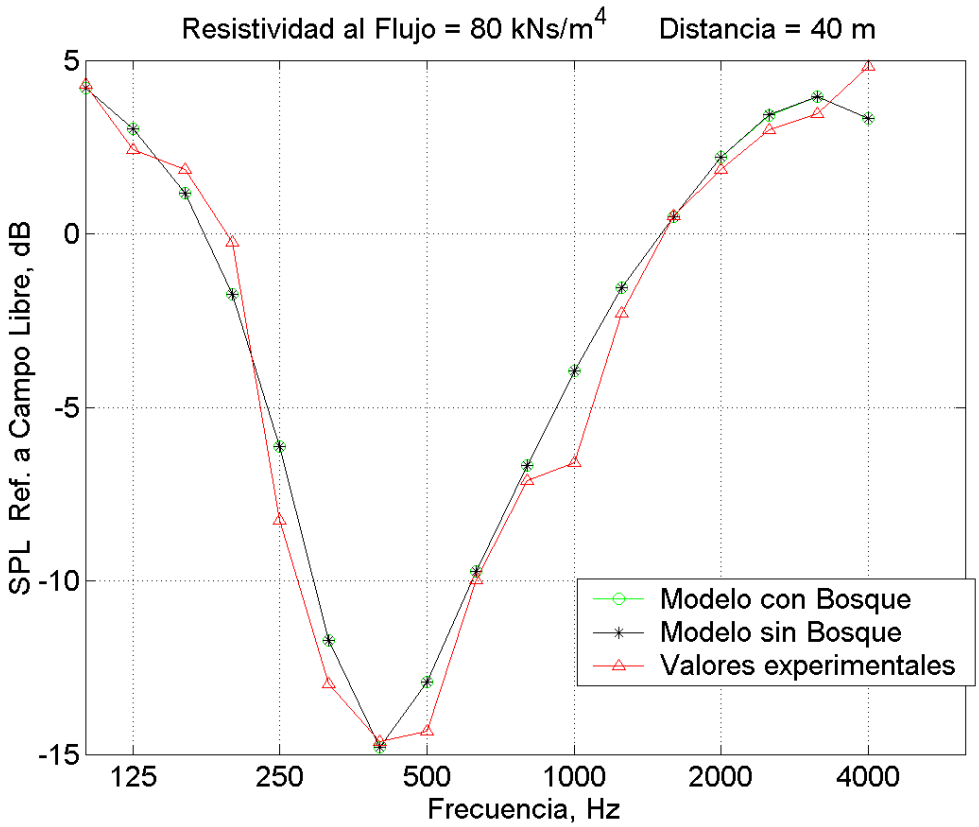
b)



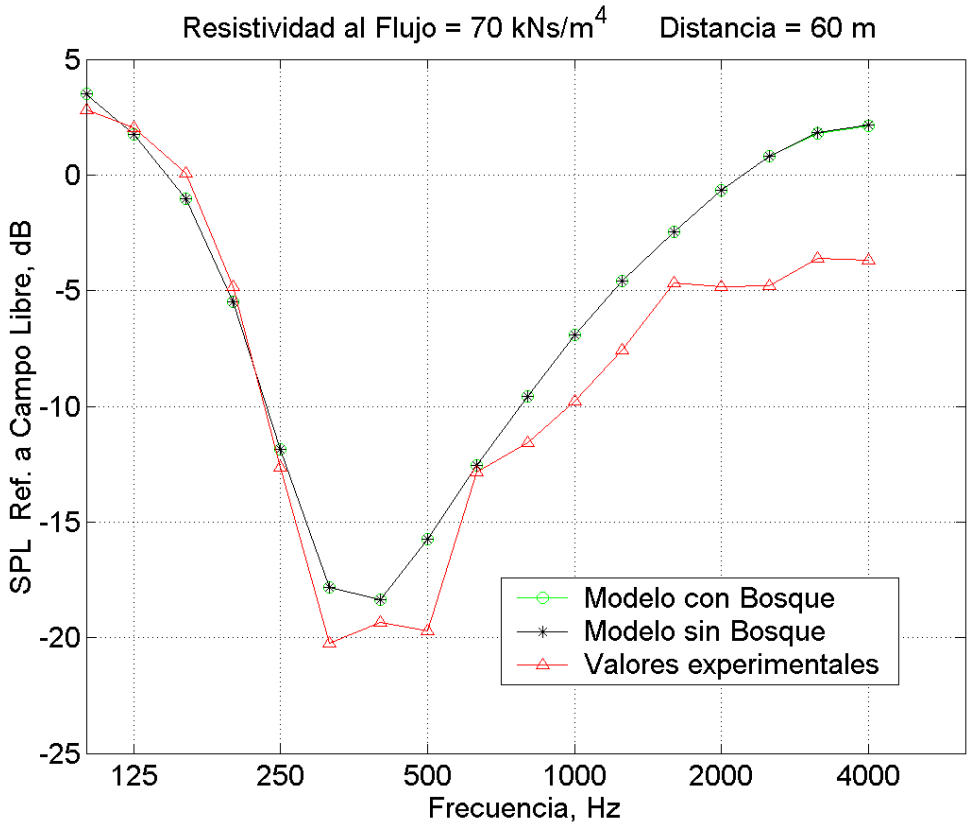
c)


Resistividad al Flujo = 100 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

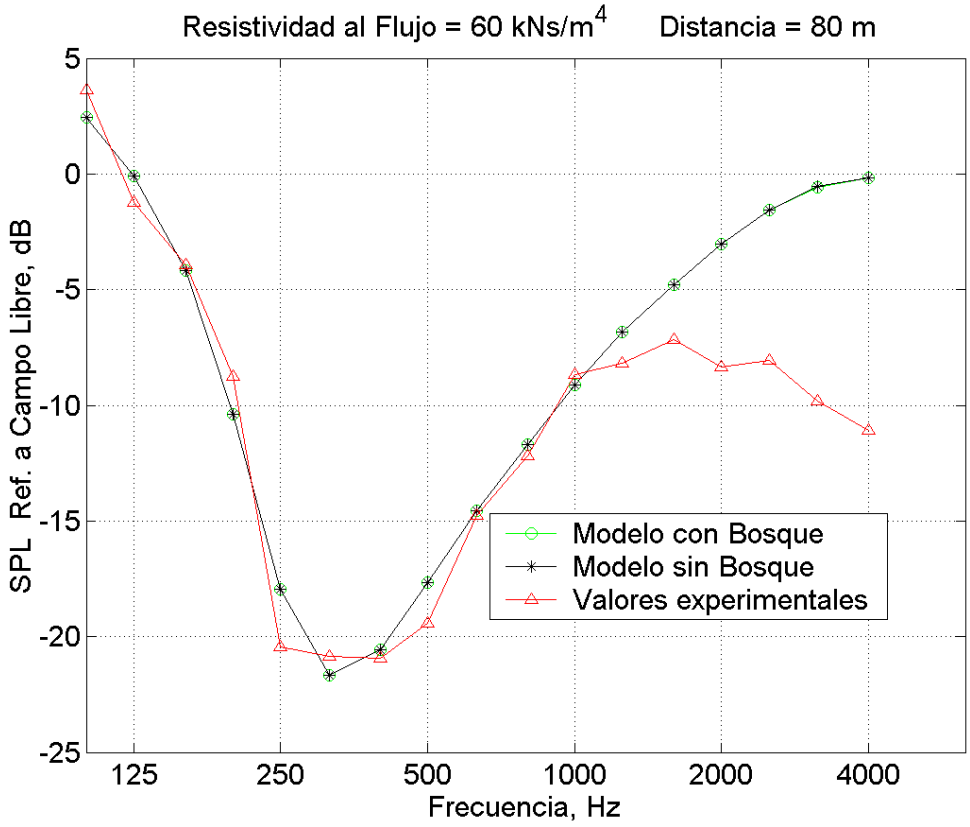
d)


Resistividad al Flujo = 80 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

e)


Resistividad al Flujo = 70 kNs/m4
Distancia = 60 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

f)


Resistividad al Flujo = 60 kNs/m4
Distancia = 80 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

7.4.2.2 - Bosque de encinas

Este bosque puede describirse como una gran extensión con encinas. Su suelo estaba muy alfombrado debido a que estaba totalmente cubierto de hojas de las encinas y mucha hierba seca formando una capa de más de 5 cm de espesor. La superficie aproximada de las hojas era de unos 3 cm^2. Las encinas eran muy diferentes unas de otras en cuanto a diámetro y altura, y se distribuían de forma muy irregular estimándose su densidad en 0.2 árboles/m^2. Sus troncos eran de diámetros muy diferentes con 0.2 m de valor medio. Una fotografía de este bosque se muestra en el anexo III.

Los resultados se representan en las gráficas de la figura 7.16 y de su análisis se puede extraer que:

A 10 m predice bien las posiciones de los máximos y los mínimos, así como sus valores. El acuerdo entre los valores teóricos y experimentales es bueno en general. A esta distancia la presencia del bosque en el modelo es poco significativa.

A 20 m también se predicen las frecuencias de los máximos y los mínimos y el comportamiento general, aunque los valores experimentales están por debajo de los predichos por el modelo.

En este bosque los resultados predichos por el modelo para una distancia de 40 m muestran un acuerdo bastante bueno con los resultados experimentales, excepto a 1000 Hz, figura 7.16d. En dicha figura también puede verse que a frecuencias altas hay una diferencia considerable, en algunas frecuencias más de 6dB, entre los valores aportados por el modelo, según que considere a los árboles

o no. Además, a frecuencias altas el exceso de atenuación debido al bosque predicho por el modelo se corrobora con los datos experimentales, resultado que no sucede en los casos anteriores.

En el bosque de encinas el diámetro de los troncos y la densidad tienen un valor grande que hace que tanto en el modelo como en los datos experimentales la presencia del bosque se manifieste de forma más notable a distancias intermedias como 40 m.

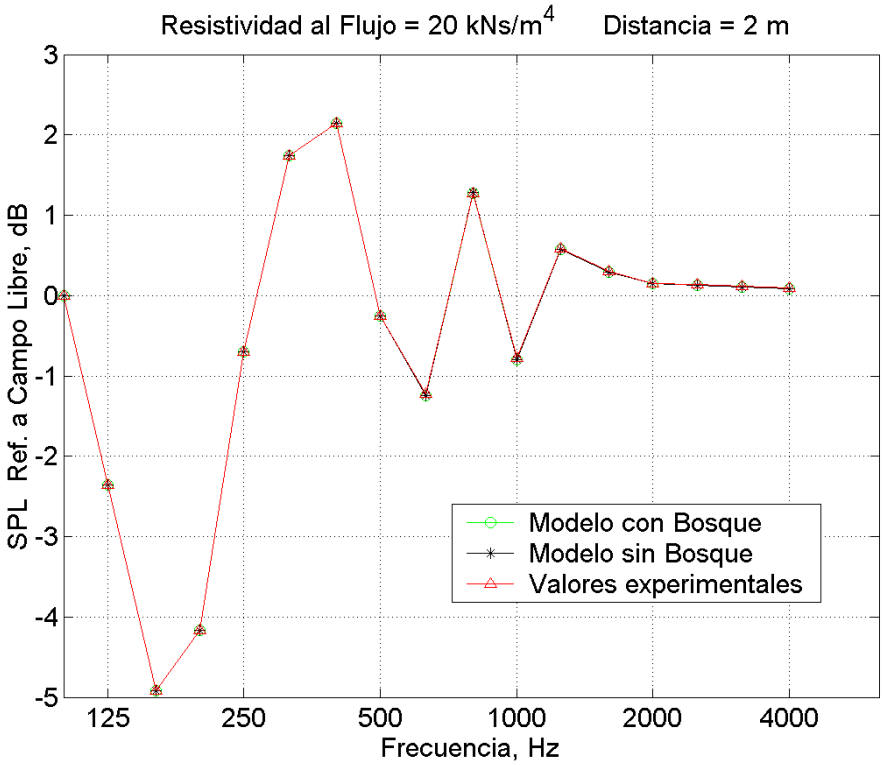
Los valores de la resistividad al flujo obtenidos para cada distancia se exponen en la tabla 7.6, todos son muy bajos, comprendidos entre 20 y 40 kNs/m^4. Este resultado parece estar de acuerdo con lo que a priori podría esperarse ya que el suelo era muy poroso, su primera capa, de más de 5 cm de espesor, estaba formada por hierbas y hojas que hacían que su impedancia fuera pequeña y por tanto que se hayan obtenido valores bajos para la resistividad al flujo.

d	**Encinas**
2	20
10	30
20	40
40	40

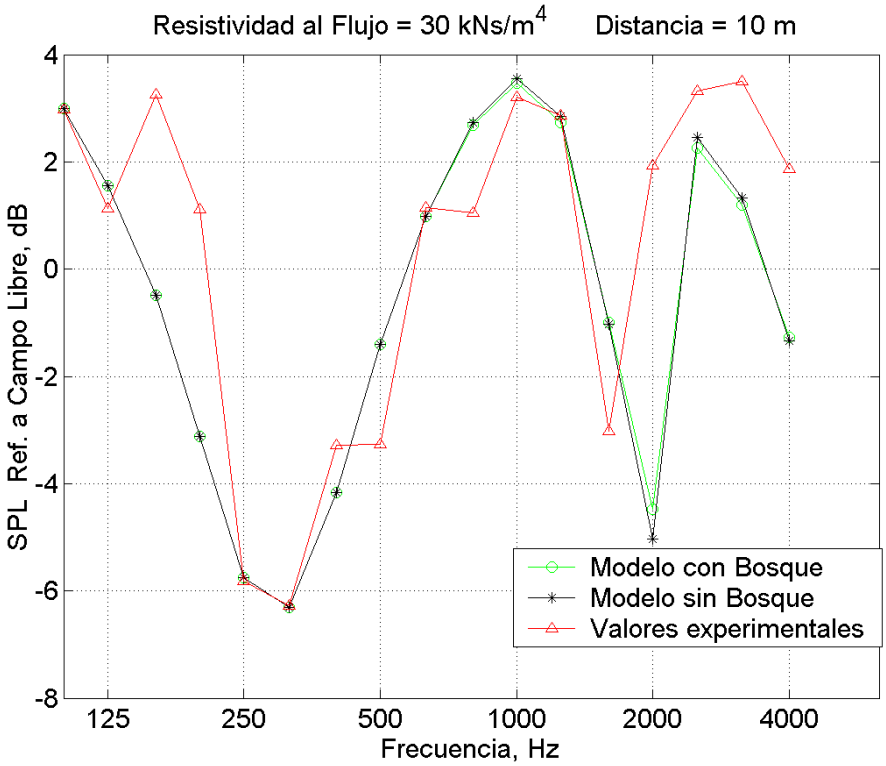
Tabla 7.6: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias d (m) fuente-receptor.

