



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR  
PROPAGACIÓN EN ÁREAS  
URBANAS SIMULANDO EL MODELO  
DE OKUMURA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A

GUILLERMO LÓPEZ DE LA CALLEJA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SALVADOR LANDEROS AYALA

NOVIEMBRE DE 2003



*Agradezco a la*

***U N A M***

*por todo lo que me da*

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>	1
I.1. Antecedentes	1
I.2. Planteamiento del problema	2
I.3. Objetivos	5
I.4. Organización de la tesis	5
<b>CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS</b>	7
II.1. Introducción	7
II.1.1. Particularidades	7
II.1.2. Modos de propagación de las ondas radio	8
II.2. Fundamentos de propagación	10
II.2.1. Propagación en el Espacio libre	11
II.2.2. Principio de Huygens	13
II.2.3. Zonas de Fresnel	16
II.2.4. Propagación en VHF y UHF	19
II.2.4.1. Propagación sobre superficies	21
II.2.4.1.1. Propagación sobre una superficie plana reflectora	21
II.2.4.1.2. Propagación sobre un terreno corrugado	23
II.3. Propagación en zonas urbanas	24
II.3.1. Clasificación del ambiente	25
<b>CAPÍTULO III. MODELO DE OKUMURA</b>	28
III.1. Introducción	28
III.2. Descripción	29
III.2.1. Características del terreno	29
III.2.2. Tipo de ambiente	32
III.3. Factores de corrección principales	33
III.3.1. Atenuación relativa media $A_{mu}$	33
III.3.2. Factor $G_{hte}$	34
III.3.3. Factor $G_{hre}$	34

III.3.4. Factor $G_{\text{areas}}$	35
III.4. Factores de corrección adicionales	36
III.4.1. Factor $k_M$	37
III.4.2. Factor $k_{SP}$	38
III.4.3. Factor $k_{\text{er}}$	39
III.4.4. Factor $k_s$	41
III.5. Determinación de pérdidas por propagación	43
<b>CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OKUMURA</b>	45
IV.1. Introducción	45
III.2. Descripción de la implementación	46
IV.2.1. AMU	47
IV.2.2. GHTE	50
IV.2.3. GHRE	52
IV.2.4. ÁREAS	54
IV.2.5. PÉRDIDAS	56
<b>CAPÍTULO V. SIMULACIÓN Y RESULTADOS</b>	59
V.1. Parámetros de simulación	59
V.2. Simulación y resultados	60
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES</b>	64
<b>ANEXO A. GUÍA DE USUARIO</b>	66
<b>REFERENCIAS</b>	68

---

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## I.1. ANTECEDENTES

La historia de las radiocomunicaciones modernas se remonta a la primera década del siglo veinte. A principios de 1900, el científico llamado Fessenden logró la emisión de voz humana y de música sin un cable como medio de transmisión. Primero logró producir una corriente continua de ondas, todas con la misma longitud de onda y por lo tanto de la misma frecuencia. Antes de la transmisión, la corriente de las ondas se modulaba mediante una corriente eléctrica que fluctuaba según la voz humana subiera o bajara de intensidad. Así, el patrón de onda que se transmitía era el de la onda portadora modulada en una forma que correspondía a las irregularidades de una onda sonora. En la estación receptora, la corriente fluctuante correspondía a la voz humana original y era transformada de nuevo en ondas sonoras.

En 1932, se encontraron los principios del radar. Con esta creación, nació la idea de transmitir imágenes por medio de ondas electromagnéticas. Con el nacimiento de la radio y la posibilidad de enviar señales eléctricas a través del espacio mediante el uso de una onda portadora, mucho de lo que se efectuaba por alambre fue posible hacerlo sin éste. Sin embargo, durante la Primera Guerra Mundial, los sistemas de radiocomunicación móvil tuvieron un uso muy limitado.

En 1921 se instaló el primer sistema de radiotelefonía móvil por el Departamento de Policía de la ciudad de Detroit, Estados Unidos. El sistema instalado era un sistema de despacho y operaba en la banda de los 2MHz. Sin embargo, en la medida que los adelantos tecnológicos y la demanda del servicio fueron aumentando, se inició la tendencia hacia el uso de mayores frecuencias. Hacia mediados de los cuarentas, se instalaron nuevos sistemas comerciales en las bandas de los 33 y los 150MHz. La operación de estos sistemas fue en un solo sentido y se requería de un operador de teléfono para lograr la llamada. Además, el usuario tuvieron que buscar manualmente un canal que se encontrara libre. En los años sesentas se tenían nuevos sistemas en la banda de los 150MHz con operación en ambos sentidos y con búsqueda automática de canales de marcación desde y hacia la estación móvil.

Una de las tecnologías inalámbricas que ha tenido un gran desarrollo ha sido la telefonía celular. Martin Cooper es considerado "el padre de la telefonía celular" al introducir el primer radioteléfono en 1973 en Estados Unidos, mientras trabajaba para Motorola. En 1978, en Chicago, Estado Unidos, comenzó a instalarse en su fase experimental el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone Service) en la banda de los 900MHz, disponiendo de 666 canales como capacidad total. Este sistema, que ya era un sistema celular, cubrió en su fase experimental una extensión de aproximadamente  $5,400\text{km}^2$  con 10 células y 136 canales

para 2000 abonados. Posteriormente, en 1983, se instaló en forma comercial con 666 canales y con una capacidad inicial de 30,000 abonados. Fue hasta 1979 cuando aparecieron en Tokio, Japón, los primeros sistemas comerciales por la compañía NTT en la banda de los 900MHz.

Paralelamente, en Europa se instaló el primer sistema celular de tipo experimental en la banda de los 450MHz. Como consecuencia, en 1981, los países nórdicos introdujeron un sistema celular similar a AMPS llamado NMT (Nordic Mobil Telephone System). Cuando este sistema entró en operación comercial sólo abarcaba algunos países nórdicos, pero años después se instaló en todo el continente europeo.

En varios países se expandió la telefonía celular como una alternativa a la telefonía convencional inalámbrica. Esta tecnología tuvo gran aceptación, por lo que a los pocos años de implementarse se empezó a saturar el servicio. En ese sentido, hubo la necesidad de desarrollar e implementar otras formas de acceso múltiple al canal y transformar los sistemas analógicos en digitales, con el objeto de darle servicio a más usuarios. Para separar una etapa de la otra, la telefonía celular se ha caracterizado por contar con diferentes generaciones.

A pesar de que la telefonía celular fue concebida estrictamente para ofrecer servicios de voz, la tecnología celular de hoy es capaz de brindar otro tipo de servicios como: datos, audio y video, con algunas limitaciones. Sin embargo, la telefonía inalámbrica cada vez requiere un mayor consumo de ancho de banda. En años recientes, se han realizado trabajos de investigación para mejorar las características de los sistemas de telefonía celular dando como resultado mejoras en la tecnología y logrando esquemas de modulación digital y una cobertura más amplia, además de una mejor calidad en el servicio.

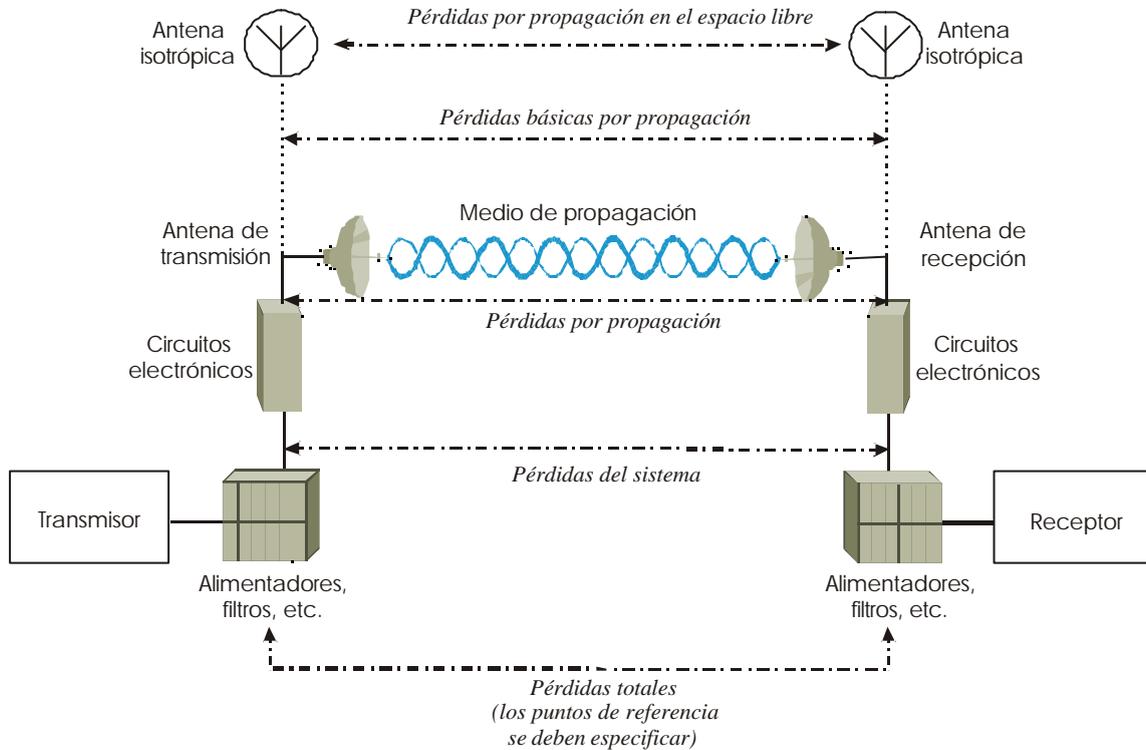
## **I.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

**E**n cualquier sistema de comunicación existen pérdidas por propagación. Estas pérdidas se deben a las pérdidas básicas del espacio libre, a los efectos del medio de propagación y a los efectos de las antenas y de los circuitos electrónicos que forman parte del sistema de comunicación. Las pérdidas que sufre un sistema de comunicación pueden clasificarse según los elementos que las causan. De esta forma tenemos:

- Pérdidas por propagación en el espacio libre: las cuales se deben a antenas isotrópicas y a la propagación de la señal en el espacio libre.
- Pérdidas básicas por propagación: que incluyen el efecto del medio de propagación.
- Pérdidas por propagación: que incluyen la directividad real de las antenas de transmisión sin incluir las pérdidas debidas a los circuitos electrónicos.
- Pérdidas del sistema: que afectan la potencia en las terminales de la antena.

- Pérdidas totales: que incluyen las pérdidas ya mencionadas.

Para ejemplificar las definiciones anteriores, se muestra la siguiente figura:



**Figura 1. Descripción gráfica de las pérdidas que sufre un sistema de comunicación**

Si se observa la figura 1, es posible concluir que las pérdidas del sistema pueden controlarse si se presta atención en el ruido de los circuitos electrónicos y en los detalles de la antena con el fin de lograr la mayor ganancia posible. Sin embargo, las pérdidas básicas por propagación no pueden ser controladas. Esto se debe a que se desconoce las características del medio de propagación y, por lo tanto, resulta imposible restringir la atenuación de las ondas en su trayectoria.

Para comunicaciones inalámbricas, la calidad del enlace depende de la ganancia de la antena de transmisión y de la de recepción, de la potencia de transmisión y de la temperatura de ruido en el sistema de recepción. Como ya se había mencionado, todos los parámetros se pueden controlar bajo diseño, excepto las pérdidas en la trayectoria de propagación. Estrictamente, las pérdidas básicas por propagación de un enlace de radiocomunicación se pueden cuantificar si se reemplazan las antenas reales por antenas isotrópicas y con la misma polarización que las antenas reales y sin considerar los obstáculos que puede enfrentar la señal en su ruta entre el transmisor y el receptor.

Existen diversas técnicas para determinar las pérdidas básicas de transmisión. Éstas consideran los efectos predominantes en la propagación. Por ejemplo, en las comunicaciones vía satélite consideran los efectos atmosféricos y la absorción por lluvia y, en el caso de las comunicaciones móviles celulares, consideran la existencia o no de visión directa entre el transmisor y el receptor. Aunque difieren en su metodología, todas estas técnicas tienen como parámetro crítico la distancia entre el transmisor y el receptor.

Existen dos tipos principales de técnicas: los modelos empíricos y los analíticos. Entre los analíticos se encuentra el Modelo del Espacio Libre el cual considera las pérdidas registradas de una señal si las antenas reales fueran reemplazadas por antenas isotrópicas y si el medio de propagación fuera perfectamente dieléctrico, homogéneo, isotrópico e ilimitado.

Este modelo es ampliamente usado en sistemas de comunicación de microondas y en sistemas de comunicación que consideran distancias muy grandes. Sin embargo, en comunicaciones móviles terrestres hay que considerar una serie de pérdidas adicionales debidas a obstáculos terrestres y a la existencia de trayectorias múltiples, por lo que se debe recurrir a otro tipo de modelos.

Los modelos empíricos de propagación sí consideran un medio de propagación no dieléctrico, heterogéneo y limitado por obstáculos naturales o construidos por el hombre. Existen varios modelos empíricos: el Modelo de Kafaru, el Modelo de Okumura, el Modelo de Sakagmi y Kuboi, el Modelo de Hata, el Modelo de Ibrahim y Parsons y el Modelo de Lee. Uno de los más completos es el Modelo de Okumura, método ampliamente usado para la predicción de pérdidas medias de propagación en áreas urbanas, diseñado a finales de la década de los 60's.

Okumura y su equipo trabajaron sobre un método general para calcular las pérdidas de potencia que sufre una señal al desplazarse por el espacio libre dentro de un entorno urbano, considerando: las características de distancia entre el terminal móvil y la estación base, la frecuencia de la portadora, la potencia de emisión de la estación base y las alturas efectivas de ambas antenas. Básicamente, el Modelo de Okumura se obtuvo a partir de una gran cantidad de mediciones en la ciudad de Tokio. Estos datos, mediante técnicas de estadística, se plasmaron en gráficas que se aplican ampliamente en la caracterización de entornos urbanos actuales. Con base en ello, se desarrolló una relación que calcula las pérdidas medias que sufre una señal. Esta relación está apoyada en los parámetros que se dedujeron empíricamente.

El Modelo de Okumura ha resultado ser de gran utilidad en la predicción de propagación de las ondas de radio. El método fue desarrollado en Japón, y se ha podido aplicar a zonas de alta densidad urbana mediante simulaciones en computadora, lo cual permite tener una aproximación a un sistema físico real.

Actualmente, es importante tener noción de los factores que intervienen en la propagación de señales, ya que se pueden resolver problemas que enfrentan las compañías de servicios móviles y de telefonía celular. Debido

al crecimiento considerable de usuarios, siempre se busca mejorar la calidad del servicio. Para esto se depende en gran medida del conocimiento del entorno en el que se da la comunicación inalámbrica, siendo uno de los escenarios más complejos y comunes de analizar el área urbana.

En este trabajo de tesis se ha elegido el Modelo de Okumura para describir una forma de cuantificar las pérdidas básicas por propagación y con base en ello, desarrollar una simulación en un lenguaje de programación, con el fin de tener una herramienta más en la enseñanza y aplicación de las comunicaciones inalámbricas.

### **I.3. OBJETIVOS**

**E**l objetivo de esta tesis es describir las razones por las cuales surgió el Modelo de Okumura con el fin de comprender el problema a resolver. Una vez logrado este objetivo, se detallarán los factores de corrección que involucra este modelo y posteriormente se implementará para obtener una simulación del mismo, el cual puede servir como herramienta de trabajo enfocada a la docencia en el área de las telecomunicaciones.

Para lograr este objetivo, se definieron las siguientes metas:

1. Describir los conceptos necesarios que involucran la propagación de ondas electromagnéticas en áreas urbanas con el fin de entender el tema.
2. Realizar una documentación del Modelo de Okumura, los factores que influyen en las pérdidas de una señal en su trayectoria de propagación y la forma en la que afectan dichos factores.
3. Implementar en Matlab el Modelo de Okumura con el fin de obtener resultados aproximados a los registrados originalmente en la investigación de Okumura y su equipo.
4. Concluir acerca de los datos obtenidos por medio de la simulación.

### **I.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

**P**ara cumplir una a una las metas planteadas, la tesis está organizada de tal forma que sigue el mismo orden en el que fueron enumeradas en la sección anterior. Así, tenemos que en el capítulo II se presentan los conceptos teóricos básicos para conocer y entender la propagación de señales, las características de propagación en las bandas VHF y UHF, los modos de propagación de las ondas radio, los principios que explican la difracción de las ondas electromagnéticas y sus efectos, las alteraciones que sufren las ondas

electromagnéticas al propagarse en áreas urbanas. Las explicaciones y razonamientos que se dan en este capítulo son principalmente cualitativos, ya que el Modelo de Okumura es un modelo empírico que no involucra fórmulas matemáticas complejas.

Se sugiere tener conocimientos básicos de teoría electromagnética, de propagación de ondas electromagnéticas y de antenas para facilitar la comprensión de esta tesis. Sin embargo, el capítulo II se dedica a explicar la teoría necesaria para proporcionar bases suficientes de la propagación en VHF y UHF.

Al inicio del capítulo III se provee una introducción al Modelo de Okumura en la que se describe cómo surgió el modelo y la manera en la que se llevaron a cabo los experimentos físicos encabezados por el científico japonés con el mismo nombre. A continuación se detallan las características del modelo y los factores que considera para obtener un resultado final que son las pérdidas medias que una señal sufre en su trayectoria. Este capítulo ofrece una explicación teórica y un diagrama que facilita la comprensión de los factores principales y de los secundarios, así como tablas de valores en algunos casos.

La implementación del Modelo de Okumura se observa en el capítulo IV. Se muestra la manera en la que funciona el modelo y se da una explicación general del programa realizado para su simulación por medio de un diagrama de flujo. Esto es con el fin de que un usuario o una persona interesada en el programa pueda conocer la estructura que tiene dicho programa y cómo funciona.

La simulación y los resultados del programa realizado en Matlab del Modelo de Okumura se presentan en el capítulo V. En este capítulo cualquier usuario puede obtener una idea de los alcances del programa. La descripción de cada uno de los puntos que se tratan en este capítulo se explican lo más sencillo posible para facilitar su entendimiento.

El capítulo VI contiene las conclusiones de este trabajo y una breve explicación de los trabajos que en un futuro podrían ser desarrollados a partir de esta tesis.

Finalmente, el apéndice proporciona el código fuente del programa realizado para esta tesis y ofrece una guía de usuario para ejecutar el programa.

## CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS

### II.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el término radiocomunicación móvil considera casi cualquier situación en la que el transmisor o el receptor es capaz de moverse. Un enlace de radiocomunicaciones móviles es, por definición, cualquier enlace de comunicación entre dos terminales, de las cuales una o ambas pueden estar en movimiento o detenidas en lugares no del todo especificados. En la mayoría de los casos, una de estas terminales puede estar fija, tal como una estación base. Por una terminal móvil se entienden vehículos en tierra, barcos, aviones o satélites de comunicaciones en los que un sistema puede incluir varios de estos tipos de terminales.

#### II.1.1. PARTICULARIDADES

Para usar un tipo particular de servicio de comunicación se debe decidir en qué frecuencia se va a trabajar. Para tomar dicha decisión, se tienen que considerar varios factores, como la distancia, el tipo y la calidad del servicio, etc. Por ejemplo, para una aplicación de operaciones de radio de dos vías, la comunicación que se requiere normalmente no excede de unos cuantos kilómetros, ya que de lo contrario se podría causar interferencia innecesaria si la señal transmitida llega demasiado lejos. Es evidente que si los móviles se comunican libremente con la base o entre ellos dentro de un área determinada, los transmisores involucrados deben ser capaces de proporcionar una intensidad adecuada a la señal en un área completa.

Las frecuencias de operación deben ser elegidas dentro del espectro de radio frecuencias de tal forma que sea posible diseñar antenas eficientes y de tamaño adecuado para ser colocadas en un mástil, en vehículos o en equipos portátiles. Como los móviles se mueven libremente dentro del área de cobertura del sistema de radio, su localización no siempre es conocida y, por ende, la energía radiada por las antenas debe ser uniforme y en todas direcciones del plano horizontal (radiación omnidireccional). Esto es de vital importancia, ya que las frecuencias elegidas deben ser tales que los transmisores usados en las estaciones base y en los móviles puedan generar la potencia necesaria de RF (radiofrecuencia), pero manteniendo diseños pequeños para los equipos.

Para el caso de comunicación radio-móvil *half o full duplex*, particularmente en áreas urbanas, la antena móvil rara vez se encuentra orientada en dirección a la estación base. Las ondas penetran en edificios dentro de una determinada extensión y, debido a la difracción, parece que se doblan provocando ondulaciones más pequeñas. Afortunadamente, gracias a la dispersión múltiple y a la reflexión, las ondas también se propagan dentro de áreas con edificios altos y, aunque la intensidad de la señal es sustancialmente reducida por varios efectos, es posible detectar señales con receptores sensibles, aún en áreas densamente pobladas. La elección de las frecuencias también está determinada por la necesidad de minimizar las pérdidas originadas por los edificios debidas principalmente a la difracción de las ondas radio.

Por estas causas, tradicionalmente los equipos móviles de dos vías (*half o full duplex*) han sido desarrollados casi exclusivamente para frecuencias de VHF y UHF. En una ciudad, por ejemplo, existen muchos usuarios de radio-móvil, como los servicios de emergencia y las compañías de taxis.

Es primordial considerar adecuadamente el rango de frecuencias con el que va a funcionar el servicio de comunicación con el fin de optimizar el espectro disponible. Además, es necesario reubicar los canales de los usuarios que operan a gran distancia por lo que es importante conocer las características de propagación de cada banda de frecuencia. De esta manera, es posible conocer cuál es la mejor opción para cada tipo de comunicación. Por ejemplo, para las comunicaciones radio-móviles las frecuencias de VHF y UHF representan la mejor alternativa debido a su rango de propagación (relativamente corto) y a que el diseño de equipos para estas frecuencias es considerablemente compacto y económico.

Debido a las atractivas características de propagación de las bandas de VHF y UHF, es posible colocar en el mismo canal a diferentes usuarios en áreas de cobertura separadas entre sí de 50 a 100km con un alto grado de confiabilidad de que no se generará interferencia entre ellos. Entonces, es claro que para radiocomunicaciones móviles terrestres *half o full duplex*, las bandas más adecuadas son la VHF y la UHF.

## **II.1.2. MODOS DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS RADIO**

Para saber el rango que abarcan estas bandas, es necesario conocer la clasificación del espectro electromagnético. El espectro electromagnético comprende las frecuencias desde los 30kHz hasta los 300GHz, aunque la propagación de ondas es posible desde frecuencias de apenas algunos kHz. Con base en las recomendaciones de la ITU, el espectro está dividido de la siguiente manera:

Tabla 1. Designación de bandas de frecuencias.