Figura 7.16: Medidas en un ***bosque de ENCINAS en Verano.*** *Comparación entre resultados predichos y medidos para diferentes distancias fuente-receptor. Temperatura = 24ºC; Humedad relativa =30 %. Altura de la fuente = 0.8 m y Altura del receptor = 1.2 m. Caracteríticas del bosque: árboles con Diámetro = 0.2 m y Altura = 4 m. Densidad = 0.2 árboles/m^2 nQ = 0.04.*

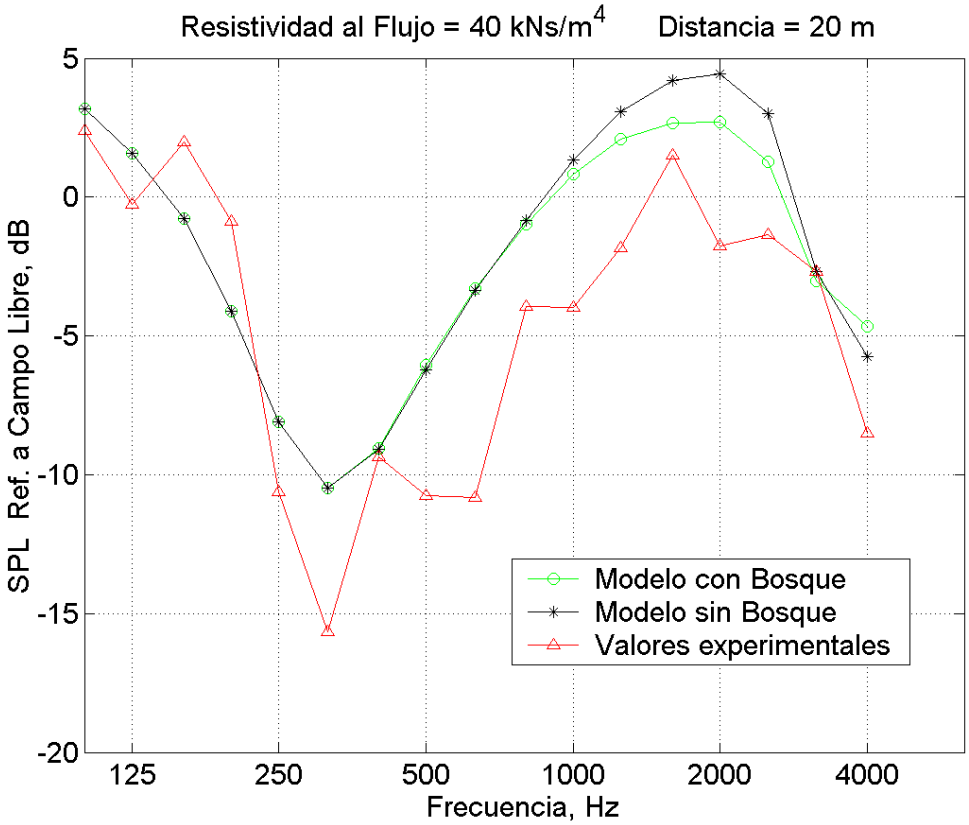
a)



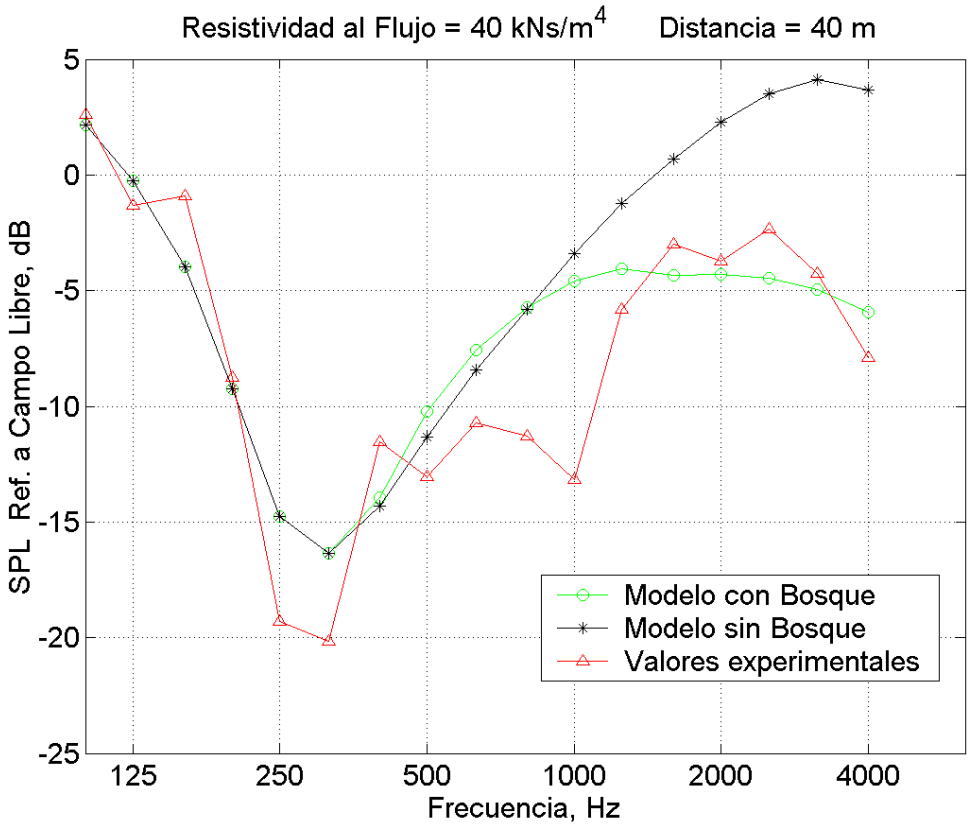
b)



c)


Resistividad al Flujo = 40 kNs/m4
Distancia = 20 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

d)


Resistividad al Flujo = 40 kNs/m4
Distancia = 40 m
SPL Ref. a Campo Libre, dB
Frecuencia, Hz
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
125
250
500
1000
2000
4000
Modelo con Bosque
Modelo sin Bosque
Valores experimentales

7.4.3 - Valores del parámetro nQ para los diferentes bosques

El parámetro nQ juega un papel importante del proceso de dispersión en el modelo y con el fin de tener una información general de los distintos lugares de medida en la tabla 7.7 se exponen el diámetro medio, d, la densidad de árboles, n" y los valores del factor nQ (que es la densidad de árboles multiplicada por el diámetro medio) para los diferentes bosques.

	Catalpas	Chopos (2 Años)	Platanos	Encinas	Chopos	Pinos 1	Pinos 2
d	0.057	0.048	0.045	0.2	0.27	0.15	0.15
n"	1.33	1.33	1.33	0.2	0.042	0.027	0.0067
nQ	0.08	0.06	0.06	0.04	0.01	0.004	0.001

Tabla 7.7: Valores del parámetro nQ para los diferentes bosques. nQ es la densidad de árboles, n", en árb/m^2, multiplicada por el diámetro medio de los árboles, d, en m.

El bosque con mayor nQ es el de catalpas, seguido de los chopos de 2 años y los plátanos. En estos tres bosques el modelo predice un efecto del bosque a partir de los 40 m para frecuencias superiores a los 2000 Hz. Sin embargo en el caso de las encinas, con menor nQ, la presencia del bosque se manifiesta a los 20 m debido a que el diámetro de los troncos es mayor que en los bosques anteriores. Los chopos tienen diámetros similares a la encinas sin embargo el nQ es menor y el modelo predice el efecto del bosque para una distancia mayor que en las encinas, 40 m, aunque la frecuencia a partir de la cual se manifiesta es menor que en los tres primeros bosques porque sus troncos son más gruesos. Los pinos tienen un valor de nQ muy pequeño y la presencia del bosque no se manifiesta en el modelo a pesar de que el diámetro de los árboles no es muy pequeño.

7.5 – DISCUSIONES GENERALES

a) Respecto al mínimo de las gráficas

En todas las gráficas anteriores aparece al menos un mínimo en el nivel de presión sonora referido a campo libre, causado por la interferencia destructiva entre el sonido directo y el reflejado en el suelo. El primer mínimo corresponde a una diferencia de fase entre ambos de π radianes, el segundo a 3π, el tercero a 5π,...Puede comprobarse que en el rango de frecuencias estudiado el número de mínimos que muestran las gráficas disminuye al aumentar la distancia fuente-receptor. Para distancias de 2 y 10 m aparecen tres mínimos en las gráficas, para 20 m solamente dos, y para distancias superiores a los 20 m únicamente aparece un mínimo. En algunos casos se ha calculado analíticamente la frecuencia a la que se produce el mínimo y el resultado era similar al mostrado con los datos experimentales

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

El valor del nivel de presión sonora referido a campo libre en el mínimo es menor cuanto mayor sea la distancia fuente-receptor.

El mínimo se traslada hacia frecuencias más bajas cuando la resistividad al flujo decrece, para una distancia fuente-receptor.

b) Respecto a la resistividad al flujo

Para un tipo de suelo dado, la resistividad al flujo que se obtiene depende de la distancia fuente–receptor y en general se ha estimado que los valores más altos de la resistividad se obtienen a distancias más cortas. Este parámetro es importante principalmente a frecuencias bajas donde el efecto del suelo es el más significativo.

Para ajustar los datos experimentales a los predichos por el modelo el

único parámetro que puede modificarse, en el modelo, es la resistividad al flujo, magnitud característica del propio suelo. Sin embargo, los datos experimentales contemplan todos los efectos, suelo, árboles, atmósfera o cualquier otro agente que se presente durante la medida, y al aumentar la distancia aumentan sus posibles efectos. Esto puede ser una de las causas de que la resistividad cambie con la distancia.

En las tablas 7.8, 7.9 y 7.10 se muestran los valores de la resistividad al flujo, en función de la distancia fuente-receptor, para todos los bosques donde se ha medido. Si se comparan los valores obtenidos en bosques con suelo de características similares, con iguales densidades y diámetro de árboles muy parecidos, como es el caso de las catalpas, los chopos de dos años y los plátanos se obtienen valores más bajos en la catalpa, árbol con hojas de mayor superficie. Para un mismo bosque, los valores de la resistividad al flujo estimados son los mismos en verano que en invierno para los árboles de hoja perenne pero para los de hoja caduca son más pequeños en verano que en invierno.

Uno de los efectos principales de los árboles en la propagación del sonido es modificar con sus raíces el suelo donde crecen y hacer que sea más blando, esto es, que tenga valores de resistividad más bajos. Esto significa que los árboles influyen en los efectos del suelo. De todos los bosques en los que se ha medido los pinos y las encinas son los más antiguos y con este estudio se ha obtenido que son los que presentan los valores más bajos de la resistividad al flujo.

	Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4)				
	Pinos(1)		**Pinos(2)**		**Encinas**
d	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
2	30	-	20	50	20
10	-	-	-	130	30
20	100	-	100	100	40
40	50	50	90	80	40
60	50	-	60	70	-
80	40	65	60	60	-

Tabla 7.8: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias d (m) fuente-receptor y diferentes lugares.

Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4)				
CHOPOS				
Distancia	Invierno (sin hojas)	Verano (con hojas)		
	Transversal	Transversal	Longitudinal	Oblicua
2	55	50	20	20
10	800	300	100	100
20	900	400	40	85
40	1000	90	50	100
60	500	100	60	80
80	400	90	60	80
87	-	100	75	70

Table 7.9: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias (m) fuente-receptor en cada una de las direcciones de medida.

	Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4)				
	CATALPAS		**CHOPOS 2 AÑOS**		**PLATANOS**
Distancia	Con hojas	Sin hojas	Con hojas	Sin hojas	Con hojas
2	30	400	50	500	200
10	300	600	250	300	300
20	50	600	200	200	160
40	60	250	110	250	90
60	35	250	80	250	110
80	60	300	-	220	-

Tabla 7.10: Valores de la resistividad al flujo (kNs/m^4) para diferentes distancias (m) fuente-receptor y diferentes lugares.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

c) Respecto al modelo

Con este estudio se ha comprobado que el modelo predice bien las frecuencias a las que se producen los máximos y los mínimos del nivel de presión sonora, referidos a campo libre, aunque en algunos casos no se obtiene el valor con exactitud.

El modelo predice comportamientos diferentes, según que se considere la presencia del bosque o no, a partir de 40 m en todos los casos estudiados excepto en las encinas donde el diámetro de los árboles es grande y se produce a 20 m. La frecuencia a partir de la cual los valores de los modelos con bosque y sin bosque son diferentes, disminuye con la distancia fuente-receptor para cada bosque.

Se ha observado que en bosques con densidad de árboles relativamente alta, pero con troncos delgados no hay diferencias significativas entre los valores predichos por el modelo con y sin bosque a cortas distancias. Ambos resultados solamente divergen a partir de 40 m para frecuencias iguales o superiores a los 2000 Hz. Este es el caso de los bosques de catalpas, chopos de 2 años y

plátanos.

El modelo concuerda bastante bien con los datos experimentales, en la mayor parte de los casos, sobre todo a frecuencias bajas y medias pero a frecuencias altas el exceso de atenuación predicho por el modelo es más pequeño que el observado experimentalmente. En cada tipo de bosque hay una distancia en la que los valores experimentales se ajustan muy bien a los predichos por el modelo en todo el rango de frecuencias estudiado, y suele estar entre 40 y 60 m.

d) Respecto a los resultados experimentales

El efecto de apantallamiento es pequeño en algunos casos pero significativo en otros como en el bosque de encinas y pinos, a pesar de ser muy baja la densidad de árboles.

La atenuación es mayor cuanto menor es la altura del receptor

Finalmente, y desde un punto de vista estrictamente experimental, puede concluirse que el exceso de atenuación asociado con la presencia de los árboles, que se manifiesta a las frecuencias altas, se observa solamente cuando la distancias fuente-receptor son superiores a 40 m, lo que nos lleva a la conclusión de que el efecto de atenuación de los árboles solamente es apreciable a partir de ciertas distancias.