<i>Nombre de la banda (nombre original en inglés)</i>	<i>Abreviatura de la banda</i>	<i>Rango de frecuencias</i>
Extremely Low Frequency	ELF	Menos de 3kHz
Very Low Frequency	VLF	3 a 30 kHz
Low Frequency	LF	30 a 300 kHz
Medium Frequency	MF	300kHz a 3MHz
High Frequency	HF	3 a 30 MHz
Very High Frequency	VHF	30 a 300 MHz
Ultra High Frequency	UHF	300MHz a 3GHz
Super High Frequency	SHF	3 a 30 GHz
Extra High Frequency	EHF	30 a 300 GHz

Es conveniente mencionar la clasificación de las ondas electromagnéticas según la trayectoria seguida en su propagación. Las ondas radio se clasifican según la capa atmosférica sobre la cual se propagan.

- Ondas ionosféricas u ondas de cielo (*sky-waves*): son aquellas que se propagan a través de la capa de la ionosfera.
- Ondas troposféricas: aquellas que se propagan sobre trayectorias en la capa más baja de la atmósfera (la troposfera).
- Ondas terrestres: aquellas que se propagan cerca de la superficie terrestre.

Las ondas terrestres se dividen en dos grupos: las ondas espaciales y las ondas superficiales.

- Las ondas espaciales a su vez se dividen en ondas directas y en ondas terrestres reflejadas. Las ondas directas se transmiten con una trayectoria directa (línea de vista) entre el transmisor y el receptor. Las ondas terrestres reflejadas son aquellas recibidas en la antena destino después de haberse reflejado en la tierra o en otros obstáculos.
- Las ondas superficiales son guiadas a través de la superficie terrestre y, ya que ésta no es un conductor perfecto, una parte de la energía de la onda se pierde.

Las frecuencias de las bandas de VHF y UHF son demasiado altas para propagarse en la ionosfera, por lo que su comunicación es por vía directa y con componentes de ondas terrestres reflejadas. Las antenas para las comunicaciones en estas bandas de frecuencias son relativamente pequeñas en tamaño y pueden ser montadas sobre bases de varias longitudes de onda sobre la tierra. Bajo estas condiciones, las ondas espaciales son predominantes. Aunque es común que las ondas espaciales sean un factor negativo para transmisiones a bajas frecuencias, en las comunicaciones VHF y UHF éstas son una de las características dominantes. El ancho de

banda disponible es de alta calidad, pero su propagación es normalmente restringida a dos puntos sobre una línea de vista (como en el caso de las señales de televisión), resultando en una cobertura esencialmente local. El análisis de la propagación de ondas espaciales en VHF y UHF requiere que se consideren los problemas ocasionados por reflexión (debida a obstáculos naturales), por difracción (causada por colinas altas y edificios) y por refracción, que en la capa más baja de la atmósfera también es importante.

Cabe mencionar que la polarización vertical siempre se usa en comunicaciones móviles, aunque para frecuencias de VHF la mejor polarización es la horizontal, ya que produce la máxima intensidad de campo cerca de la tierra. Esto se debe a que para las bandas VHF y UHF los modos de propagación de las ondas de radio son superficiales, ya sea que la propagación se dé por ondas directas o por ondas reflejadas. De cualquier manera, para los equipos de mano la polarización vertical es mucho más robusta y más conveniente de usar, lo que podría representar una ventaja. Por ejemplo, sería inconveniente mantener la antena de un sistema portátil de radio con una posición vertical, ya que si la señal está polarizada horizontalmente, el resultado de la transmisión no será satisfactorio.

En la mayoría de los casos, para establecer una aproximación determinística del análisis de la propagación de ondas espaciales en VHF y UHF y de los parámetros de propagación, la complejidad se eleva debido a la variación de las condiciones. De hecho, la variación de las condiciones obliga a tomar medidas y establecer herramientas para la teoría estadística de comunicaciones. No obstante, un punto importante de aclarar es que la transmisión de señales sobre una trayectoria en comunicaciones radio móviles es recíproca en el sentido de la localización del transmisor y el receptor y puede ser intercambiada sin modificar las características de la señal recibida. Por lo tanto, las bases de la transmisión de señales se mantienen de manera general, sin importar la dirección de transmisión. Sin embargo, se tienen que considerar los niveles de ruido ambiental en ambos extremos del enlace de comunicación, ya que la reciprocidad respecto a las características de la señal no implica reciprocidad respecto a las características de la señal de ruido.

Para comprender mejor los problemas que se presentan en un enlace en VHF o en UHF, la siguiente sección describe algunos fundamentos importantes relacionados a ello.

## **II.2. FUNDAMENTOS DE PROPAGACIÓN**

**U**na vez explicada la razón por la cual se hace uso de las bandas de VHF y UHF para comunicaciones móviles de dos vías, se pueden desarrollar algunas relaciones fundamentales entre la potencia transmitida, la potencia recibida, la distancia y la frecuencia portadora. Para ello, es importante conocer algunos términos comunes en radiocomunicaciones antes de analizar conceptos teóricos.

Una antena isotrópica es un concepto ideal y se refiere a aquella antena que radia uniformemente en todas direcciones y tiene de ganancia  $G = 1$ . Se puede calcular la ganancia de potencia de una antena o de un arreglo integrando el flujo de potencia y relacionándolo con la máxima densidad de potencia.

El área efectiva de una antena es un concepto que se usa cuando las antenas se encuentran en modo receptor. Si una antena es colocada en el campo de una onda electromagnética, la potencia recibida disponible en sus terminales es la potencia por unidad de área transportada, es decir la onda por el área efectiva,  $P = WA$ .

## II.2.1. PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

La propagación de una señal en el espacio libre implica la consideración de que el medio de propagación es el vacío. A pesar de esta consideración, existen pérdidas en la señal que se propaga de una antena transmisora a otra receptora. Estas pérdidas reciben el nombre de Pérdidas por transmisión en el espacio libre. Para definir las matemáticamente, se supone una antena transmisora y otra receptora separadas entre sí por una distancia  $d$  y, como ya se aclaró, con el vacío como medio de propagación. Las antenas se consideran isotrópicas. El diagrama de estas suposiciones se muestra a continuación:

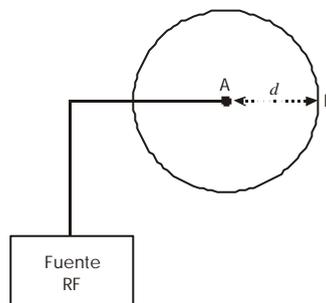


Figura 2. Diagrama de suposiciones para el Modelo de propagación en el espacio libre

Se considera el punto  $A$  como una fuente isotrópica y, por definición, una fuente isotrópica radia uniformemente en todas las direcciones. Además, tiene una ganancia unitaria, es decir, de 0dB. A la potencia radiada por la fuente  $A$  se le nombra como  $P_T$ . La envolvente que contiene la radiación alrededor de la fuente  $A$  puede ser considerada como una esfera de radio  $d$ . El flujo neto de potencia a través de la superficie de una esfera en su centro debe ser también  $P_T$ , de ahí que el flujo de potencia por unidad de área a través de cualquier porción de la superficie de la esfera sea:

$$P_{av} = \frac{P_T}{4\pi d^2}$$

donde  $P_T$  es la potencia radiada por la fuente  $A$  [W]

$d$  es el radio de la esfera [m]

En la figura 2, el punto  $A$  es una fuente isotrópica colocada en el centro de la esfera y el punto  $B$  situado en la superficie de la esfera, representa a la antena receptora.

Convencionalmente, una antena isotrópica puede ser tanto transmisora como receptora. En el caso de que sea una antena receptora, absorbe la potencia del campo de radiación en el cual está situada. Para una antena isotrópica, el área efectiva es:

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del campo de radiación incidente

De la ecuación de  $P_{av}$ , se obtiene que una antena isotrópica situada en un campo de radiación con una densidad de potencia igual a  $P_{av}$  entregará a su carga una potencia igual a:

$$P_R = P_T \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

donde:  $P_R$  es la potencia entregada a la carga [W]

$r$  es el radio de la esfera o la distancia  $d$  [m]

Las pérdidas por propagación en el espacio libre entre una antena transmisora y una receptora se define convencionalmente como:

$$L_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_T}{P_R}$$

donde  $L_{dB}$  representa las pérdidas por transmisión en el espacio libre [dB]

Combinando la ecuación obtenida para la potencia  $P_R$  entregada a la carga y la ecuación de las pérdidas  $L_{dB}$  por transmisión en el espacio libre, tenemos:

$$L_{dB} = 21.98 + 20 \log_{10} \left( \frac{r}{\lambda} \right)$$

A partir de la última ecuación es posible obtener una expresión final que es:

$$L_{dB} = 32.4 + 20 \log d_{km} + 20 \log F_{MHz}$$

donde  $d$  ( $d = r$ ) es la distancia en kilómetros entre la antena de transmisión y la de recepción.

$F$  es la frecuencia en MHz del campo de radio emitido, la cual puede conocerse por:

$$l = \frac{c \times 10^{-6}}{F}$$

donde  $c = 2.998 \times 10^8$  [m/s], la velocidad de la luz en el espacio libre.

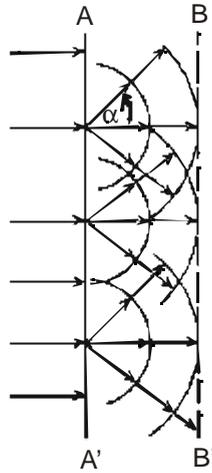
## II.2.2. PRINCIPIO DE HUYGENS

La difracción de una onda ocurre cuando el frente de onda se topa en su trayectoria con un obstáculo grande comparado con la longitud de onda  $\lambda$  de la señal. Debajo de los 1000MHz hay difracción por obstáculos con un incremento en la atenuación en función de la obstrucción del obstáculo. Arriba de los 1000MHz, la atenuación ocasionada por obstáculos incrementa más rápido que si se tratara de frecuencias bajas en medios de propagación normales. En realidad, la cantidad de pérdidas por obstrucción depende del área del haz obstruido con relación al área frontal total de la energía propagada y de las propiedades de difracción.

Bajo condiciones normales de transmisión (es decir, con trayectorias no obstruidas), el objetivo del diseñador de un sistema es proporcionar la claridad suficiente de tal forma que no existan pérdidas apreciables debidas a un obstáculo. Para calcular la claridad necesaria, se debe recurrir a la física de las ondas: el Principio de Huygens y las Zonas de Fresnel. Cuando se habla de difracción ocasionada por un obstáculo, se asume que el medio es homogéneo.

La discusión de la reflexión y la refracción de una onda a causa de un obstáculo está basada en la suposición de que las superficies o regiones reflexivas son grandes comparadas con la longitud de onda de la radiación. Cuando un frente de onda encuentra un obstáculo o una discontinuidad que no es muy grande, entonces el principio de Huygens, que se deduce de las ecuaciones de Maxwell, se usa para explicar el comportamiento de la onda electromagnética. En términos simples, el principio sugiere que cada punto del frente de onda actúa como una fuente de ondas secundarias y la combinación de estas ondas da como resultado un nuevo frente de onda en dirección de la propagación.

Para explicar el principio, se considera la siguiente figura que muestra un frente de onda plano que ha llegado a los puntos AA':



**Figura 3. Explicación del Principio de Huygens. Frente de onda plano**

Las ondas esféricas originadas por cada punto en AA' dan como resultado un nuevo frente de onda BB', el cual se dibuja tangencial a todas las ondas con el mismo radio. Para explicar el efecto observable de que las ondas se propagan solamente en la dirección de AA' a BB', se concluye que las ondas secundarias originadas en los puntos a lo largo de AA' no tienen una amplitud uniforme en todas las direcciones y si  $\alpha$  representa el ángulo entre la dirección de interés y la normal del frente de onda, entonces la amplitud de la onda secundaria en dirección de la propagación es proporcional a  $(1+\cos\alpha) = 2$  y es menor a 2 en cualquier otra dirección. En particular, la amplitud en sentido inverso es  $(1+\cos\pi) = 0$ . Matemáticamente se puede demostrar que las ondas se propagan a lo largo de líneas rectas normales al frente de onda y con un desfase igual  $\frac{2pd}{l}$ , donde  $d$  es la distancia entre las líneas rectas normales (por ejemplo, de AA' a BB').

El principio anterior sólo se aplica cuando la onda se extiende al infinito en ambas direcciones. En la práctica, AA' es grande comparada con la longitud de onda. Supongamos que el frente de onda encuentra un obstáculo que es necesario evadir. Como se muestra en la figura siguiente, es claro que más allá del obstáculo (que se asume impenetrable), sólo un frente de onda semi-infinito CC' existe.

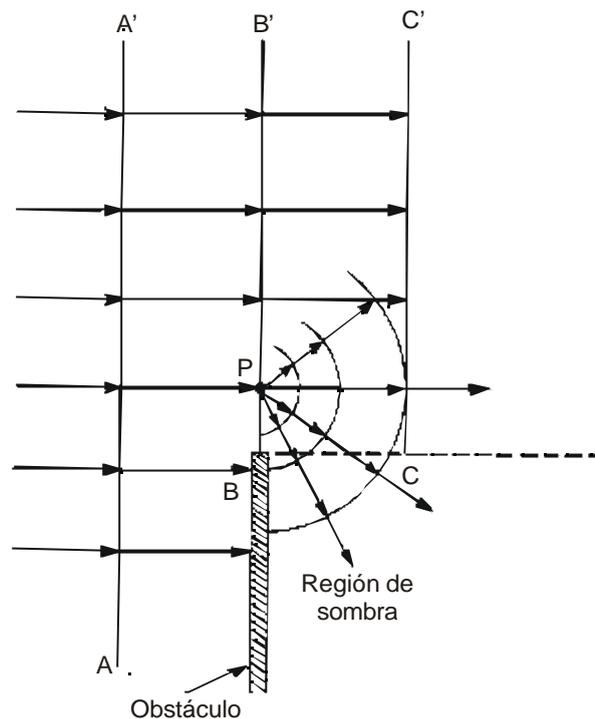


Figura 4. Explicación del Principio de Huygens. Onda difractada por un obstáculo

Una teoría simple de rayos sugiere que no existe campo electromagnético en la región BC, pero el principio de Huygens establece que las ondas secundarias originadas en todos los puntos de BB' (como por ejemplo el punto P) se propagan en la región sombreada y el campo en cualquier punto de esta región puede ser el resultado de la interferencia de todas las ondas secundarias. En términos generales, cualquier evasión de una onda debida a cualquier obstrucción es conocida como difracción.

En conclusión, en términos sencillos el principio sugiere que cada punto del frente de onda actúa como una fuente de ondas secundarias y la combinación de estas ondas dan como resultado un nuevo frente de onda en dirección de la propagación, como se muestra en la siguiente figura:

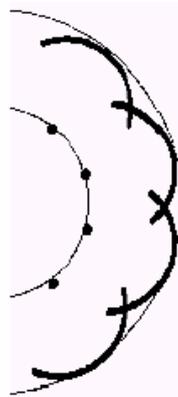
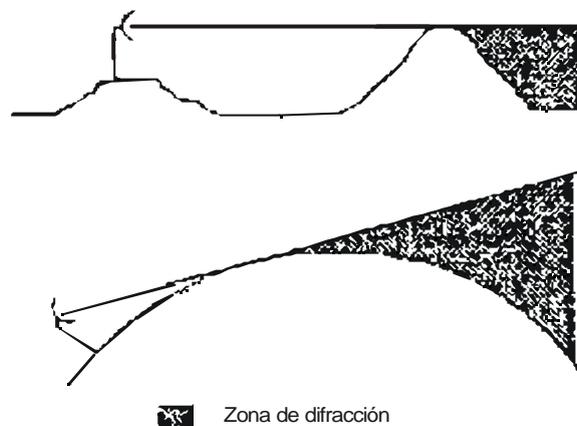


Figura 5. Principio de Huygens. Representación gráfica

### II.2.3. ZONAS DE FRESNEL

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo. La Tierra y sus irregularidades pueden impedir la visibilidad entre la antena transmisora y la receptora en ciertas ocasiones. La zona oculta a la antena transmisora se denomina zona de difracción. Se esperaría que en esta zona los campos fueran nulos, pero no es así. Debido a la difracción causada por el obstáculo en la zona de difracción existe campo electromagnético y por lo tanto, es posible la recepción aunque con atenuaciones superiores a las del espacio libre.

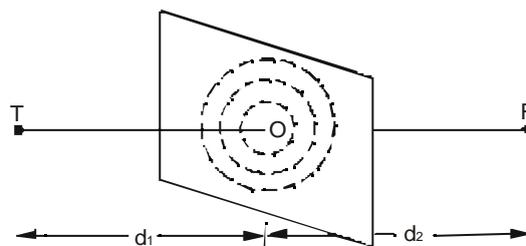
Para ejemplificar gráficamente la zona de difracción, se muestra la siguiente figura:



**Figura 6. Zona de difracción**

En primer lugar es necesario definir la condición de visibilidad entre antenas, es decir, cuándo debe considerarse que un obstáculo interrumpe el camino directo entre la antena transmisora y la receptora. Para ello, se definen las zonas de Fresnel.

Para introducir algunos conceptos asociados a la difracción se considerará el transmisor T y el receptor R en el espacio libre como se muestra en la figura:



**Figura 7. Suposiciones para explicar las zonas de Fresnel**

En cierto punto O en la línea de vista entre el transmisor T y el receptor R se coloca un plano imaginario. Este plano es necesario para explicar las zonas de Fresnel, ya que sobre él se supone una familia de círculos que tiene como característica especial que el total de la longitud de la ruta de T a R pasando por cualquier punto del perímetro de cada círculo es  $\frac{n\lambda}{2}$  más grande que TOR, donde  $n$  es un entero y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal transmitida de T a R.

El círculo más interno podría representar el caso cuando  $n = 1$ , entonces, el exceso de la longitud de la trayectoria es  $\frac{\lambda}{2}$ . En el caso para  $n = 2$ , el exceso de la longitud de la trayectoria sería  $\lambda$ , y así sucesivamente.

El radio de cada círculo individual depende de la ubicación del plano imaginario respecto a la trayectoria de las terminales. El radio más largo es la mitad del camino entre las terminales y comienza a ser menor conforme las terminales se acercan. Los sitios de los puntos para los cuales el excedente de la longitud de la trayectoria es  $\frac{n\lambda}{2}$ , define una familia de elipsoides como se ilustra en la siguiente figura.

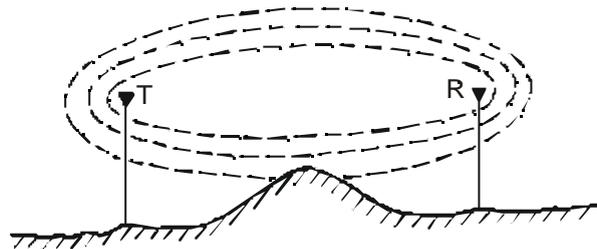


Figura 8. Familia de elipsoides

El radio de cualquier miembro específico de la familia de elipsoides puede ser expresado en términos de  $n$  y de las dimensiones que se muestran en la figura 9, en la que se considera un plano normal a la ruta de línea de vista en cualquier punto entre T y R. Si en dicho plano se construyen círculos concéntricos de cualquier radio, parecerá que cualquier onda que se propague de T a R atravesará algún círculo en la ruta TOR.

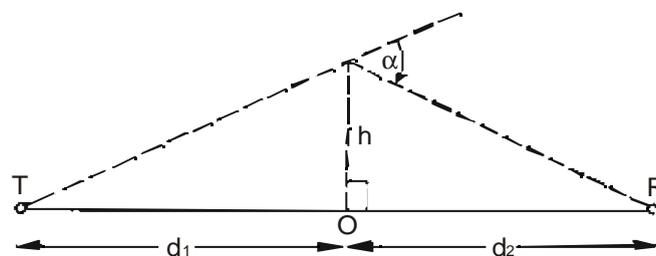


Figura 9. Descripción geométrica para zonas de Fresnel

En términos de la geometría de la figura anterior, el exceso de la longitud de la trayectoria está dado por  $\Delta$ :

$$\Delta \approx \frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} = \frac{n\lambda}{2}$$

donde  $n$  es un número entero

$d_1$  es la distancia entre el punto T (que representa al transmisor) y el punto O (punto arbitrario entre T y R)

$d_2$  es la distancia entre el punto O y el punto R (que representa al receptor)

$h$  es la distancia del punto O a un punto cualquiera en el perímetro de uno de los círculos de la familia

$\lambda$  es la longitud de onda de la señal que se propaga del transmisor T al receptor R

Despejando  $h$ :

$$h = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

donde  $h$  es el radio de un círculo concéntrico interpuesto entre T y R.

Esta es una aproximación en la cual es válido decir  $d_1 \gg h$  y  $d_2 \gg h$  y es realista, excepto en la inmediaciones a la vecindad de las terminales. Al volumen encerrado por cada elipse definida por  $n = 1$  se le conoce como la primera zona de Fresnel, al volumen definido por la elipse correspondiente a  $n = 2$  se le llama segunda zona de Fresnel y así sucesivamente.

La contribución del campo al punto del receptor por la sucesivas zonas de Fresnel tiende a ser opuesta en la fase, por lo tanto interfiere destructivamente más que constructivamente. Si un obstáculo fuera colocado en algún punto entre el transmisor y el receptor, entonces el radio de apertura se incrementaría desde la primera zona de Fresnel hasta que estuviera en la segunda, luego en la tercera y así sucesivamente, con lo que el campo en el receptor podría oscilar. La amplitud de las oscilaciones podrían disminuir gradualmente como pequeñas cantidades de energía propagadas hacia las zonas externas.

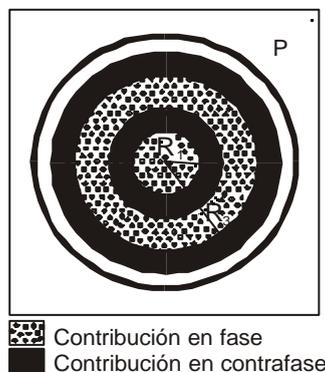


Figura 10. Fase del campo producido por cada una de las fuentes secundarias sobre el receptor

A partir de la definición de las zonas de Fresnel, los campos producidos por las fuentes equivalentes de Huygens situadas en la zona 1 se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a  $180^\circ$ , es decir, constructivamente. Las contribuciones de las fuentes situadas en las zonas 2 y 3 tienden a cancelarse mutuamente, lo mismo que las de las zonas 4 y 5, 6 y 7, y así sucesivamente. Por lo tanto, si en vez del plano P se coloca un plano conductor con un orificio de radio  $R_1$ , esto es, dejando solamente las fuentes secundarias comprendidas dentro de la primera zona de Fresnel y anulando el resto, la potencia recibida en el receptor no disminuirá de forma apreciable.

Por lo anterior, el radio de la primera zona de Fresnel permite definir la condición de visibilidad entre antenas, de forma que mientras no exista un obstáculo en la primera zona de Fresnel se considera que la trayectoria no ha sido obstruida. Por el contrario, cuando un obstáculo se encuentra dentro de la primera zona de Fresnel existirá una disminución apreciable en la potencia recibida, por lo que se considera que la trayectoria ha sido obstruida y deberá considerarse el efecto de la difracción. Esta zona es significativa, ya que concentra el 60% de la potencia radiada.