A nuestro juicio uno o varios de los siguientes factores pueden explicar las desviaciones observadas entre los valores predichos y los experimentales:

a) En el modelo la atenuación del sonido está dividida en dos términos. El

primero es la atenuación, debida a las reflexiones del suelo que es calculada de la misma forma que en una superficie sin árboles, excepto por la reducción de la coherencia entre el sonido directo y el reflejado, causada por los árboles que tiende a reducir la profundidad del mínimo de interferencia. El segundo término corresponde al exceso de atenuación debido a que los troncos de los árboles pueden bloquear parcialmente la propagación, llamada atenuación de apantallamiento. La incoherencia predicha entre el campo directo y el campo reflejado en el término correspondiente a la atenuación del suelo es responsable de la divergencia entre los resultados predichos y los experimentales y en la figura 4f puede verse claramente que los efectos de la incoherencia están sobreestimados.

b) Para simplificar el problema el modelo supone que la superficie es localmente reactiva que implica que la impedancia de la superficie es independiente del ángulo de incidencia. Esta aproximación puede introducir algunos errores. En la realidad en ningún bosque el suelo era totalmente plano y homogéneo.

c) Hay que tener en cuenta que el modelo es muy general y se utiliza para distintos tipos de obstáculos, muy diferentes, como casas y árboles, y por tanto no fue desarrollado específicamente para bosques. Es importante destacar que según algunos estudios los árboles influyen de diferente manera según que tengan hojas o no y este efecto no se contempla en el modelo. Con nuestro trabajo hemos observado experimentalmente que las hojas sí contribuyen en alguna medida.

d) Las medidas fueron llevadas a cabo durante días en los que la velocidad de viento era pequeña pero realmente aún en estos casos la atmósfera puede no

ser homogénea. De hecho la velocidad del viento cerca del suelo suele ser cero pero por efecto de la fricción entre el aire y el suelo incrementa su valor en altura. Por otra parte la temperatura en la atmósfera varía en muy pocos metros, por tanto puede haber una situación aparentemente homogénea, sin viento, pero los gradientes en la velocidad del viento y en la temperatura pueden estar presentes y estos efectos son transformados en un gradiente en la velocidad del sonido que dará lugar a refracciones. Además posibles turbulencias pueden provocar fluctuaciones en la fase local del campo sonoro y cambiar los niveles de presión en el punto de observación sobre todo a frecuencias altas. Si el gradiente de la velocidad del sonido llega a ser significativo los rayos sonoros se curvan y puede crearse una zona de sombra. estos efectos derivados de la refracción no están considerados en el modelo usado en este trabajo y ésta puede ser una de las razones de las desviaciones observadas en algunos casos.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 8

MODELO A ESCALA

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

8.1 - Introducción

8.2 - Equipo de medida

8.3 - Descripción de las características de los bosques

8.4 - Metodología de muestreo

8.5 - Resultados experimentales

8.6 - Comparación de los valores experimentales y los obtenidos con el modelo teórico Nord 2000

8.7 - Comparación de los valores obtenidos en los bosques reales y los del laboratorio

8.8 - Bibliografía

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CAPÍTULO 8: MODELO A ESCALA

8.1 - INTRODUCCIÓN

Una de las formas de abordar el estudio de la propagación del sonido en exteriores en presencia de árboles, es simular la situación en el laboratorio, acomodando el suelo a las diferentes condiciones que se puedan presentar en el exterior, mediante la incorporación de láminas, de características parecidas a las del suelo real, y simulando los árboles mediante troncos hechos a escala. La emisión de la fuente ha de reunir las condiciones en frecuencia necesarias para que el fenómeno sea semejante a lo que ocurre realmente en el exterior, con sonidos habituales dentro del rango audible. Es lo que denominaremos modelos a escala.

En la bibliografía actual se han descrito varios modelos experimentales a escala [1] [5] [6] [7] relacionados con la propagación de sonido en exteriores en presencia de árboles. Teniendo en cuenta que las medidas que hemos realizado se llevaron a cabo en el Laboratorio de Acústica de la Universidad Técnica de Dinamarca, donde Rasmussen hizo sus estudios relativos a este tema, en nuestro trabajo vamos a tomar como guía los estudios realizados por K. B. Rasmussen [6,7] en este campo.

Los modelos acústicos a escala pueden introducir ciertos errores con respecto a las medidas experimentales, ya que no todos los fenómenos físicos involucrados en la propagación del sonido pueden ser transformados de acuerdo a un factor de escala lineal. La influencia de la absorción atmosférica y los

efectos de contorno son dos ejemplos claros que no pueden ser transformados de acuerdo a una escala prefijada. Sin embargo, este tipo de modelos presenta múltiples ventajas respecto a las medidas hechas en exteriores, en ellos, los parámetros físicos están perfectamente controlados y la atmósfera es homogénea e inmóvil, sin velocidad de viento, y por tanto fija, durante todo el proceso de medida. Además, se pueden reproducir las condiciones de medida sin dificultad.

En nuestro trabajo, con el modelo a escala, pretendemos abordar, fundamentalmente, dos objetivos:

a) Estudiar de forma simulada, el efecto de los árboles en la propagación del sonido en exteriores. Para ello se va a trabajar con distintos tipos de bosques en los que se varían las características como diámetro de los troncos y densidad de árboles.

b) Comparar los resultados de las medidas con los valores predichos por un modelo con el propósito de validarlo.

Para la realización del estudio se efectuaron medidas en un bosque artificial, simulado en el laboratorio, donde los árboles están representados mediante troncos de forma cilíndrica construidos con varas de madera ancladas al suelo mediante una pequeña punta, muy delgada, casi como un alfiler. El suelo consistía en un lienzo colocado sobre una superficie dura de aglomerado. La forma de colocar los troncos sobre la superficie, para el caso de un bosque irregular, puede verse en la figura 1 del anexo IV.

8.2 - EQUIPO DE MEDIDA

El procedimiento de medida se basa en producir una chispa de características apropiadas a la escala elegida. En nuestro caso se ha utilizado una fuente con un disparador que emite un sonido impulsivo y una chispa de unos 0.25 julios. Este nivel de energía se encontró que era suficientemente bajo y permite evitar los efectos no lineales siempre que la fuente de chispas estuviera a 5 cm del suelo. La fuente está construida con electrodos de 40 mm de longitud con el fin de reducir las reflexiones no deseadas y tiene una distancia entre diodos de 0.5 a 1 mm. Esta fuente está controlada por un ordenador, situado sobre un tablero, que utiliza dos procesadores ADSP2101. La cadena del receptor consiste en un micrófono, de B&K 4138 de 1/8 de pulgada, y una batería de potencia, de B&K 2804, seguida por una batería que funciona como un amplificador de ruido bajo y un filtro antialisante. El factor de escala permitido en este procedimiento era de 1:25, el mayor posible para el procedimiento utilizado.

Los resultados que se muestran en este trabajo son obtenidos en el dominio del tiempo promediados sobre 16 respuestas de impulsos, usando una frecuencia de muestreo de 600 KHz. Las respuestas promediadas se editan y se les aplica la transformada rápida de Fourier.

La teoría está basada en la Teoría de Difracción Uniforme [3] [4] combinada con fórmulas preestablecidas para la propagación del sonido sobre un suelo de impedancia finita. Esta teoría trata de ajustar las frecuencias altas, y por consiguiente algunas desviaciones deben esperarse a frecuencias bajas.

El césped, que cubre el suelo del bosque, fue modelado por una capa de lienzo o lona, sobre una superficie dura, como ya se dijo anteriormente, y su

resistividad al flujo ha sido calculada utilizando el modelo de impedancia de Delany y Bazley [2].

8.3 - DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS BOSQUES

Las medidas se han realizado en distribuciones de tres tipos, a las que denominaremos bosques, con el fin de conseguir características diferentes, pero tratando de adaptarse a algunas de las configuraciones de bosque reales en los que se han hecho medidas y cuyos resultados se han expuesto en el capítulo anterior. A cada uno de ellos nos referiremos con el nombre de bosque 1, bosque 2 y bosque 3 diferenciados por la densidad de árboles y por el diámetro de los troncos, siendo el bosque 1 de mayor densidad que el bosque 2, y este a su vez, de mayor densidad que el bosque 3.

Las densidades máximas con las que se ha trabajado en cada uno de los tres bosques han sido: 1.33, 0.2 y 0.042 árboles/m^2 respectivamente.

Aunque los diámetros de los troncos de los bosques reales elegidos eran 0.048, 0.2 y 0.27 m respectivamente, al aplicarles el factor de escala a cada uno de ellos les correspondía un valor de 1.92, 8 y 10.8 mm. Dada la dificultad operativa que se presentaba para construir los troncos con las varas de madera de dichos diámetros se aproximaron a 2, 10 y 10 mm, a los que corresponde un diámetro de 0.05, 0.25 y 0.25 m respectivamente. En la figura 8.1 se muestra una fotografía con los tres tipos de troncos con los que se ha medido.

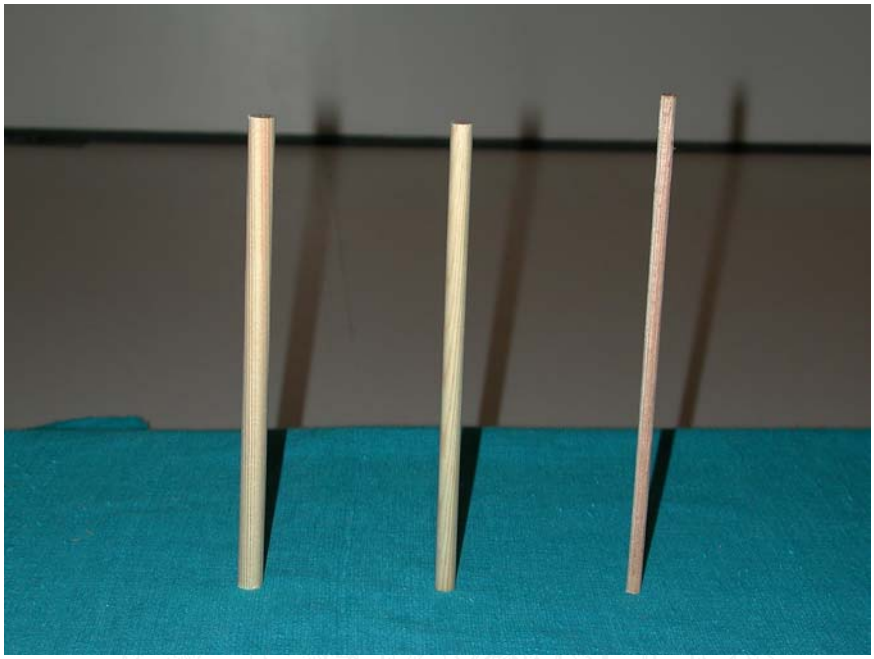


Figura 8.1: Fotografía de los tres tipos de troncos con los que se ha medido en el modelo a escala.

Los bosques 1 y 3 tienen los troncos colocados de forma regular a lo largo de hileras paralelas y equiespaciadas, con los troncos también equiespaciados dentro de una misma hilera. En el bosque 2 la distribución de los troncos fue aleatoria como se muestra en la figura 2 del anexo IV

El dato común a todos los bosques era la altura de los troncos, de valor 2.5 m que corresponde a una altura de 10 cm aplicándole el factor de escala 1:25.

8.4 - METODOLOGÍA DE MUESTREO

Ya que nuestras medidas en bosques reales, en exteriores, se efectuaron situando la fuente a una altura de 0.8 m y el receptor a 1.2 m, para las medidas en laboratorio las alturas de la fuente y el receptor fueron las correspondientes a las anteriores, según la escala 1.25.

De igual modo se confeccionaron los bosques del laboratorio procurando que sus densidades se correspondieran, dentro de lo posible, con las de los bosques reales. De esta forma, colocando la fuente y el receptor justo en los bordes opuestos del bosque, se diseñaron los bosques con unas longitudes que se corresponden con las distancias reales de 12.5 m, 25 m y 39,5 m respectivamente.

En la tabla 8.1 se muestran las características de cada uno de los tres bosques estudiados y las condiciones de medida que se han seguido en cada caso, y en la tabla 8.2 los valores correspondientes al aplicarles el factor de escala 1:25.

	Bosque 1	**Bosque 2**	**Bosque 3**
Altura Fuente (m)	0.8	0.8	0.8
Altura Receptor (m)	1.2	1.2	1.2
Altura Troncos (m)	2.5	2.5	2.5
Diámetro Troncos (m)	0.05	0.25	0.25
Densidad Max (árb/m^2)	1.33	0.2	0.042
Distancia F-R (m)	12.5	25	39.5

Tabla 8.1: Datos de las condiciones de medida para los diferentes tipos de bosques.

	Bosque 1	**Bosque 2**	**Bosque 3**
Altura Fuente (m)	0.032	0.032	0.032
Altura Receptor (m)	0.048	0.048	0.048
Altura Troncos (m)	0.1	0.1	0.1
Diámetro Troncos (m)	$2\cdot10^{-3}$	$10\cdot10^{-3}$	$10\cdot10^{-3}$
Densidad máxima (árb/m^2)	1.33	0.2	0.042
Distancia F-R (m)	0.5	1	1.58

Tabla 8.2 : Datos correspondientes a los de la tabla 8.1 aplicándoles el factor de escala 1:25

Uno de los factores que queremos observar es la influencia de la densidad de árboles. Para estudiarla, en todos los bosques, después de medir con la densidad de árboles máxima correspondiente, ρ, se redujo el número de árboles hasta que la densidad fuera la mitad, ρ/2, posteriormente la cuarta parte de la inicial, ρ/4, por último, se midió sin árboles, ρ=0. La forma de disminuir la densidad de los bosques 1 y 3 consistía en aumentar la distancia entre los troncos de una misma hilera y se mantenía fija la distancia entre hileras. Para el caso del bosque 2, con una distribución aleatoria, también se varió la densidad y en las figuras 2, 3 y 4 del anexo IV se muestran respectivamente los esquemas correspondientes a la máxima densidad, 0.25 árboles/m^2, la mitad de la anterior 0.13 árboles/m^2, y la cuarta parte de la primera 0.06 árboles/m^2.

En el proceso de medida el ordenador está configurado para aportar el

espectro en frecuencias y en el tiempo. En ambos casos se les corrige aplicándoles una ventana temporal para eliminar las posibles reflexiones en el techo, las paredes, los bordes de la mesa, etc. Los valores con los que vamos a trabajar son niveles de presión sonora que se normalizan para que sean relativos a campo libre, para ello se utiliza un fichero de normalización en cada caso en el que las medidas se han realizado con la fuente y el receptor elevados 6.25 m, que en el modelo a escala corresponden a 25 cm, con la intención de que los rayos reflejados en el suelo tengan un recorrido mayor, y por tanto, tarden más tiempo en llegar al receptor que el rayo directo, lo que permite distinguir las señales procedentes del sonido directo de las originadas por la composición del directo con el reflejado.

BIBLIOTECA VIRTUAL

Los valores se obtenían para bandas de frecuencias de 24 Hz de anchura. Al ser bandas tan estrechas, el número de datos registrados fue muy elevado y para facilitar la visualización en las gráficas, sobre todo a frecuencias altas, se han agrupado en tercios de octava.

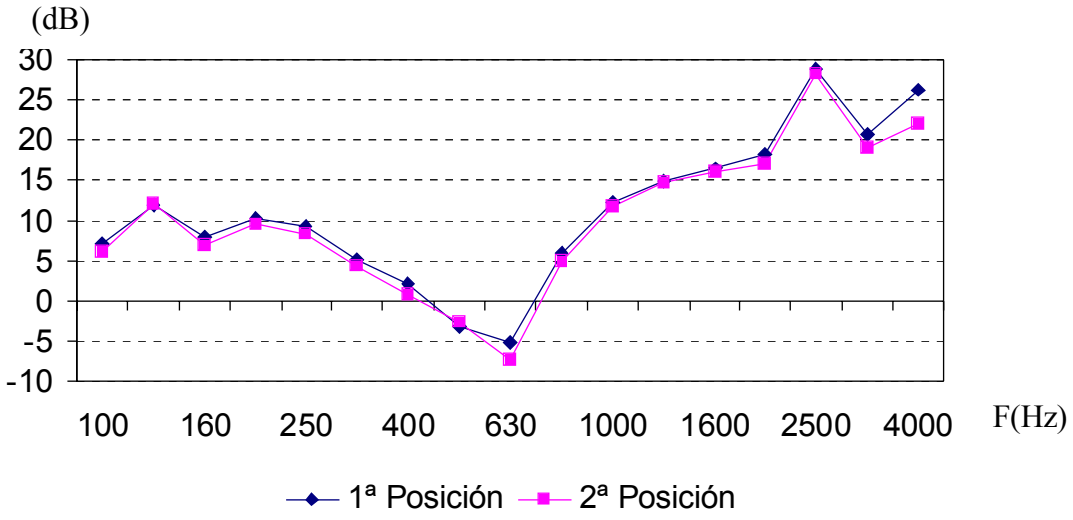


Figura 8.2: Resultados obtenidos para cada frecuencia, cambiando la posición de la fuente por la del receptor y viceversa.