Es importante mantener la primera zona de Fresnel libre de obstrucciones para lograr una transmisión bajo las condiciones del espacio libre. En la práctica, es necesario levantar antenas suficientemente altas sobre terrenos con obstáculos para lograr tal fin.

## II.2.4. PROPAGACIÓN EN VHF Y UHF

Las características eléctricas de la Tierra y su orografía influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas. Al incidir una onda electromagnética sobre la Tierra se produce una reflexión. La superposición de la onda directa y de la reflejada da lugar a la llamada onda de espacio u onda espacial.

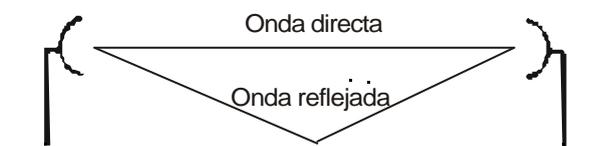


Figura 11. Composición de una onda espacial

La formación de la onda de espacio puede ser constructiva o destructiva en función de las fases de la onda directa y de la reflejada, lo que puede resultar en variaciones apreciables de la potencia recibida respecto al valor esperado en el espacio libre.

La presencia de obstáculos y la propia esfericidad de la Tierra limitan la visibilidad entre la antena transmisora y la receptora. Al incidir una onda electromagnética sobre un obstáculo se produce un fenómeno de difracción por el cual el obstáculo *radia* parte de la energía interceptada. La difracción posibilita la recepción aún en el caso de que no exista visibilidad, aunque con una atenuación adicional respecto al espacio libre. A frecuencias bajas la Tierra se comporta como un buen conductor, por lo que es posible inducir corrientes superficiales sobre la superficie de la Tierra. A estas corrientes superficiales está asociada la onda de superficie que podrá recibirse aunque no exista visibilidad entre las antenas. Para dar una idea del comportamiento de una onda superficial, se muestra la siguiente figura:

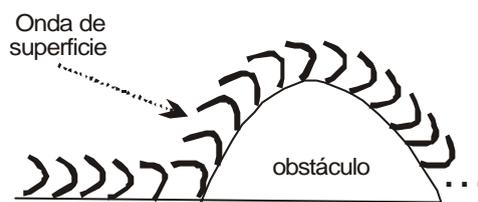


Figura 12. Comportamiento de una onda superficial

En la figura 13 se observa que la altura de las antenas sí es importante debido a los obstáculos que se pueden presentar a lo largo de la trayectoria. Si la antena del transmisor en la figura 13 fuera más alta, seguramente en el receptor se detectarían menores pérdidas. En el caso de esta figura, la antena receptora capta la señal resultante por la difracción, cosa que podría solucionarse si una de las antenas fuera más alta.

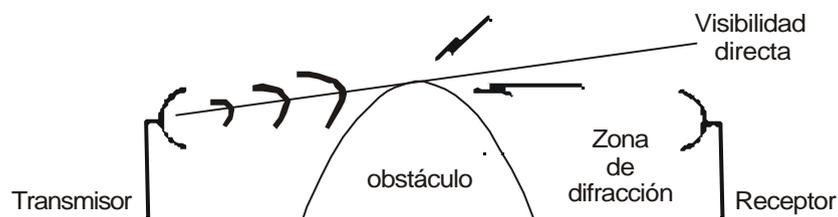


Figura 13. Difracción de una señal ocasionada por un obstáculo

Las ganancias de las antenas son debidas a las alturas efectivas y no a sus patrones de radiación. Esto se explica porque cualquier obstrucción va a producir pérdidas si la antena radia una señal que no libra los obstáculos, a pesar de que la antena tenga buena directividad y una potencia de radiación muy alta. Así, es preferible una antena que pueda evadir la mayor cantidad de obstáculos aunque su patrón y su potencia de radiación no sean los mejores, a una antena con patrón y potencia de radiación calculados exhaustivamente pero sin la altura necesaria para superar los obstáculos que produzcan difracción. Sin embargo, la frecuencia sí afecta en la atenuación de la señal pues las pérdidas por degradación de la señal por multitrayectorias son grandes a altas frecuencias, a diferencia de las bajas pérdidas por el mismo motivo a frecuencias bajas.

La Tierra perturba la propagación de las ondas electromagnéticas, de forma que al establecer cualquier tipo de radiocomunicación en el entorno terrestre aparecerán una serie de fenómenos que modificarán las condiciones ideales de propagación en el vacío.

La difracción permite comunicar dos puntos sin que exista visibilidad directa entre ellos; sin embargo, al aumentar la frecuencia este efecto tiene menos relevancia. Para frecuencias de la banda de UHF y superiores la presencia de un obstáculo (como montañas, edificios, etc.) que obstruya la trayectoria entre las antenas puede limitar gravemente las posibilidades de comunicación.

La presencia de la tierra produce reflexiones cuando incide sobre ella una onda electromagnética. Una hipótesis simplificadora es considerar que la reflexión se produce sobre una superficie plana y lisa. En ese caso la reflexión puede tratarse como un problema de reflexión especular. La tierra es un medio dieléctrico con pérdidas cuyas constantes dieléctricas varían en función del tipo de suelo, el grado de humedad del mismo y la frecuencia. Al incidir una onda plana sobre un dieléctrico se genera una onda transmitida al medio dieléctrico y una onda reflejada. Esta onda reflejada es la que importa para el análisis de propagación en una superficie plana o corrugada.

#### II.2.4.1. PROPAGACIÓN SOBRE SUPERFICIES

La proximidad a un terreno conductor imperfecto afecta el desempeño de una antena. En algunos casos en los que la antena está localizada varias longitudes de onda arriba del suelo, es conveniente considerar las señales que se propagan directamente desde o hacia la antena independientemente de las señales que se reflejan en la superficie terrestre.

##### II.2.4.1.1. PROPAGACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA REFLECTORA

Para distancias de pocos kilómetros, es comúnmente permitido despreciar la curvatura de la Tierra y considerar que la superficie es lisa y plana como se muestra en la siguiente figura:

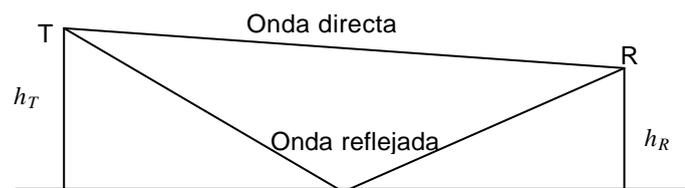


Figura 14. Onda incidente en una superficie plana reflectora

si consideramos que  $d$  es la distancia de separación entre la antena de transmisión y la antena de recepción, y suponemos que  $d \gg h_T$  y también que  $d \gg h_R$ , después de un complejo análisis matemático obtenemos la ecuación:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left( \frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2$$

donde  $P_R$  es la potencia recibida [W]

$P_T$  es la potencia de transmisión [W]

$G_T$  es la ganancia del transmisor

$G_R$  es la ganancia del receptor

$d$  es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor [m]

$h_T$  es la altura de la antena del transmisor [m]

$h_R$  es la altura de la antena del receptor [m]

Esta expresión es conocida como Ecuación de Propagación de Plano-Tierra, y respecto a la Ecuación del Espacio Libre, encontramos dos diferencias importantes:

- la potencia es independiente de la frecuencia
- se observa el inverso de una potencia a la cuarta (en la variable  $d$ ) lo que significa un decremento de potencia más rápido de aproximadamente 12dB por cada vez que la distancia se dobla en longitud

La ecuación de Plano-Tierra en forma logarítmica se escribe:

$$L_p = 10 \log_{10} G_T + 10 \log_{10} G_R + 20 \log_{10} h_T + 20 \log_{10} h_R - 40 \log_{10} d$$

donde  $G_T$  es la ganancia del transmisor

$G_R$  es la ganancia del receptor

$h_T$  es la altura de la antena del transmisor [m]

$h_R$  es la altura de la antena del receptor [m]

$d$  es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor [m]

Como ya se mencionó, a la antena receptora llega una parte de la onda reflejada. Ésta pudo haber incidido sobre una superficie plana, como sería el caso de una extensión de agua. Se observa un decremento más rápido de la potencia, por lo que la potencia de radiación de la antena transmisora debe ser calculada considerando este caso.

Si la extensión de agua está cercana a la antena transmisora, el decremento de la potencia ocurre más pronto y la atenuación es mayor, pues la distancia que le falta por recorrer a la OEM hasta el receptor es mayor a que si la extensión de agua estuviera más cercana al receptor, caso en el que se tendría menor atenuación.

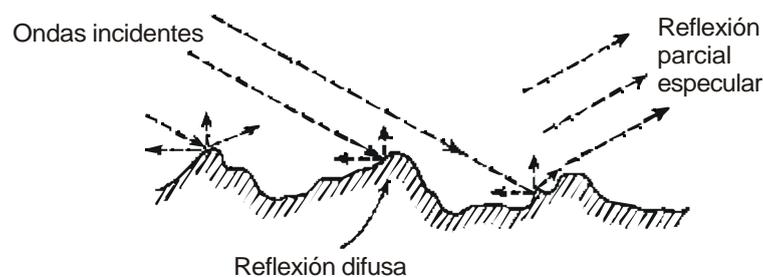
Concluyendo en esta parte:

- Si la extensión de agua está cercana al transmisor, la distancia que le falta por recorrer a la OEM es mayor y por ende, también la atenuación es mayor.
- Si la extensión de agua está cercana al receptor, la distancia que le falta por recorrer a la OEM es menor y por lo tanto, también la atenuación es menor.

Por otra parte, se hace mención de que la potencia es independiente de la frecuencia después de que la onda se refleja en una superficie plana.

#### II.2.4.1.2. PROPAGACIÓN SOBRE UN TERRENO CORRUGADO

Cuando la superficie del terreno es accidentada, las suposiciones de la reflexión no son del todo realistas debido a que la superficie presenta distintas formas dependiendo de dónde incida la onda. Si ocurre una reflexión difusa, los mecanismos son más parecidos a la dispersión. Sólo una pequeña fracción de la energía de la señal es dispersada en la dirección de la antena receptora y la contribución de la onda terrestre reflejada puede despreciarse.



**Figura 15. Onda incidente en una superficie irregular**

La cuestión por lo tanto, es determinar cómo se constituye una superficie accidentada comparada a una superficie lisa. Claramente, una superficie que se considera accidentada a determinadas frecuencias y con determinados ángulos de incidencia, puede aproximarse a una superficie lisa si los parámetros se cambian. Sin embargo, a superficies extremadamente accidentadas los rayos reflejados se encuentran en antifase, por lo tanto, tienden a cancelarse y provoca atenuación alta.

#### II.2.4.2. INFLUENCIAS ATMOSFÉRICAS

En la banda VHF las principales influencias atmosféricas son la refracción y la reflexión de las ondas electromagnéticas debidas a las irregularidades del índice refractivo en la troposfera. En las capas bajas, los efectos ocasionados por el cambio del índice de refracción produce multitrayectorias. En las capas altas, los efectos causan interferencia transhorizontal.

En la banda VHF la onda de superficie se atenúa rápidamente por lo que la comunicación se logra con ondas espaciales entre dos puntos en la misma línea de vista. La difracción permite la recepción de la señal a distancias cortas en áreas urbanas aunque los sistemas de comunicación móviles están sujetos a atenuaciones debidas a multitrayectorias, dispersión y reflexión por obstáculos. Sin embargo, las pérdidas por difracción en esta banda son menores que en la UHF. Los efectos ionosféricos son muy limitados.

En la banda UHF las pérdidas del nivel de la señal se deben principalmente a los efectos ocasionados por la refracción. A frecuencias superiores a los 500MHz, la dispersión troposférica proporciona cierto nivel de recepción en un rango desde los 300km hasta los 600km. En esta banda se tiene la ventaja de que las antenas tiene una ganancia alta y todavía no se perciben efectos ocasionados por la lluvia, aunque sí existen algunos efectos debidos a un fenómeno llamado *ducting*.

El *ducting* es una forma de propagación que en realidad es un caso de refracción. La evaporación del agua de mar causa inversión de temperatura en las regiones que forman la atmósfera. Esto significa que las capas de masa de aire en las que la temperatura es mayor se encuentran arriba de las capas con menor temperatura. La temperatura del aire normalmente decrece con la altitud, pero en una región de inversión disminuye (como es el caso en el *ducting*). La inversión de temperatura forma un ducto en la atmósfera que actúa como una guía de onda. El fenómeno del *ducting* permite la comunicación a grandes distancias para frecuencias en el rango de VHF a EHF.

### II.3. PROPAGACIÓN EN ZONAS URBANAS

Aunque las pérdidas debidas a los edificios y otros obstáculos hechos por el hombre son de mayor importancia, se debe enfatizar que las variaciones del terreno juegan un papel muy importante en algunos casos. En áreas de edificios altos, los efectos de sombra de los edificios y la canalización de las ondas a lo largo de las calles hace que la tarea para conocer la media de la intensidad del campo se dificulte. Comúnmente, las trayectorias de propagación más fuertes no son las más directas y la intensidad de la señal en las avenidas que son radiales o aproximadamente radiales con respecto a la dirección de la estación base,

frecuentemente excede a aquellas que son circulares. En áreas suburbanas existen edificios poco altos y el efecto de la canalización es menos importante. De otra manera, los efectos del follaje, usualmente despreciados en el centro de las ciudades, puede tomar bastante importancia. Generalmente, el efecto de los árboles es similar al de algunos edificios, introduciendo pérdidas de propagación y produciendo atenuación.

La estimación de la señal recibida por el equipo móvil receptor se realiza en dos etapas, que son: la predicción de la media de la intensidad del campo en una pequeña porción del área de servicio y la descripción de la variabilidad alrededor del valor de la media. La cuantificación de la extensión para señales que fluctúan dentro del área bajo consideración, es también un problema en el que se involucran dos factores de contribución: la variación, en términos cortos, alrededor del valor medio local y la variación, en términos grandes, en el valor medio local causada por cambios grandes en las características del terreno entre el equipo móvil y la estación base, pues mientras el equipo móvil se mueva de un lugar a otro, va cambiando la topografía local. Esto es conocido como *slow-fading* y tiene características que pueden describirse por una distribución estadística logarítmica normal obtenida a partir de experimentos y contenida en las técnicas de predicción de propagación.

### **II.3.1. CLASIFICACIÓN DEL ENTORNO**

La propagación de las ondas de radio en un área de edificios altos se ve fuertemente influenciada por la naturaleza del entorno, en particular por el tamaño y la densidad de los edificios. Generalmente, en los estudios de propagación de comunicaciones radio-móvil, es común una descripción cualitativa del entorno usando términos como rural, urbano y suburbano.

Las áreas urbanas están definidas como aquellas donde predominantemente hay edificios altos, oficinas y grandes centros comerciales, mientras que las áreas suburbanas comprenden unidades residenciales, parques y jardines. El término rural define espacios abiertos, ranchos, granjas con construcciones pequeñas y separadas, y bosques. Esta descripción cualitativa no siempre es muy precisa y está expuesta a distintas interpretaciones. Por ejemplo, un área descrita como urbana para una ciudad puede ser definida como suburbana en otro país, lo cual nos lleva a dudar qué modelo de predicción utilizar. Por lo tanto, existe una necesidad importante de describir el entorno cuantitativamente para evitar una confusión cualitativa, la cual puede ser dada por diferencias culturales o de criterio.

Debido a varias interacciones ambientales, las características del terreno tales como los edificios o los árboles son comúnmente encontrados en muchas concentraciones humanas dispersas en espacio. Desde esta perspectiva, el paisaje del terreno es visto como una conglomeración de numerosos grupos de objetos. Por

---

ejemplo, el centro de una ciudad se parece a una colección aleatoria de edificios, donde cada edificio presenta una dispersión. Así, un bosque también parece una colección de árboles. Si las propiedades estadísticas de los grupos o conglomeraciones de dispersión individual son conocidas y también la dispersión demográfica por grupo, entonces es posible dar una descripción cuantitativa del entorno haciendo uso de la estadística.

Un método de clasificación del entorno puede estar basado en una aproximación. Cualquier servicio de radiocomunicación móvil en un área dada puede ser visto como una mezcla o combinación de tipos de entornos. Considerando la relevancia de los efectos del entorno en la propagación de señales, las siguientes características se pueden utilizar para la clasificación de entornos:

1. Densidad de edificios (porcentaje del área donde hay edificios)
2. Tamaño de edificios (área cubierta por un edificio)
3. Altura del edificio
4. Ubicación del edificio
5. Densidad de vegetación
6. Ondulaciones del terreno

Usando algunas o todas estas características, varios investigadores han desarrollado clasificaciones de los entornos y las han tomado al llevar a cabo experimentos para determinar métodos de predicción de la intensidad del campo o de su media en un área pequeña basándose en la estadística.

Cuando surgió el Modelo de Okumura, era esencial recopilar datos sobre el tipo de terreno y el uso de la tierra, lo cual implicaba el uso de manuales, costos elevados y mucho tiempo de procesamiento. Actualmente se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (GIS, Geographic Information Systems). Estos sistemas utilizan tecnología digital de bases de datos y facilitan el almacenamiento y la recuperación de la información. En este contexto, se han intensificado los procesos de digitalización del terreno en mapas de 500X500m de área cuadrada, mientras que el contorno del terreno de los mapas se hace para áreas mucho más extensas. En el futuro, será necesario adoptar categorías estándares del tipo de terreno y relacionarlas con los estándares empleados en un GIS para poder aplicarlos a nivel mundial.

Con respecto a las simulaciones en computadora, los métodos han redefinido su categorización. Desde un mapa digitalizado es posible extraer los siguientes parámetros de tipo de terreno:

1. Ubicación de edificios (con respecto a un punto)
2. Tamaño de edificios o área base
3. Área total ocupada por edificios
4. Número de edificios en un área específica
5. Parque y jardines con árboles y vegetación

Además de las tres clasificaciones del entorno (urbana, suburbana y rural), se propone una subclasificación:

Para un entorno rural:

- a) Plana
- b) Accidentado
- c) Montañoso

Para un entorno suburbano:

- a) Residencial con algunos espacios abiertos
- b) Residencial con pocos espacios abiertos
- c) Alta concentración de conjuntos habitacionales

Para un entorno urbano:

- a) Área de compras
- b) Área comercial
- c) Área industrial

Una vez definidas las clasificaciones del entorno, es más sencillo comprender el factor de corrección que el Modelo de Okumura emplea para considerar las pérdidas debido a la difracción por obstáculos, ya sea naturales (por ejemplo: árboles y montañas) o construidos por el hombre (por ejemplo: edificios o casas). En el siguiente capítulo se detalla el Modelo de Okumura y los factores de corrección que considera.

---

## CAPÍTULO III. MODELO DE OKUMURA

### III.1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia del servicio en las comunicaciones móviles está fuertemente ligada a la calidad lograda en la transmisión. Sin embargo, no es sencillo lograr la calidad deseada pues el canal radio presenta limitaciones fundamentales en la eficiencia de estos sistemas ya que una señal transmitida por este medio se ve atenuada debido a diferentes factores.

Uno de esos factores es la atenuación por propagación que se determina con base en diferentes características existentes en el entorno en el que se da la transmisión, tales como el tipo de ciudad, las alturas de las antenas involucradas, entre otros. Así, para alcanzar el nivel de calidad establecido en los sistemas de comunicaciones móviles, es importante llevar a cabo una caracterización adecuada de todos aquellos factores que influyen en la señal transmitida. Una manera de llevar a cabo esto es por medio de la simulación de los efectos de la transmisión de una señal a través del canal radio.

Para determinar las pérdidas básicas por transmisión existen diferentes modelos que toman parámetros específicos del entorno en el que se da la propagación con el fin de obtener el valor más preciso de las pérdidas. Uno de ellos es el Modelo de Okumura.

En 1962 y posteriormente en 1965, un grupo de científicos japoneses dirigidos por Yoshihisa Okumura realizaron experimentos con el fin de obtener datos fundamentales en el diseño de radios móviles y radios terrestres. En esos años se buscaba introducir nuevas bandas de frecuencias, las cuales se preveía que serían muy demandadas en un futuro debido al nacimiento de las entonces nuevas comunicaciones móviles-terrestres. Para efectuar tales experimentos, se seleccionaron cuatro bandas de frecuencias entre los 450 y los 2000 MHz. Se obtuvieron todo tipo de características de atenuación y variación de la intensidad del campo eléctrico, tanto para terrenos casi planos como para terrenos montañosos, valles o cualquier tipo de terreno irregular lleno de obstáculos.

Los resultados experimentales que se obtuvieron en la banda UHF fueron añadidos a los resultados formalmente obtenidos en experimentos anteriores en la banda VHF a 200MHz, adecuando las cartas de diseño de propagación de los radios móviles en los rangos de frecuencia de 150 a 2000MHz, con una transmisión de la estación base por medio de antenas de 30 a 1000m de altura y distancias de separación entre ellas de 1 a 100km. Okumura y su equipo describieron un método para predecir con exactitud la intensidad de campo para varios tipos de terreno y de alteraciones ambientales, el cual a continuación se describe.

---

## III.2. DESCRIPCIÓN

Okumura y su equipo elaboraron un modelo completamente empírico desarrollado a partir de mediciones hechas en Japón con diferentes frecuencias representativas de los servicios de comunicación móvil. Las curvas fueron realizadas considerando los valores medidos como una función de un número de parámetros de propagación básica, tales como el tipo de entorno, la irregularidad del terreno y las alturas de las antenas.

El Modelo de Okumura fue desarrollado para predecir la intensidad del campo eléctrico recibido sin saber con detalle la trayectoria real entre la estación base y el móvil, pues se utilizan las características generales del terreno como entradas del modelo. Además, las mediciones se hicieron cada 30° ó 45° alrededor de la estación base para cubrir la totalidad del terreno. Los perfiles de la predicción de terrenos fueron bosquejados con ayuda de mapas topográficos. Sin embargo, en la actualidad el modelo requiere de mediciones más precisas, necesidad que se ha logrado con ayuda de computadoras y bases de datos más grandes. Gracias a la tecnología de las computadoras, éste modelo sigue teniendo vigencia pues es posible obtener valores de mediciones hechas cada 1° o menos.

El modelo está basado en el uso de factores de corrección que hacen posible asociar los resultados del modelo al tipo de entorno, a la irregularidad del terreno y a las alturas de las antenas correspondientes a la trayectoria real del móvil. Para ello, se definieron los siguientes factores:

- Características del terreno
- Tipos de entorno

### III.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

Okumura definió cinco aspectos que caracterizan al terreno:

1. Altura efectiva de la antena de la estación base ( $h_{te}$ ): la cual está definida por

$$h_{te} = h_{ts} - h_{ga} \text{ [m]}$$

donde:  $h_{ts}$  es la altura de la antena sobre el nivel del mar y

$h_{ga}$  es la altura promedio del terreno entre los 3km y los 15km de la longitud de la trayectoria.