Antes de empezar las medidas en los bosques se comprobó que se cumplía el principio de reciprocidad al cambiar la posición de la fuente por la del receptor y viceversa. Los resultados obtenidos en el receptor en ambas posiciones se muestran en la figura 8.2 y las diferencias entre ambos casos para cada frecuencia se representan en la figura 8.3. Según se deduce de estas gráficas el principio de reciprocidad se cumple con bastante exactitud en todo el rango de frecuencias excepto a 4000 Hz.

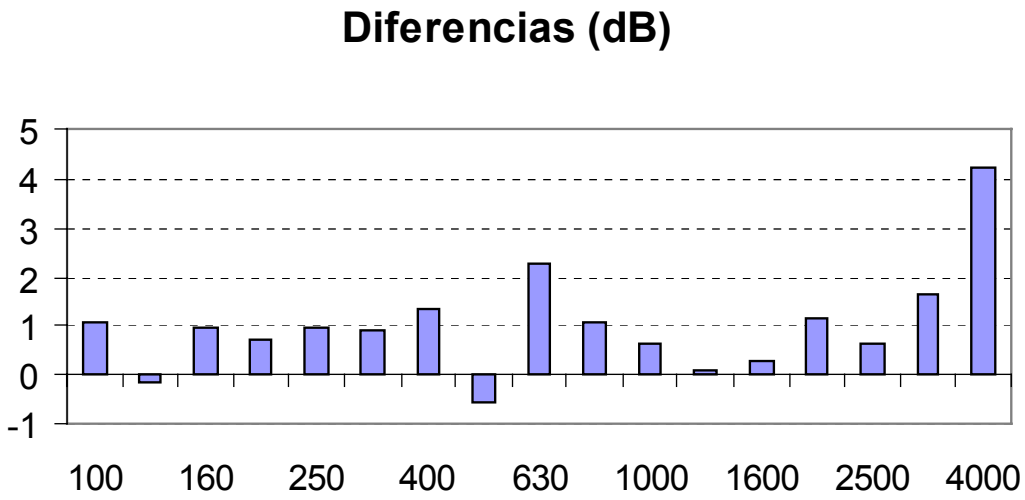


Figura 8.3: Diferencias que se obtienen en el SPL para cada frecuencia, cambiando la posición de la fuente por la del receptor y viceversa.

8.5 – RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación analizaremos los resultados obtenidos en las medidas realizadas para los bosques 1, 2 y 3 que se exponen en las figuras 8.4, 8.5 y 8.6 respectivamente. Hay que recordar, a la hora de analizar los resultados experimentales, que la máxima distancia fuente-receptor ha sido de 39,5 m y la

influencia de los árboles se pone de manifiesto principalmente a grandes distancias.

Bosque 1

Como se expuso anteriormente el bosque 1 es un bosque de distribución regular, con densidad elevada (1.33 árboles/m^2) y sus troncos son de diámetros estrechos (0.05 m). Los resultados obtenidos para las densidades indicadas se exponen en la figura 8.4.

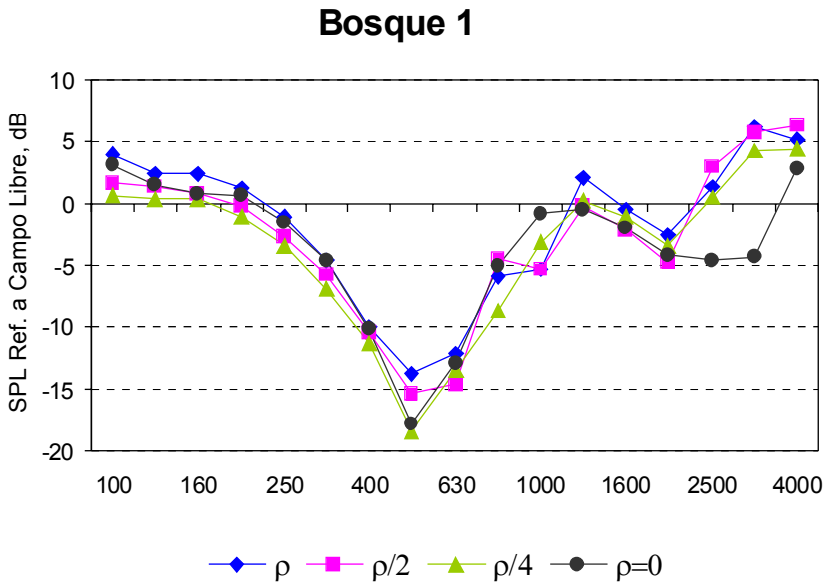


Figura 8.4: SPL Ref. a campo libre frente, a la frecuencia, para el bosque 1. Sin árboles y con árboles para tres densidades diferentes.

En esta figura puede observarse que no se aprecian diferencias sustanciales en los cuatro casos de densidades diferentes. No obstante, cabe poner de manifiesto que el mínimo que aparece a la frecuencia de 500 Hz es más profundo cuanto menor es la densidad. Esto indica que, un mayor numero de

árboles por metro cuadrado, contribuye en mayor medida a aumentar la incoherencia, y por tanto, enmascara la interferencia destructiva dando lugar a un nivel mayor. Para casi todas las frecuencias, los niveles de presión sonora referidos a campo libre son más elevados cuanto mayor es la densidad. Esto puede ser debido a que el efecto fundamental de los troncos es la dispersión y no la absorción y por tanto no se origina caída de nivel de presión sonora sino incremento. Cuando ρ es grande como en este caso, predomina la dispersión frente a la absorción y hace que aumenten los valores del nivel de presión referidos a campo libre.

Los niveles de presión sonora para el caso de suelo sin árboles, $\rho=0$, para la mayoría de las frecuencias, son menores que los obtenidos cuando el bosque tiene la densidad máxima.

Bosque 2

Según se expuso anteriormente, el bosque 2 es un bosque de distribución irregular, con una densidad menor que en el caso anterior, 0.2 árboles/m^2, pero sus troncos son de diámetro 0.25 m, mucho mayor que en el bosque 1. Los resultados de las medidas realizadas en este medio, con cuatro densidades diferentes, se exponen en la figura 8.5 donde se muestra que los valores del nivel de presión sonora, referidos a campo libre, son más bajos cuando hay bosque que cuando no lo hay, (la gráfica correspondiente a $\rho=0$ está sistemáticamente por encima de las otras). Además, el mínimo de interferencia se produce para una frecuencia más baja cuando hay árboles que cuando no los hay, y ocurre como si los árboles aumentaran la diferencia de caminos entre la onda directa y la reflejada. Desde 100 Hz hasta 400 Hz (frecuencia a la que se produce el mínimo de interferencia cuando la densidad es distinta de cero) se obtienen prácticamente los mismos valores para las tres densidades de árboles, pero para frecuencias superiores a 1 KHz el nivel de presión sonora es más bajo cuanto

mayor es la densidad y en casi todos los casos está siempre por debajo del valor obtenido sin árboles. Es decir, la presencia del bosque es muy significativa. Creemos que este resultado es consecuencia directa de que este bosque tiene valores más altos para el diámetro de los troncos. Si bien es verdad que en el bosque 1 la densidad es mucho mayor que en el bosque 2, el efecto del bosque es menos significativo debido al valor tan pequeño del diámetro de sus troncos.

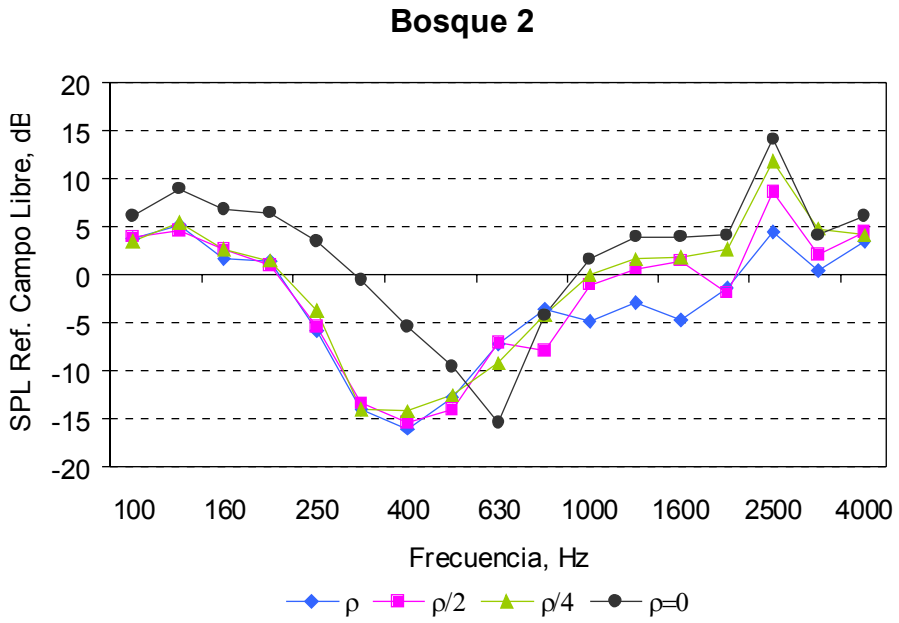


Figura 8.5: SPL Ref. a campo libre, frente a la frecuencia, para el bosque 2. Sin árboles y con árboles para tres densidades diferentes.

Bosque 3

El bosque 3 también es un bosque de distribución regular, con densidad mucho menor que en los casos anteriores (0.042 árboles/m^2) pero con troncos de diámetro 0.25 m, igual que en el bosque 2. Los resultados de las medidas realizadas con cuatro densidades diferentes, se exponen en la figura 8.6 en la que puede observase que las gráficas obtenidas con cada una de las cuatro densidades son de formas semejantes en todas ellas, y el mínimo se produce a

315 Hz, frecuencia menor que en los casos anteriores. En este caso la densidad es baja y los efectos de dispersión son menos importantes que en los casos anteriores.

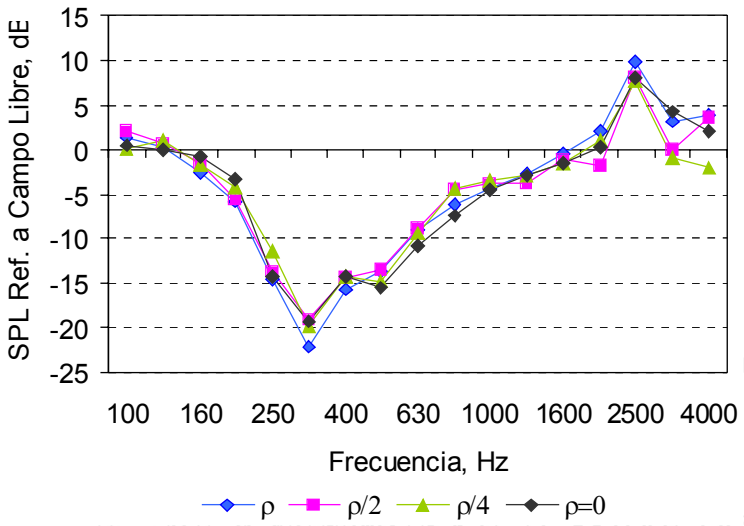


Figura 8.6: SPL Ref. a campo libre, frente a la frecuencia, para el bosque 3. Sin árboles y con árboles para tres densidades diferentes.

8.6 - COMPARACIÓN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y LOS OBTENIDOS CON EL MODELO TEÓRICO NORD 2000

Los valores experimentales obtenidos en los tres bosques del laboratorio se han comparado con los aportados por el modelo teórico descrito en la sección 6.4 y se ha trabajado de la misma forma que se expuso en la sección 7.4 para los distintos casos.

En las gráficas de las figuras 8.7, 8.8 y 8.9 se representan los valores aportados por el modelo teórico y los obtenidos experimentalmente en el

laboratorio, para los bosques 1, 2 y 3 respectivamente, en los siguientes casos:

a) Valores experimentales correspondientes a la medida sin árboles, densidad nula, y los aportados por el modelo cuando no contempla el efecto del bosque.

b) Valores experimentales con densidad máxima y los aportados por el modelo con y sin contemplar el efecto del bosque.

c) Valores experimentales con la mitad de densidad que en el caso b) y los aportados por el modelo con y sin contemplar el efecto del bosque.

d) Valores experimentales con una densidad cuatro veces menor que la máxima y los aportados por el modelo con y sin contemplar el efecto del bosque.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Con carácter general puede apreciarse en estas gráficas que el modelo describe con cierta fiabilidad la evolución del exceso de atenuación con la frecuencia, aunque con ciertas diferencias para alguno de los valores. De esta forma los mínimos y máximos dados por el modelo aparecen para las frecuencias obtenidas experimentalmente. Los valores aportados por el modelo son bastante similares a los experimentales en la mayoría de las situaciones estudiadas, excepto en los mínimos. Sin embargo, aparece un hecho que aparentemente es contradictorio, en el sentido de que para el primer mínimo su valor es menor en el caso experimental que en el del modelo, mientras que, en el segundo mínimo, si aparece, ocurre lo contrario. Esto puede ser debido a que intervengan otros factores que no son contemplados en el modelo

Bosque 1

Sus resultados se muestran en la figura 8.7 y en ella se observa que:

- El valor del primer mínimo experimental es mayor, en valor absoluto,

que el predicho por el modelo para el suelo sin árboles y para las 3 densidades de árboles, figura 8.13 a, b, c y d respectivamente.

- Al ser la distancia fuente-receptor pequeña, 12.5 m, en las gráficas aparecen 2 mínimos de interferencia. El segundo mínimo de interferencia se produce para una frecuencia de 2000 Hz, algo menor que la predicha por el modelo, 2500 Hz, para las tres densidades con las que se ha medido. Además la profundidad del mínimo experimental es mayor que la predicha por el modelo, lo contrario de lo que ocurre con el primer mínimo.

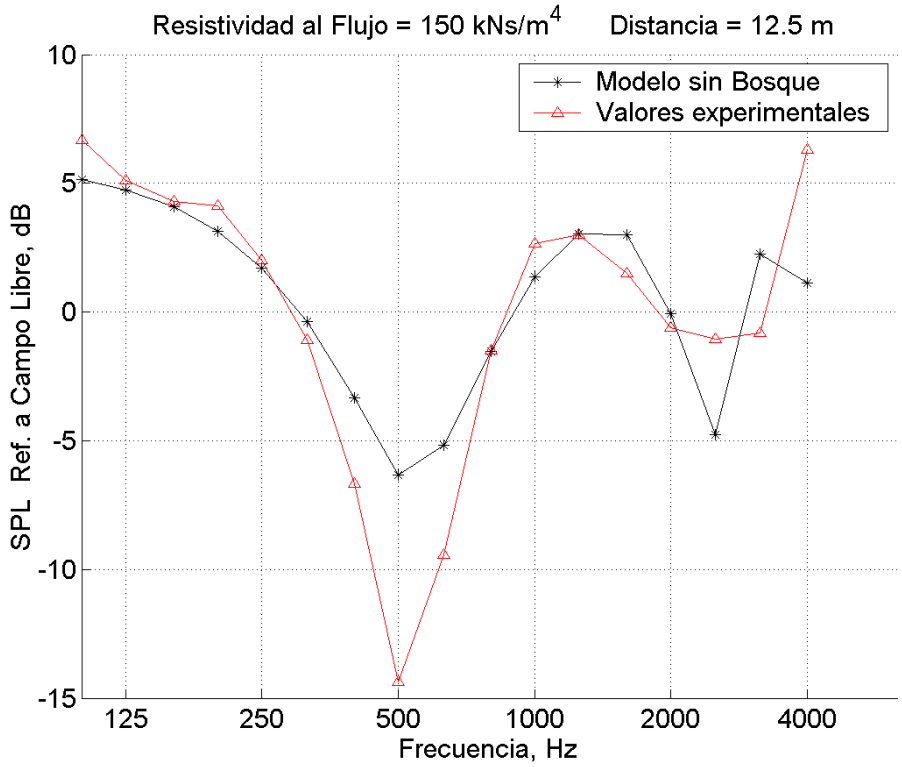
- Es el bosque, de los tres con los que se ha trabajado, en el que se presentan mayores discrepancias entre los valores medidos y los predichos por el modelo para todas las densidades, sobre todo a frecuencias altas.

MIGUEL DE CERVANTES

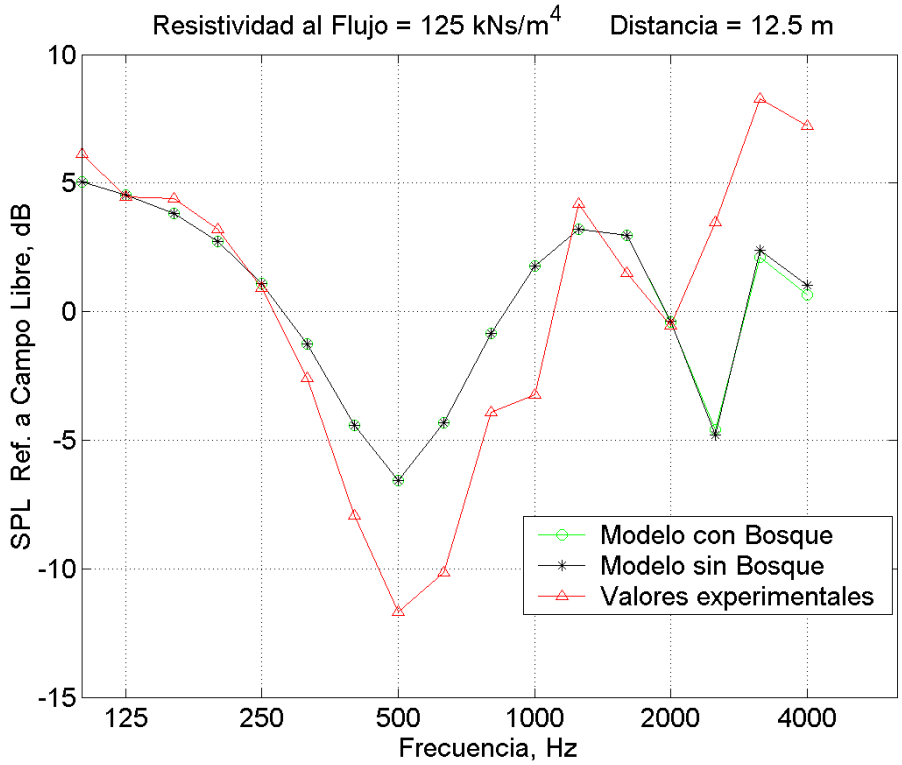
*Figura 8.7: Medidas realizadas en el **BOSQUE 1**. Comparación de los resultados predichos y medidos con un modelo a escala (1:25). Condiciones de medida: Temperatura = 17ºC; Humedad relativa =65 %. Distancia fuente-receptor = 12.5 m. Altura de la fuente = 0.8 m y altura del receptor = 1.2 m. Árboles con Diámetro = 0.05 m y Altura = 2.5 m.*

a)Sin árboles. b) Densidad = 1.33 árboles/m²

a)



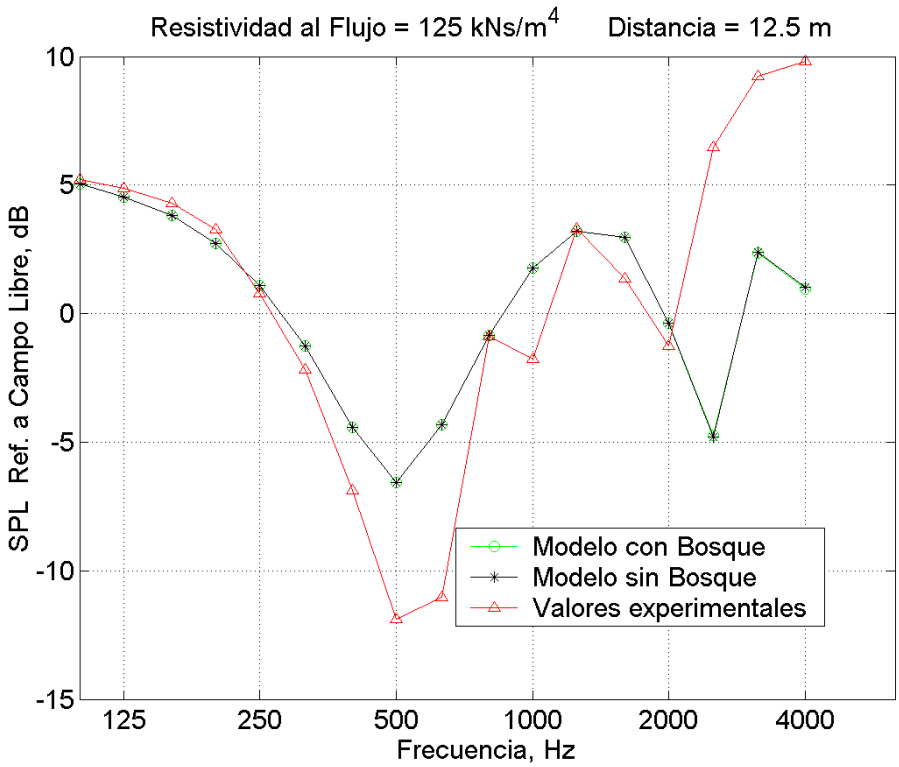
b)



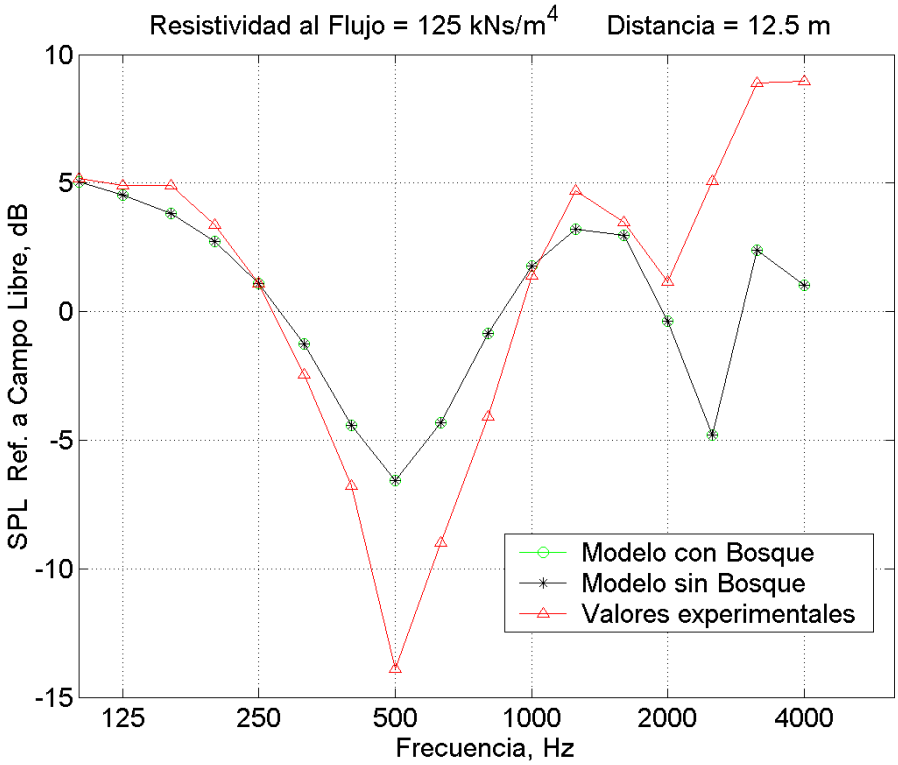
c) Densidad = 0.66 árboles/m²

d) Densidad = 0.33 árboles/m²

c)



d)



Bosque 2:

Los resultados se muestran en las gráficas de la figura 8.8 donde se pone de manifiesto algo que también sucedía en el caso anterior.

En todos los casos el mínimo de la curva experimental está por debajo del mínimo predicho por el modelo (aproximadamente 5 dB), es decir, para esa frecuencia hay más absorción que la que predice el modelo.

Los resultados predichos con y sin bosque son prácticamente coincidentes, a excepción del caso b) donde la densidad es mayor y al ser un bosque con diámetro de troncos mayor que en el caso del bosque 1 el modelo predice un efecto debido al bosque a frecuencias altas.

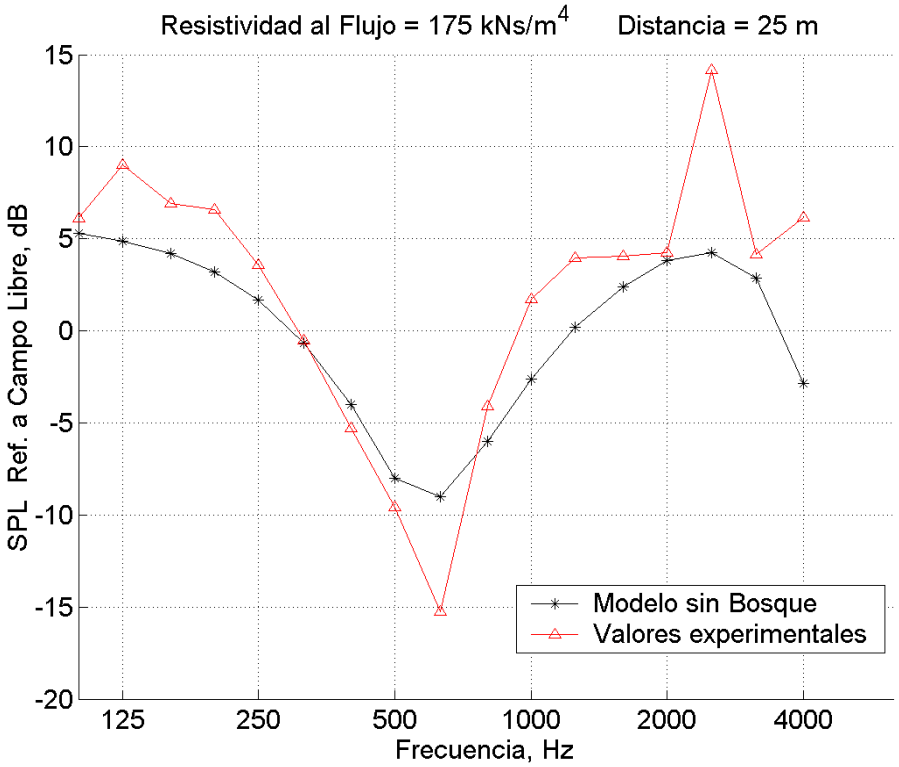
Experimentalmente se detecta un máximo a frecuencias altas que el modelo no predice.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

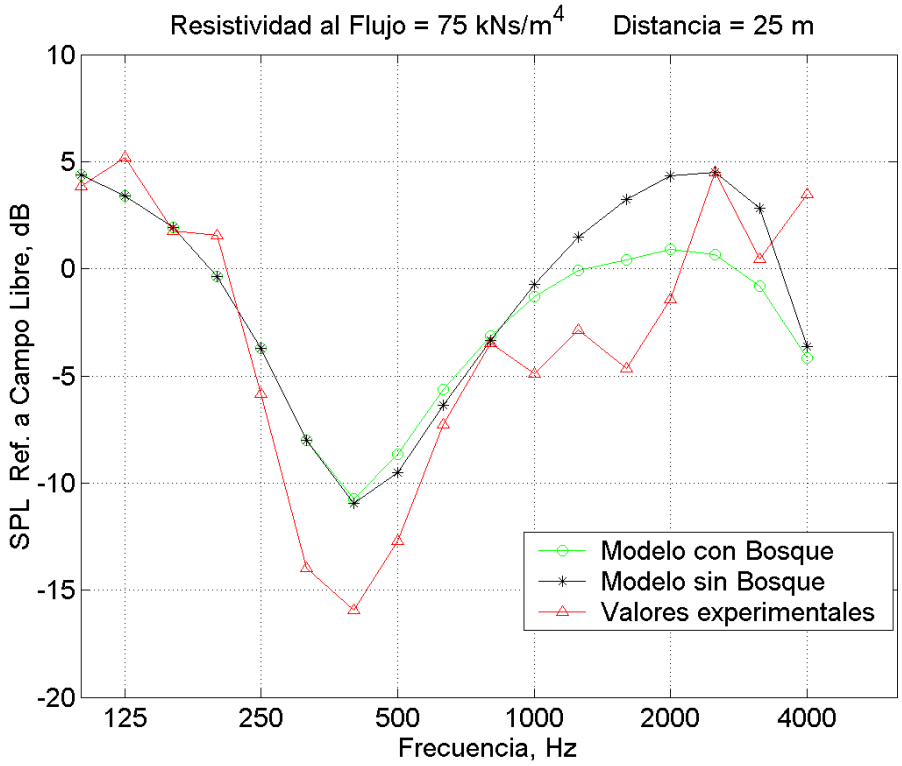
*Figura 8.8: Medidas realizadas en el **BOSQUE 2**. Comparación de los resultados predichos y medidos con un modelo a escala (1:25). Condiciones de medida: Temperatura = 17ºC; Humedad relativa =65 %. Distancia fuente-receptor = 25 m. Altura de la fuente = 0.8 m y altura del receptor = 1.2 m. Árboles con Diámetro = 0.25 m y Altura = 2.5 m.*

a)Sin árboles. b) Densidad = 0.2 árboles/m²

a)