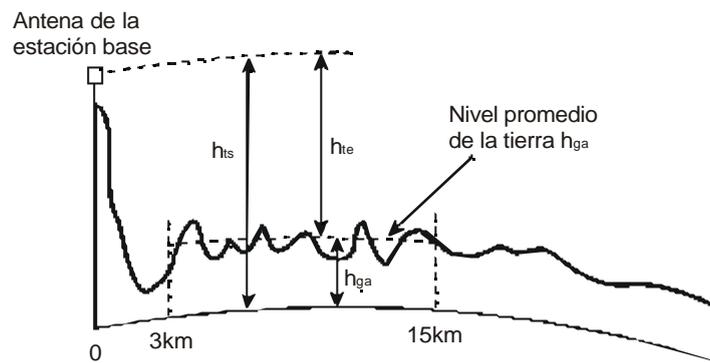


Figura 16. Altura efectiva de la antena de la estación base ( $h_{te}$ )

2. Ondulación del terreno ( $\Delta h$ ): definido como el rango promedio de las alturas del terreno, considerado que el móvil se encuentra a 10km de la estación base.

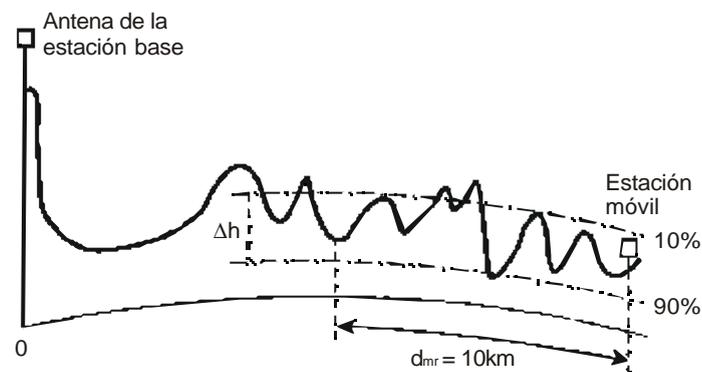


Figura 17. Ondulación del terreno ( $\Delta h$ )

Para determinar el parámetro de ondulación es necesario calcular la función de distribución del perfil de la altura y calcular la diferencia entre el 90% y el 10% como se ilustra en la figura:

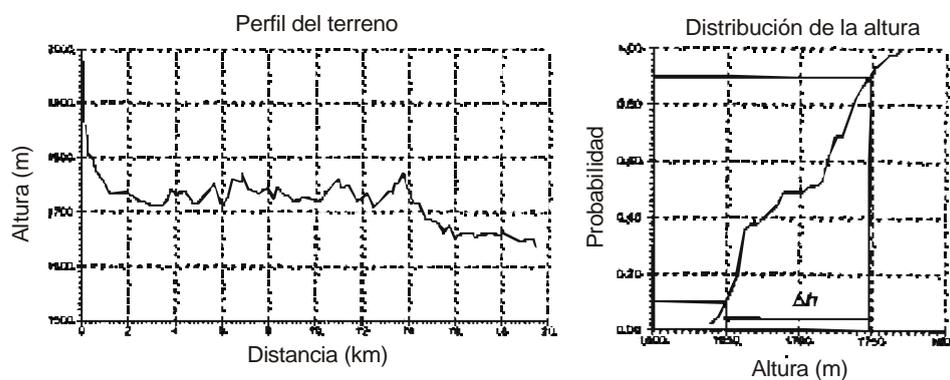


Figura 18. Perfil del terreno y su distribución de probabilidad

El valor aproximado de la ondulación para este caso específico es  $\Delta h = 100\text{m}$

3. Parámetro de la trayectoria y el obstáculo aislado ( $h$ ): se usa para cuantificar los efectos de la difracción causada por un obstáculo aislado en la trayectoria. Cuando un solo obstáculo está bloqueando la trayectoria de la señal, se dice que está aislado. El parámetro  $h$  se evalúa con respecto al promedio de la altura del terreno, como se ilustra en la figura:

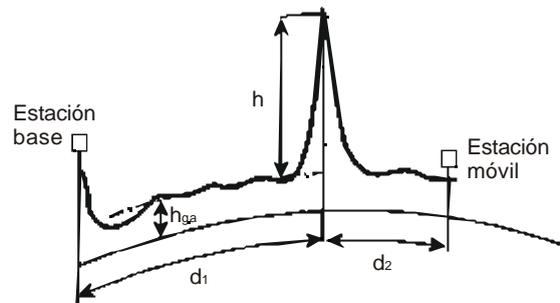


Figura 19. Parámetro de la trayectoria y el obstáculo aislado ( $h$ )

La siguiente figura muestra el modelo teórico de cómo se representa un obstáculo, en la que se asume una altura promedio de 200m.

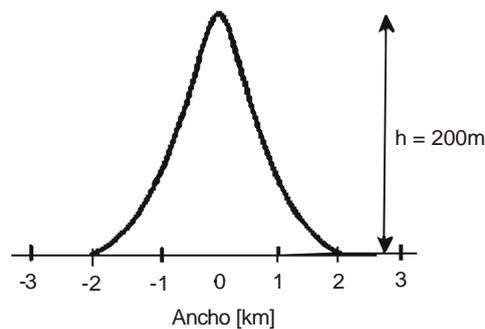


Figura 20. Ejemplo un obstáculo aislado

4. Inclinación media del terreno ( $\theta_m$ ): existen secciones del perfil del terreno donde se observa una inclinación por al menos 5km a 10km. El parámetro de inclinación  $\theta_m$  puede ser definido como se muestra en la siguiente figura:

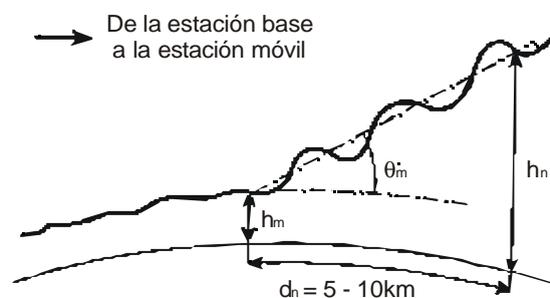


Figura 21. Inclinación media del terreno ( $\theta_m$ )

$$q_m = \frac{h_n - h_m}{d_n}$$

donde  $h_n$  es la altura promedio de la parte más alta de la inclinación

$h_m$  es la altura promedio de la parte más baja de la inclinación

$d_n$  es la distancia entre los puntos de referencia de  $h_n$  y  $h_m$

5. Parámetro de trayectoria combinada mar-tierra  $\beta$ : este parámetro es utilizado para cuantificar los efectos de la propagación sobre trayectorias que parcialmente atraviesan extensiones de agua. Es importante determinar el orden en el que se encuentran sobre la trayectoria las extensiones de tierra o de agua.

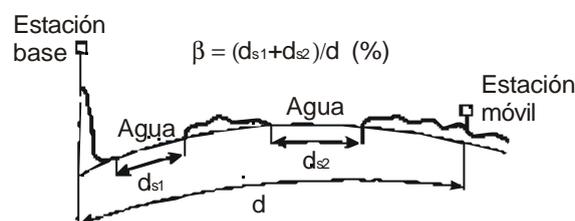


Figura 22. Parámetro de trayectoria combinada mar-tierra  $\beta$

### III.2.2. TIPO DE ENTORNO

Para conocer los efectos de bloqueo y de sombra por obstáculos inmediatos al móvil bajo estudio (se asume que la estación base está libre de obstrucciones en su vecindad), se debe considerar el tipo de uso de terreno en la vecindad del móvil. El Modelo de Okumura distingue claramente entre tres tipos de entornos:

1. Área abierta: un entorno puede ser considerado como área abierta si no existen obstáculos alrededor de 300m a 400m en dirección de la estación base y alrededor de la posición del móvil.
2. Áreas suburbanas: las áreas suburbanas son aquellas con algunos obstáculos cercanos al móvil aunque con poca densidad.
3. Áreas urbanas: son ciudades con altos edificios y con casas de más de dos plantas.

Una categoría morfológica necesaria que no está incluida en el Modelo de Okumura es la de Área Boscosa. Algunos trabajos realizados en Alemania demostraron que la atenuación en zonas boscosas era similar en magnitud a las pérdidas observadas en áreas urbanas. Se puede notar que la clasificación de entornos puede parecer subjetiva y depende de un alto grado en el tipo de país o región. Por ejemplo, un área urbana en Estados Unidos es diferente a una en Japón o Europa. Para superar esta situación, el Modelo de Okumura ha sido complementado con estudios subsecuentes en los que se pueden cuantificar la densidad de los edificios.

### III.3. FACTORES DE CORRECCIÓN PRINCIPALES

A continuación se describen los cuatro factores de corrección que se consideran principales en el cálculo de pérdidas por medio del Modelo de Okumura.

#### III.3.1. ATENUACIÓN RELATIVA MEDIA $A_{mu}$

$A_{mu}$  es la atenuación media relativa respecto al espacio libre en un área urbana (entorno de referencia) suponiendo una altura efectiva de la antena en la estación base  $h_{te}$  de 200m y una altura de la antena móvil  $h_{re}$  de 3m sobre terreno casi liso. Depende de la distancia y la frecuencia. Está dada en dB.

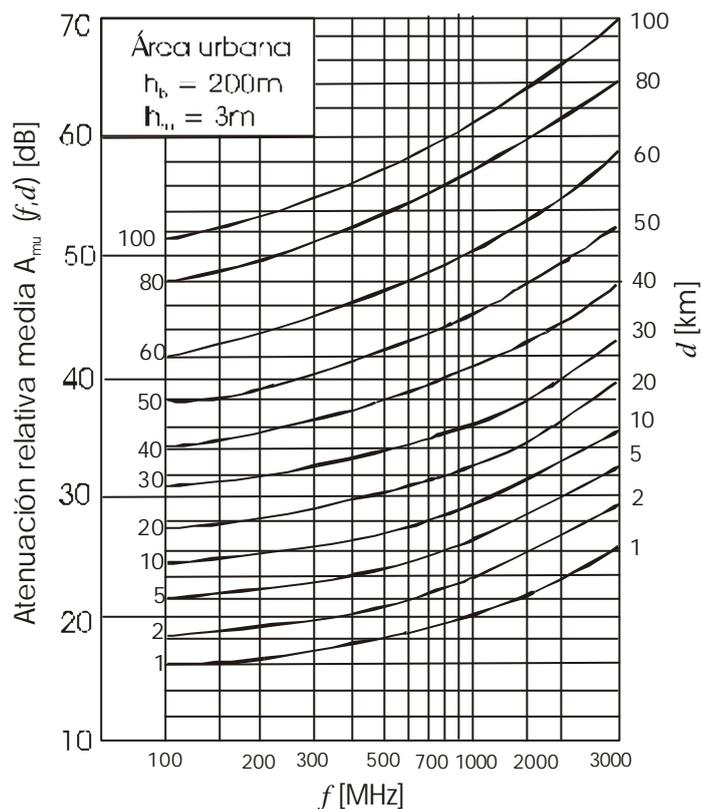


Figura 23. Gráfica de la atenuación relativa media  $A_{mu}$

La atenuación media del campo eléctrico en áreas urbanas de edificios altos depende de variables tales como la altura media de los edificios, la media del ancho de las calles, el ángulo vertical de llegada de la señal desde

la antena de la estación base y también la dirección de propagación considerando la llegada de la señal. La relación del ángulo vertical de llegada está también relacionada con la altura de la estación base y la distancia.

### III.3.2. FACTOR DE GANANCIA $G_{hte}$

El factor de ganancia  $G_{hte}$  es la ganancia debida a la altura de la antena de la estación base en áreas urbanas. Depende de la distancia entre la base y el móvil y de la altura efectiva de la antena de la base. Se toma un valor de referencia de 200m de altura de la antena en la estación base. Para este valor, la ganancia del parámetro es de 0dB.