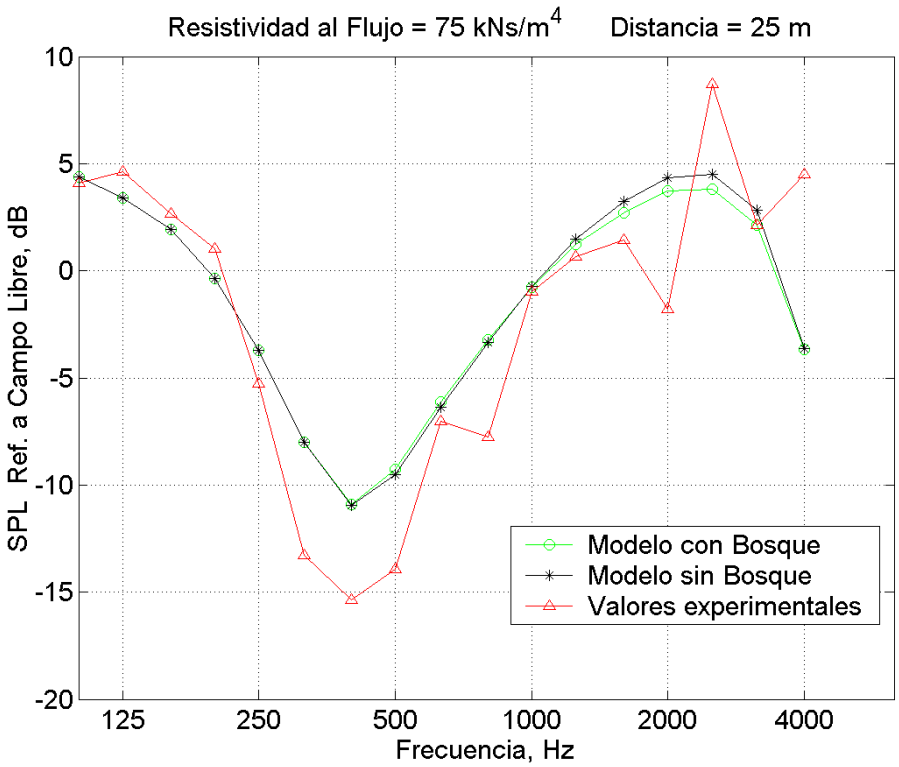
b)



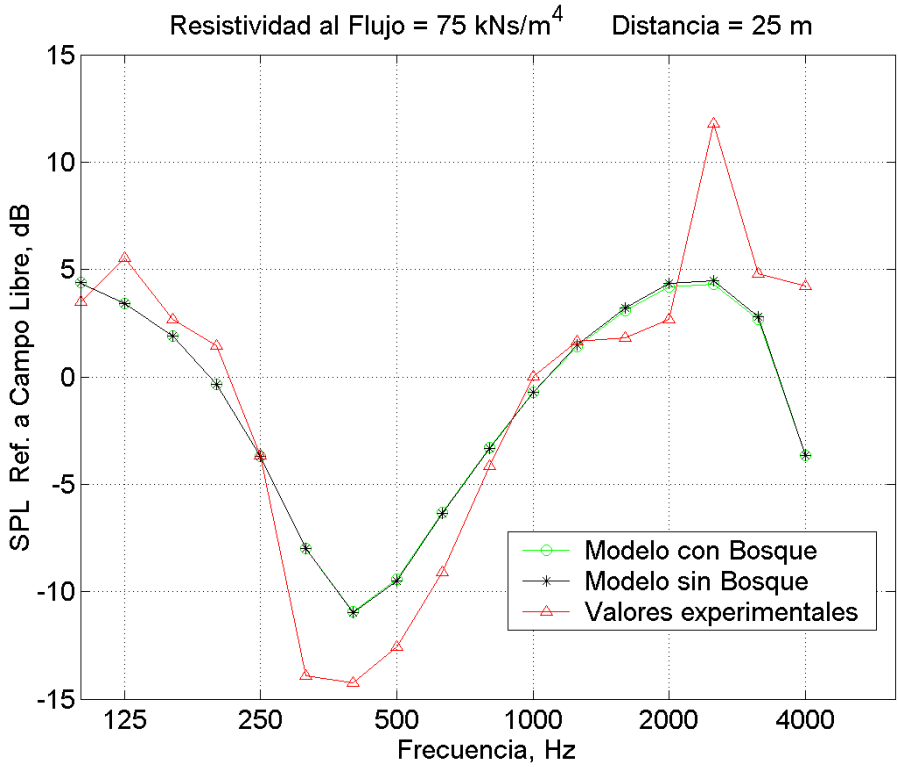
c) Densidad = 0.1 árboles/m²

d) Densidad = 0.05 árboles/m²

c)



d)



Bosque 3

Los resultados se presentan en las gráficas de la figura 8.9. En ella se puede ver que los valores experimentales obtenidos en este bosque se aproximan bastante a los aportados por el modelo para las cuatro densidades y mejor para el caso de mayor densidad.

El mínimo de los valores experimentales sigue estando por debajo del predicho por el modelo para las cuatro densidades como en los bosques anteriores.

El máximo que aparece en las frecuencias altas en los valores experimentales no se presenta en los valores teóricos.

Los valores predichos por el modelo con bosque y sin bosque son similares.

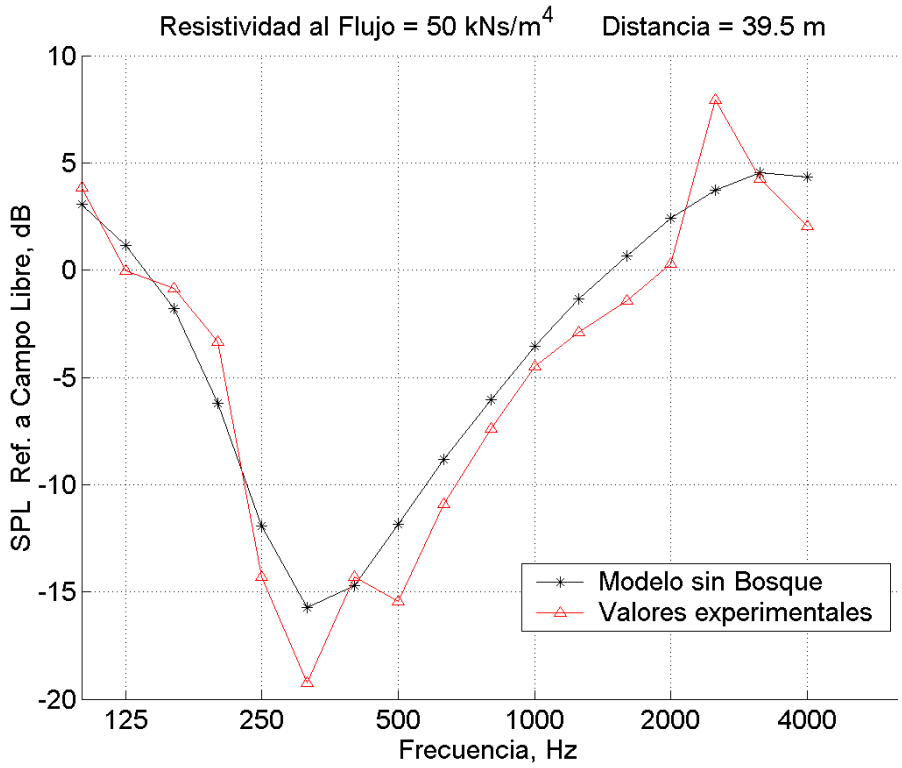
En el caso a) los valores medidos están siempre por debajo de los predichos para las frecuencias medias y altas.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

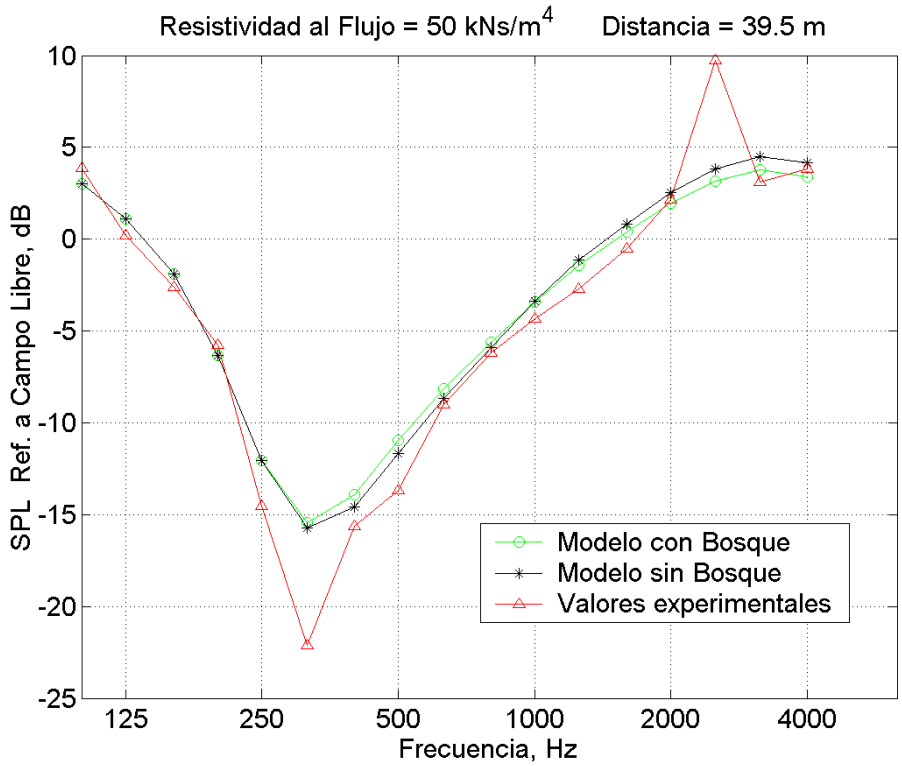
*Figura 8.9: Medidas realizadas en el **BOSQUE3**. Comparación de los resultados predichos y medidos con un modelo a escala (1:25). Condiciones de medida: Temperatura = 17ºC; Humedad relativa =65 %. Distancia fuente-receptor = 39.5 m. Altura de la fuente = 0.8 m y altura del receptor = 1.2 m. Árboles con Diámetro = 0.25 m y Altura = 2.5 m.*

a)Sin árboles. b) Densidad = 0.042 árboles/m²

a)



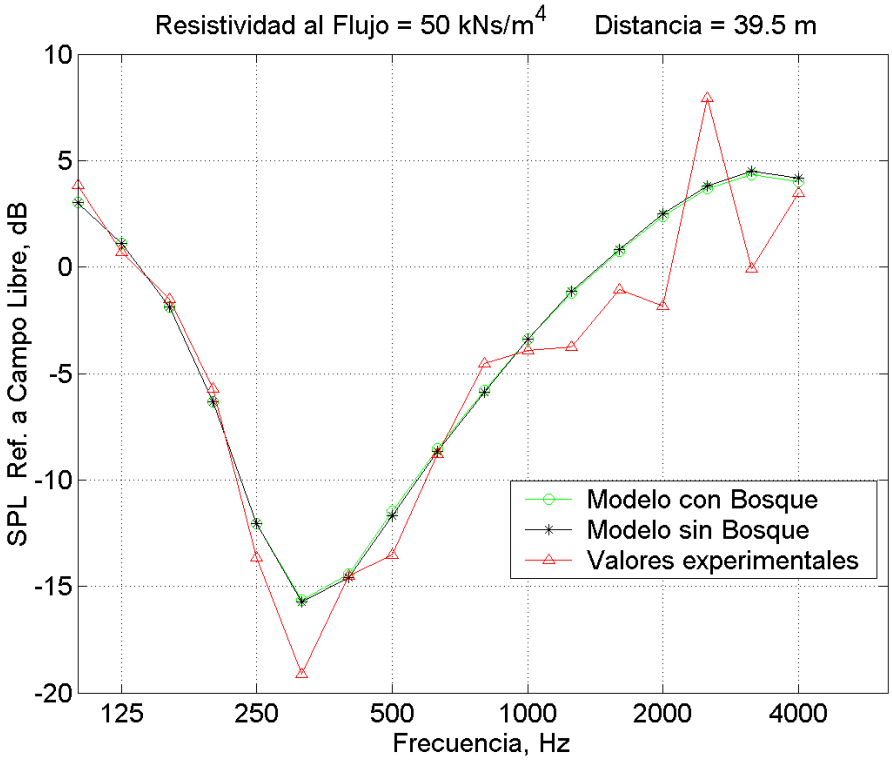
b)



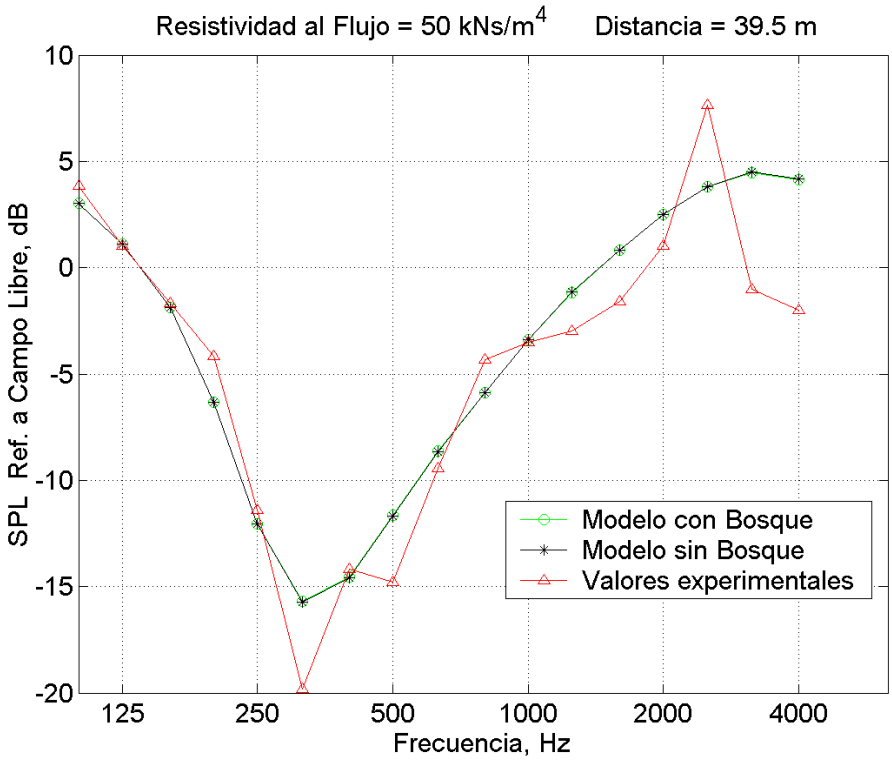
c) Densidad = 0.021 árboles/m²

d) Densidad = 0.0105 árboles/m²

c)



d)



A modo de resumen con los datos de las gráficas de las figuras 8.7, 8.8 y 8.9 se ha construido la tabla 8.3 donde se exponen los valores de la resistividad al flujo en cada bosque, para las diferentes densidades. El bosque 1, con mayor densidad de árboles y de menor diámetro es el que tiene mayor valor de resistividad al flujo. Esta variación de la resistividad es consecuencia de la modificación de las condiciones del suelo al incorporar los árboles.

	Bosque 1 (ρ=1.33)	**Bosque 2** (ρ=0.2)	**Bosque 3** (ρ=0.042)
σ (ρ)	125	75	50
σ (ρ/2)	125	75	50
σ (ρ/4)	125	75	50
Diámetro troncos (m)	0.048	0.2	0.27
Distancia F-R (m)	12.5	25	39.5

Tabla 8.3: Valores de la resistividad al flujo, σ, (KNs/m^4) para cada una de las densidades, árb/m^2, en cada bosque

8.7 - COMPARACIÓN DE LOS VALORES OBTENIDOS EN LOS BOSQUES REALES Y LOS DEL LABORATORIO

De las tres configuraciones de bosques realizadas en el laboratorio sólo para el bosque 3, con semejantes características que el bosque de chopos, tenemos una geometría de medida casi similar a la del bosque real. La única diferencia en la forma de llevar a cabo las medidas en ambos casos fue que la

distancia fuente-receptor en el bosque simulado era de 39.5 m y en el real de 40 m.

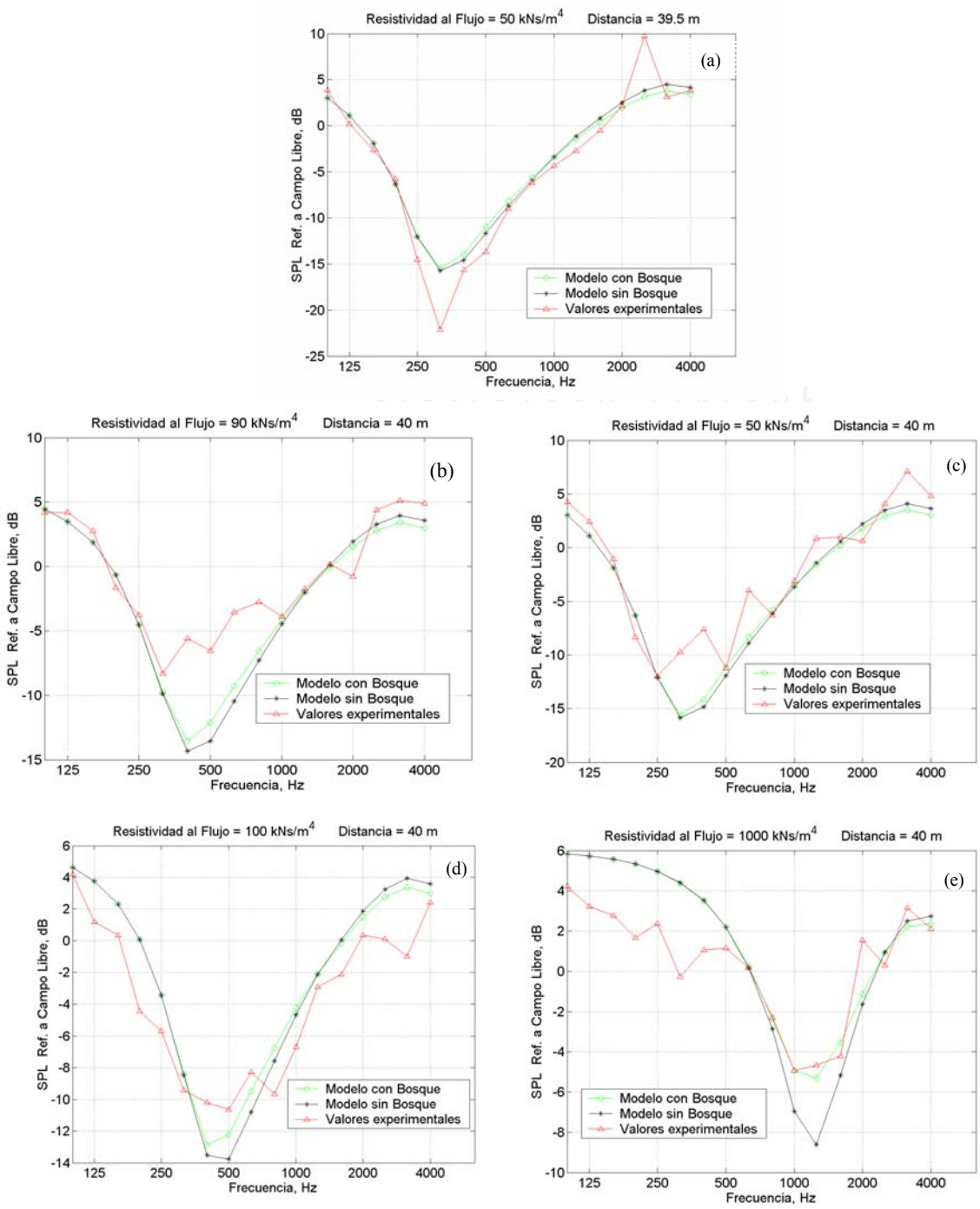


Figura 8.10: Valores de SPL ref. a campo libre teóricos y experimentales, en laboratorio (a) y en bosques reales (b,c,d).

Si se comparan las medidas experimentales en laboratorio, realizadas con el modelo a escala en el bosque 3, figura 8.9 b, y que se expone de nuevo en la figura 8.10 a, con las medidas en exteriores, realizadas en el bosque real de chopos a 40 m, figura 7.1d, 7.2d, 7.3d, árboles con hojas, y 7.4d, árboles sin hojas, y que se exponen de nuevo en la figura 8.10 b, c, d y e respectivamente se observa que las discrepancias entre las figuras 8.10 a y 8.10 b, medidas ambas en dirección transversal, se presentan fundamentalmente en las frecuencias medias, en las medidas de exteriores aparece un comportamiento diferente al obtenido con el modelo teórico y con las medidas en el laboratorio. Únicamente podemos decir que pueda ser debido a parámetros meteorológicos no tenidos en cuenta.

En las medidas de laboratorio el mínimo está por debajo del predicho por el modelo, lo contrario de lo que se obtiene en las medidas de los bosques reales. Además, en el mínimo experimental el valor del SPL ref. a campo libre es menor en las medidas del laboratorio que en las de los bosques reales.

8.8 - BIBLIOGRAFÍA

[1] Bullen, R. and Fricke, F. Sound Propagation Through Vegetation. J. of Sound and Vibration 80(1), 11-23. 1982.

[2] Delany, M. E. and Bazley. Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials. Applied Acoustics 3, 105-116. 1970.

[3] Keller, J. B. Geometrical theory of diffraction. Journal of the Optical Society of America 52, 116-130. 1962.

[4] kouyoumjian, R. G. and Pathak, P. H. A Uniform Geometrical theory of Diffracction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface. Proceedings of

the IEEE 62(11). 1974.

[5] Leschnik, W. Sound Propagation in Urban and Forest Areas. Acustica 44(1), 14-22. 1980.

[6] Rasmussen, K. B. Scale model simulation of sound propagation over an impedance discontinuity. Inter noise 93 proceedings, Leuven, Belgica, 1711-1714. 1993.

[7] Rasmussen, K. B. Model experiments related to outdoor propagation over an earth berm. J. Acoust. Soc. Am. 96(6), 3617-3620. 1994.

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CONCLUSIONES

PROPUESTAS DE MEJORA AL MODELO

TRABAJOS FUTUROS

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

CONCLUSIONES

De lo expuesto en el desarrollo efectuado en esta tesis extraemos, de forma resumida, aquellos puntos del trabajo que a nuestro juicio son más relevantes y que constituyen el núcleo fundamental de nuestras aportaciones al fenómeno de la propagación del sonido en exteriores, teniendo en cuenta la presencia del suelo y de un tipo determinado de obstáculos, los árboles.

Comenzamos este trabajo haciendo un análisis previo de los estudios ya realizados por otros autores, con el fin de conocer las líneas en que se están centrando los esfuerzos y prever aquellos aspectos sobre los que nosotros podemos realizar alguna aportación relevante por su novedad, o por afianzar los resultados obtenidos por otros. Ello nos ha llevado a realizar un estudio exhaustivo y pormenorizado de los distintos modelos que se exponen en la bibliografía, así como de los resultados obtenidos, y de esta forma poder seleccionar el modelo de propagación que mejor se adapte a nuestras necesidades según los objetivos propuestos, aún no encontrando un modelo que abarque todos los fenómenos que se presentan en el proceso de la propagación, como pueden ser las refracciones y las turbulencias atmosféricas.

Una vez seleccionado el modelo, basado en el de Weyl-Van der Pol como modelo de partida, en el que se tiene en cuenta la presencia del suelo, se fue complementando posteriormente con nuevos términos relacionados con la influencia de los distintos factores que influyen en la propagación.

Considerando que el suelo es un elemento esencial en la propagación del sonido nos planteamos caracterizar acústicamente distintos tipos de suelos, es

decir, determinar su impedancia. Para ello se siguió un procedimiento indirecto utilizando el modelo de impedancia de Delany y Bazley para suelos de reacción local, por ser el que presentaba mejor acuerdo con nuestros datos experimentales.

Se han realizado medidas en 7 tipos de muestras de características muy variadas, como suelo con césped, arenoso, sembrado, arado, hormigonado, etc. De los resultados obtenidos se puede concluir que de los suelos estudiados el más blando "acústicamente" es el arado con una σ comprendida entre 10 y 20 KNs/m^4 y el más duro el hormigonado con σ del orden de 10^4.

Es destacable la diferencia de comportamiento que existe entre un césped seco y un césped regado, donde σ pasa de valores en torno a 200 en el seco, a valores en torno a 800 en el húmedo. Otro aspecto destacable es que para frecuencias bajas no se aprecian diferencias en el comportamiento de varios de los suelos estudiados, como el césped húmedo, el terregoso y el hormigón.

INFLUENCIA DE LOS ÁRBOLES

a) De las medidas realizadas "in situ" sobre dos suelos de características semejantes, en un caso con árboles y en otro sin ellos, se puede concluir lo siguiente:

- La atenuación obtenida en presencia de árboles es notablemente superior a la obtenida sin árboles, llegando a superar a 40 m los 10 dB para algunas frecuencias del rango de las medias-altas.

b) Se han realizado medidas en bosques simulados en laboratorio, donde se podía variar el tamaño de los troncos y la densidad de árboles. Los resultados obtenidos nos permiten sacar las siguientes conclusiones:

- Cuando el diámetro de los troncos es muy pequeño, no hay diferencias apreciables entre la presencia o no de troncos, incluso puede obtenerse mayor atenuación sin troncos.
- Al aumentar el tamaño de los troncos aumenta la atenuación, siendo tanto más importante cuanto mayor es la densidad de troncos.

c) También se han realizado cálculos de la atenuación del sonido cuando se propaga en presencia o no de árboles, utilizando un modelo teórico de propagación de sonido en exteriores, "Modelo Nord 2000", que tiene en cuenta el suelo y la presencia de árboles entre otros factores. Del análisis de los resultados obtenidos podemos destacar lo siguiente:

- Las diferencias de atenuación entre la presencia o no de bosque, aparecen por encima de una frecuencia crítica que depende de las características del bosque y de la distancia fuente receptor.
- Si la densidad de árboles es muy pequeña (0.027 arb/m^2) no hay diferencia apreciable en la atenuación predicha por el modelo con y sin árboles. Al aumentar la densidad de árboles (0.042 arb/m^2) con un diámetro de 0.27 m, las diferencias comienzan a aparecer a partir de 40 m de la fuente, resultando atenuaciones de los árboles negativas a frecuencias medias y positivas a frecuencias altas.

  Para densidades algo mayores (0,2 arb/m^2) y diámetros de 0.2 m, las diferencias de atenuación son importantes a partir de 20 m y a 40 m pueden superar los 8 dB a frecuencias altas.

  Si la densidad es grande (1.33 arb/m^2), incluso con diámetros pequeños, 0.05 m, aparecen diferencias grandes para frecuencias altas a partir de 40 m.
- La conclusión de todo esto es que la densidad de árboles es la variable que más influye en la predicción de este modelo.

MEDIDAS EXPERIMENTALES. COMPARACIÓN CON LAS DEL MODELO

Se han comparado los valores experimentales, medidos en bosques reales y en bosques de laboratorio, con los predichos por el modelo teórico en un gran número de casos que abarcan conformaciones y situaciones muy diferentes. Las características de los siete bosques en los que se han realizado medidas reales, son las que figuran en la tabla siguiente.

	Catalpas	**Chopos (2 Años)**	**Plátanos**	**Encinas**	**Chopos**	**Pinos 1**	**Pinos 2**
Tipo de hoja	Caduca	Caduca	Caduca	Perenne	Caduca	Perenne	Perenn
Densidad (árb/m^2)	1.33	1.33	1.33	0.2	0.042	0.027	0.0067
Diámetro (m)	0.057	0.048	0.045	0.2	0.27	0.15	0.15
Altura(m)	4	3	3	4	9	10	10

Características de los bosques en los que se ha medido.

.

Para cada distancia fuente-receptor se ha ajustado el valor de la resistividad al flujo para que la frecuencia del mínimo predicho por el modelo coincida con la frecuencia del mínimo experimental y se ha representado el nivel de presión sonora referido a campo libre frente a la frecuencia.

- El número de mínimos predichos por el modelo coinciden con los que se obtienen experimentalmente. Al aumentar la distancia fuente-receptor el número de mínimos disminuye desde tres para distancias de 2 m hasta uno para distancias superiores a 40 m.
- El modelo predice y la experiencia confirma que al aumentar la distancia los mínimos son más profundos.

- Para una determinada distancia fuente-receptor la frecuencia de los mínimos se traslada hacia frecuencias más bajas cuanto menor es la resistividad al flujo.
- Para la mayoría de los casos estudiados, al comparar los valores de la atenuación predichos por el modelo con los valores experimentales, se observa que el modelo predice valores próximos a los experimentales, sobre todo a frecuencias bajas y medias, apareciendo diferencias entre ellos a frecuencias altas. En estas altas frecuencias los valores predichos por el modelo no siguen una tendencia clara, a veces están por encima y a veces por debajo de los valores experimentales.
- Para cada tipo de bosque hay una distancia fuente-receptor (entre 40 y 60 m) donde el acuerdo entre los valores experimentales y predichos por el modelo es casi perfecto para todas las frecuencias.

El análisis de los datos experimentales en sí mismo nos permite extraerse las siguientes conclusiones:

- El exceso de atenuación asociado con la presencia de los árboles, que se manifiesta a las frecuencias altas, se observa solamente cuando las distancias fuente-receptor son superiores a 40 m, lo que nos lleva a la conclusión de que el efecto de atenuación de los árboles solamente es apreciable a partir de ciertas distancias.
- En los bosques de pinos analizados el modelo no predice atenuación adicional debida al bosque, sin embargo los valores experimentales muestran una atenuación significativa para distancias superiores a 60 m.
- En el caso de los bosques de encinas el acuerdo es muy bueno entre los valores experimentales y los predichos por el modelo, poniéndose de manifiesto para distancias menores que en el resto de las situaciones estudiadas.

Al ajustar la resistividad al flujo para que coincida el mínimo experimental con el teórico, se hace que σ dependa de la absorción resultando:

- Los valores de σ son menores para las distancias mayores.
- En los árboles de hoja perenne se obtienen valores de σ similares en verano y en invierno.
- En los árboles de hoja caduca los valores de σ son mucho menores en verano, árboles con hojas, que en invierno, árboles sin hojas.

Esto puede ser debido a que la absorción de las hojas se manifieste en la resistividad al flujo ya que es el único parámetro que da cuenta de todos los efectos presentes.

- El modelo es poco sensible a la altura de los árboles, pero si es sensible a la altura del receptor, resultando que el nivel de presión sonora referido a campo libre es menor cuanto menor es la altura del receptor, resultado que se confirma también con los datos experimentales.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

MEDIDAS EN LABORATORIO. COMPARACIÓN CON LAS DEL MODELO

Si comparamos las medidas experimentales realizadas en los bosques simulados en el laboratorio con los aportados por el modelo teórico Nord 2000 se observa lo siguiente:

- El modelo predice con cierta fiabilidad los niveles de presión sonora referidos a campo libre, que se determinan experimentalmente en laboratorio.
- El valor del mínimo experimental está por debajo del predicho por el modelo, unos 5 dB en promedio.

- Como conclusión final podría decirse que el modelo predice con bastante exactitud los resultados experimentales, medidos tanto en bosques reales como en el laboratorio, sobre todo para frecuencia bajas y medias, apareciendo discrepancias para frecuencias altas.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

PROPUESTAS DE MEJORA AL MODELO NORD 2000

Creemos que podrían mejorarse los valores predichos por el modelo a altas frecuencias si incorporase los efectos de las hojas de los árboles, ya que éstas pueden absorber el sonido, y pueden influir de manera diferente dependiendo de la cercanía del receptor a la copa del árbol.

Otro inconveniente es que el único parámetro que puede manejarse en el modelo es la resistividad al flujo, éste tiene que dar cuenta de todos los efectos, siendo un parámetro relacionado únicamente con las propiedades del suelo.

Por último, el modelo también debería de contemplar efectos atmosféricos y ser más sensible a la altura de los árboles.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

TRABAJOS FUTUROS

Somos conscientes de que aún queda mucho por hacer en este campo, y seguiremos trabajando por conocer con más exactitud el efecto de los árboles y del suelo en la propagación de sonido. Algunos estudios han puesto de manifiesto que los árboles, además de ser beneficiosos para nuestro entorno, producen buen efecto psicológico, aún en casos en los que no aporten ninguna atenuación del sonido.

Este tipo de medidas tiene el inconveniente de que están influenciadas por un gran número de factores que intervienen en la propagación del sonido en exteriores, geométricos, suelo, obstáculos, meteorológicos, etc. difícilmente controlables. Por ello es necesario hacer un gran número de nuevas medidas de la atenuación en el interior de bosques, intentando “controlar” alguna de las variables que interviene en el proceso para de esta forma poder extraer la dependencia del fenómeno con otras variables.

También hay que estudiar qué ocurre a distancias mayores de las consideradas en este trabajo, una limitación marcada en nuestro caso por el equipo de medida. También es necesario poder disponer de los valores de las variables meteorológicos para analizar su dependencia y poderlas considerar en el modelo.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

ANEXOS

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

ANEXO I

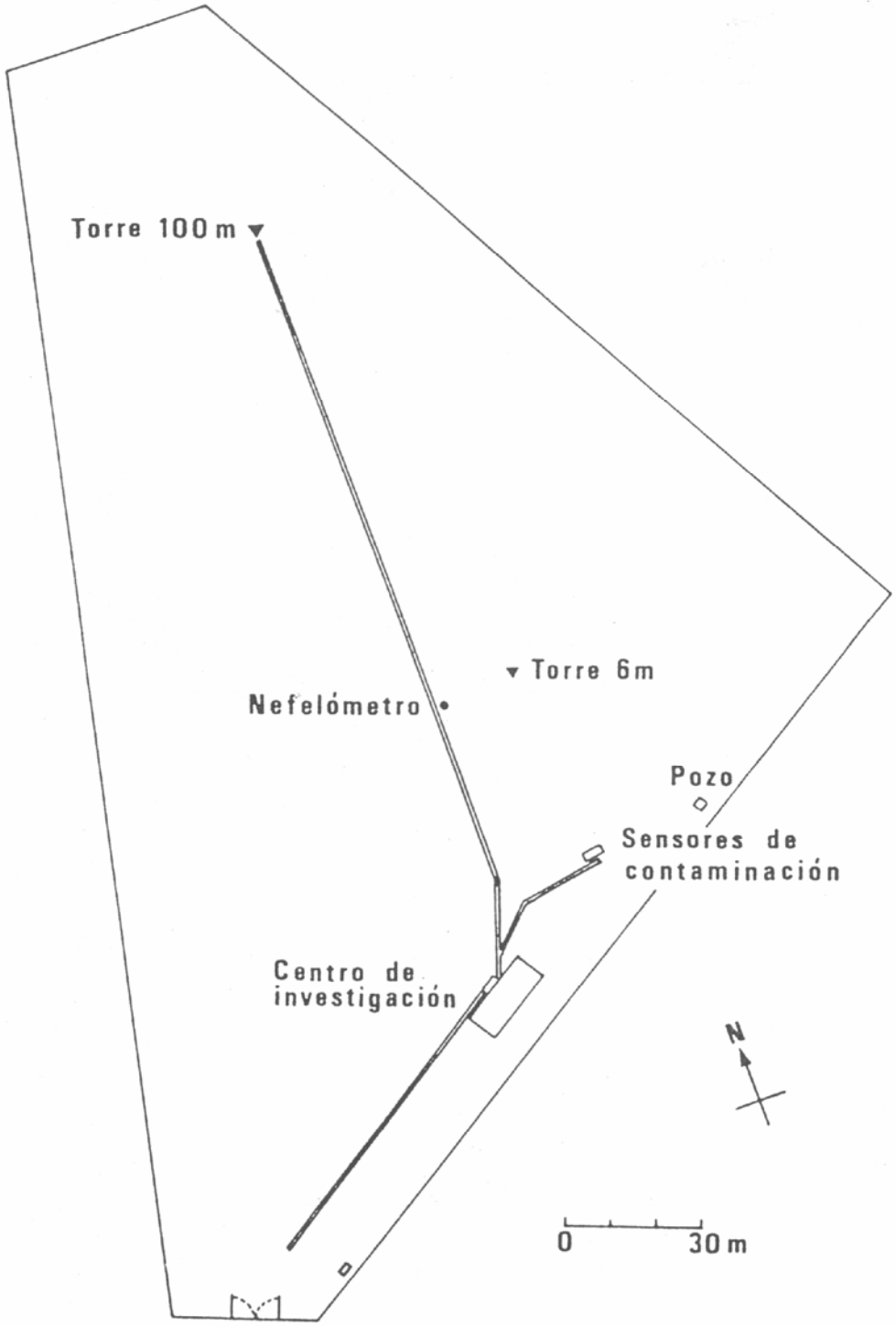


Fig. 1.—Plano del Centro de Investigación de la Baja Atmósfera.

Figura 2: Suelo del CIBA

Figura 3: Torre meteorológica de 100 m de altura.

Figura 4: Bosque de pinos

Figura 5: Suelo fuera del bosque de pinos.

Figura 6: Fuente de medida. Al fondo, la torre meteorológica de 100 m de altura.

ANEXO II

Suelos de hormigón, arado y sembrado

BIBLIOTECA VIRTUAL

Suelos de arena, césped húmedo y terregoso

ANEXO III

Chopera

Bosque de chopos de 2 años

Bosque de pinos

Bosque de encinas

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

ANEXO IV

Figura 1: Bosque irregular. En uno de los troncos puede apreciarse la punta con la que se ancla al suelo.

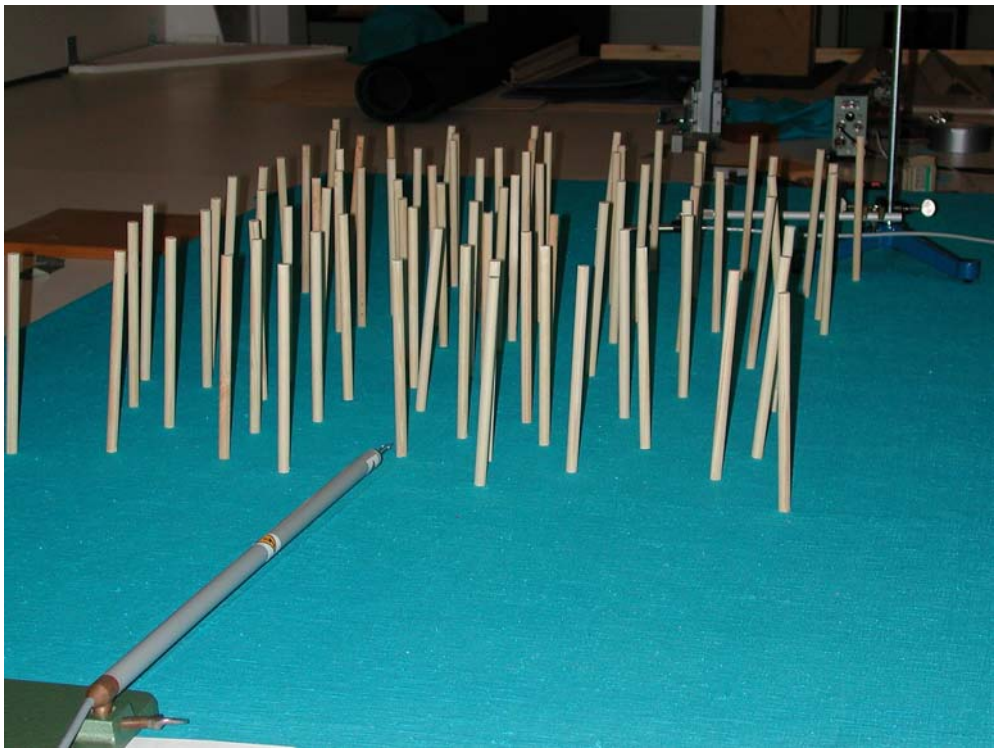


Figura 2: Bosque 2 con densidad ρ, troncos distribuidos de forma aleatoria. La fuente está colocada en uno de los bordes del bosque.

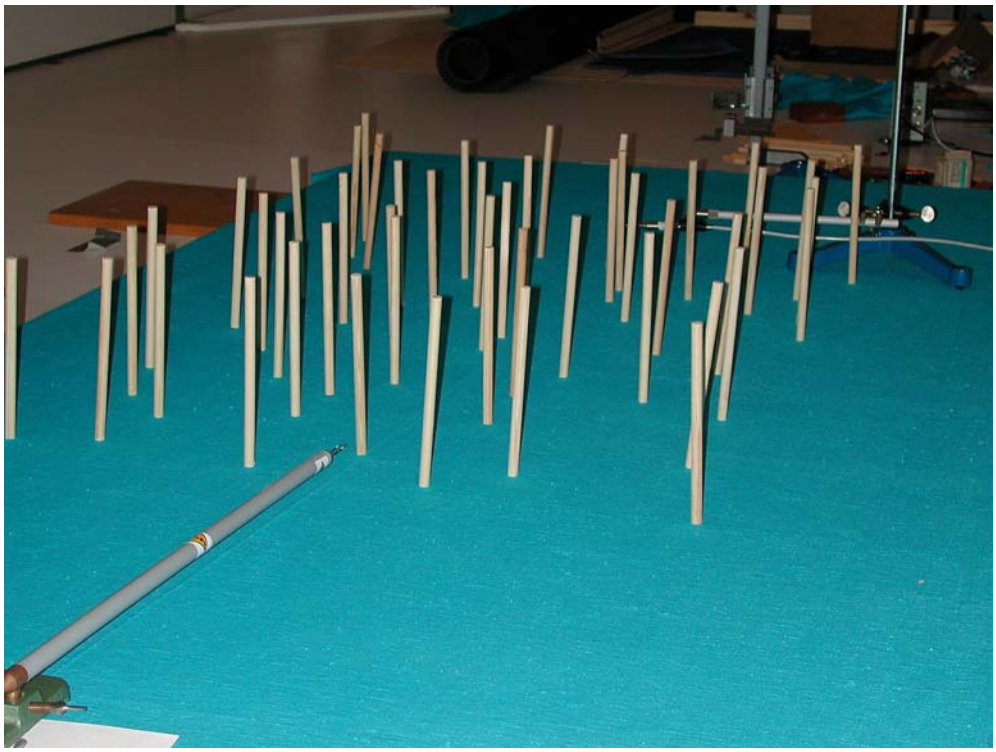


Figura 3: Bosque 2 con densidad de árboles ρ/2.

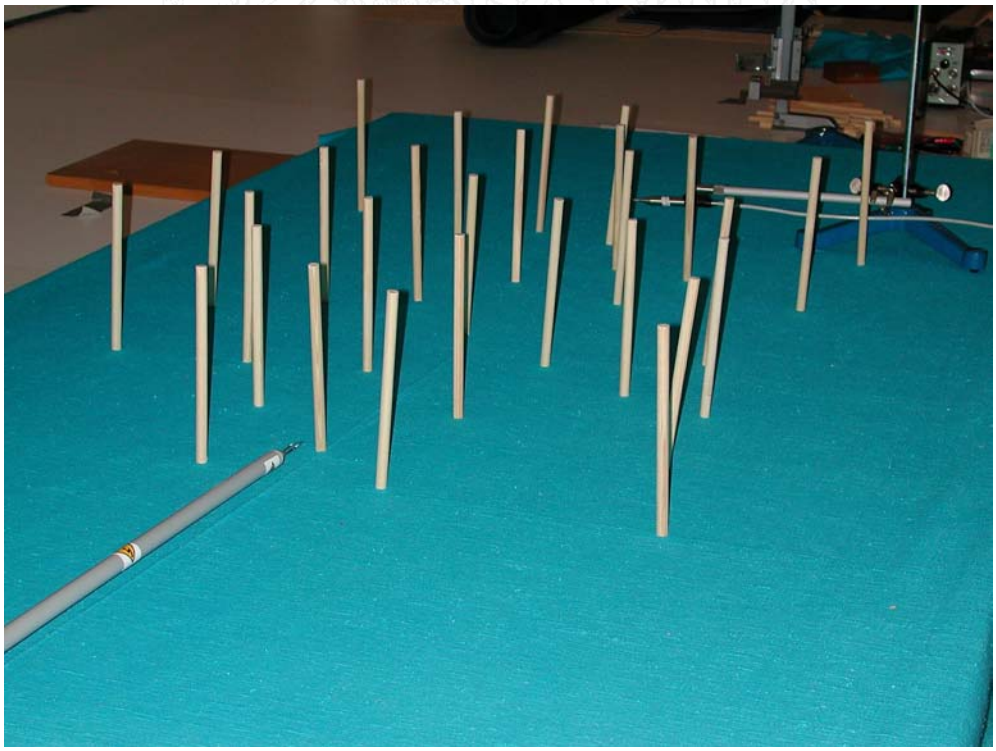


Figura 4: Bosque 2 con densidad ρ/4.