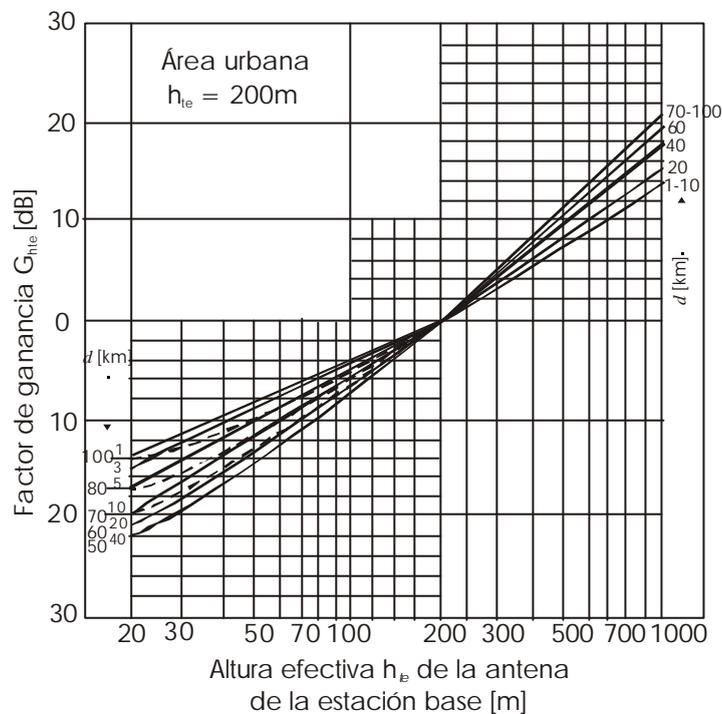


Figura 24. Gráfica del factor de ganancia de altura  $G_{hte}$

### III.3.3. FACTOR DE GANANCIA $G_{hre}$

$G_{hre}$  es la ganancia debida a la antena de la estación móvil. Depende de la frecuencia de la señal entre la estación base y móvil, y de la altura efectiva de la antena del móvil. Se toma un valor de referencia de 3m para la altura de la antena del móvil.

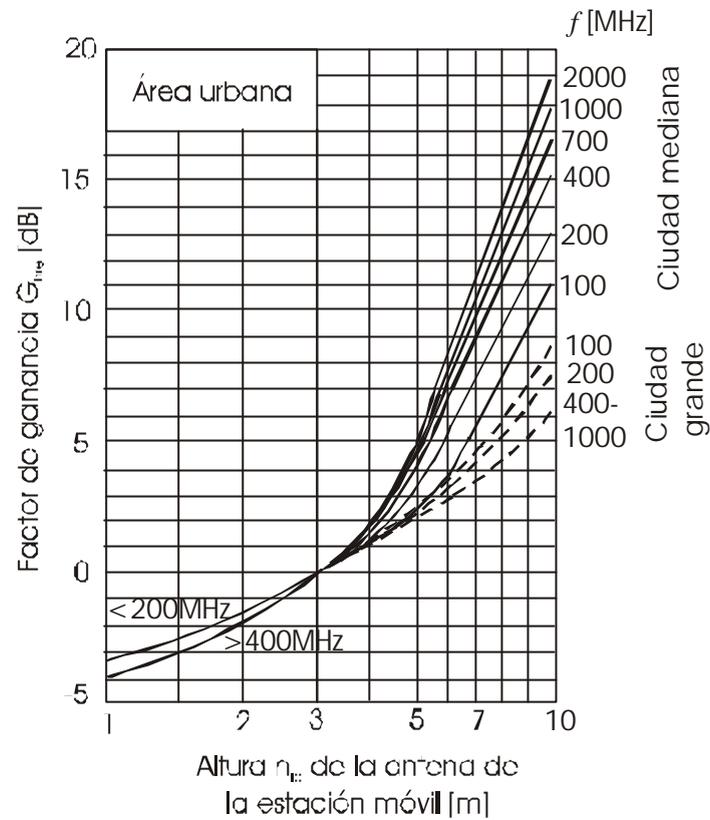


Figura 25. Gráfica del factor de ganancia de altura  $G_{h_e}$

### III.3.4. FACTOR DE CORRECCIÓN $G_{area}$

$G_{area}$  es el factor de corrección que se aplica cuando se calcula en áreas abiertas, cuasiabiertas o suburbanas.

Debido a que el entorno de referencia en este modelo es el urbano, se utiliza este factor de corrección para adecuarlo a otros entornos. Estos factores no dependen de la distancia entre terminales aunque sí de la frecuencia de propagación.

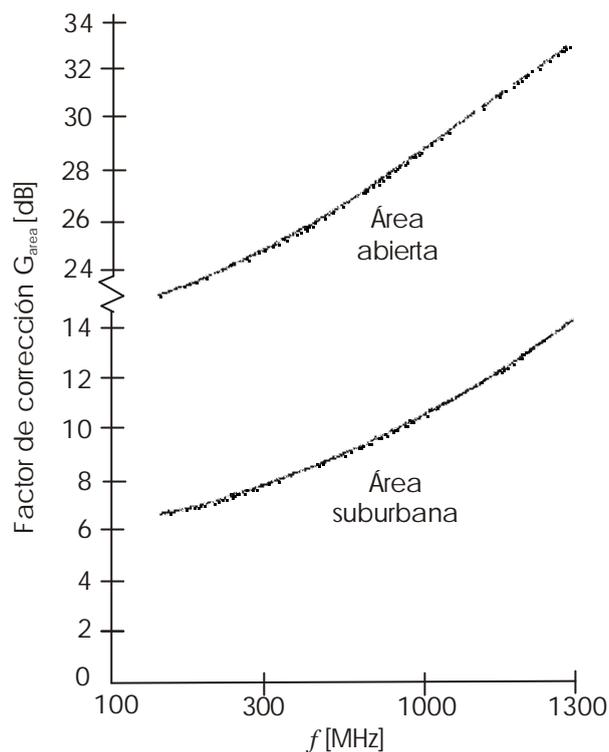


Figura 26. Gráfica del factor de corrección  $G_{\text{area}}$

### III.4. FACTORES DE CORRECCIÓN ADICIONALES

El Modelo de Okumura está referido a un entorno considerado área urbana y a un tipo de terreno casi liso. Si una trayectoria de propagación en particular ocurre en diferentes tipos de entornos o en terreno que no es casi liso, se aplican los factores de corrección adicionales.

Los factores de corrección adicionales, en forma gráfica, son usados en el cálculo de las pérdidas totales de la transmisión en áreas urbanas, suburbana y sobre terreno irregular. Estas correcciones pueden ser sumadas o restadas según sea necesario. Los parámetros relacionados, que son evaluados para determinar los factores de corrección, son las características del terreno definidas por Okumura mencionadas en la sección III.2, las cuales son:

1. Parámetro de la trayectoria y el obstáculo aislado ( $h$ )
2. Inclinação media del terreno ( $\theta_m$ )
3. Variación de la altura u ondulación del terreno ( $\Delta h$ )
4. Parámetro de trayectoria combinada mar-tierra  $\beta$
5. Altura efectiva de la antena de la estación base ( $h_{te}$ )

### III.4.1. FACTOR DE CORRECCIÓN $k_{IM}$

El factor de corrección  $k_{IM}$  corresponde al parámetro de la trayectoria y el obstáculo aislado (h). Se utiliza cuando la propagación de una señal en la trayectoria de la base al móvil (o viceversa) es obstruida por un obstáculo aislado (por ejemplo, una montaña). Los valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores para el factor de corrección  $k_{IM}$

<i>Distancia <math>d_2</math> del móvil al obstáculo</i> [km]	<i><math>k_{IM}</math> para una distancia entre base y móvil <math>d_1=15</math> km</i> [dB]	<i><math>k_{IM}</math> para una distancia entre base y móvil <math>d_1=30</math> km</i> [dB]	<i><math>K_{im}</math> para una distancia entre base y móvil <math>d_1=60</math> km</i> [dB]
0.0	5	10	20
0.25	0	6	12
0.50	-4	2	7
0.75	-8	-3	0
1.00	-13	-8.8	-4
1.25	-11	-10.5	-5.5
1.50	-15	-12	-6.5
1.75	-16	-12.5	-6.7
2.00	-17.5	-12.8	-6.8
2.25	-18	-12.6	-6.8
2.50	-18	-12.4	-6.7
2.75	-18	-12.2	-6.3
3.00	-17.5	-12	-6.0
3.25	-17	-11.5	-5.6
3.50	-16	-11	-5.2
3.75	-15.5	-11	-4.8
4.00	-15	-10	-4.6
4.25	-14.2	-9.5	-4.2
4.50	-13.7	-9	-4.0
4.75	-13.3	-8.5	-3.8
5.00	-12.8	-8	-3.6
5.25	-12	-7.7	-3.4
5.50	-11	-7.0	-3.0
5.75	-10.5	-6.7	-2.8
6.00	-10	-6.4	-2.4

6.25	-9.5	-6.0	-2.2
6.50	-9	-5.7	-2
6.75	-8.5	-5.2	-1.8
7.00	-8	-4.8	-1.5
7.25	-7.5	-4.4	-1.3
7.50	-7	-4	-1
7.75	-6.5	-3.8	-0.7
8.00	-6	-3.5	-0.5

### III.4.2. FACTOR DE CORRECCIÓN $k_{SP}$

El factor de corrección  $k_{SP}$  corresponde al parámetro relacionado a la inclinación media del terreno  $\theta_m$ . Este factor se aplica en casos en los que la altura media de la tierra está ligeramente inclinada para distancias de 5km a 10km. El factor de corrección  $k_{SP}$  se define en la siguiente figura:

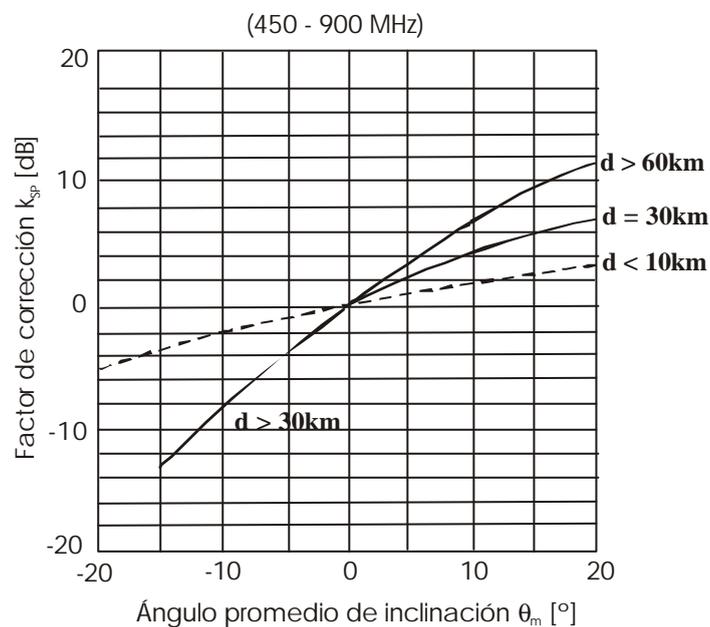


Figura 27. Gráfica del factor de corrección  $k_{SP}$

En la tabla 3 se concentran los valores correspondientes aproximados para el factor de corrección  $k_{SP}$ :

Tabla 3. Valores del factor de corrección  $k_{SP}$ 

Angulo [ $^{\circ}$ ]	$d < 10 \text{ km}$ $k_{SP}$ [dB]	$d = 30 \text{ km}$ $k_{SP}$ [dB]	$d > 30 \text{ km}$ $k_{SP}$ [dB]	$d > 60 \text{ km}$ $k_{SP}$ [dB]
0	0.0	0.0	*	0.0
2	0.2	1.0	*	1.5
4	0.6	2.0	*	3.0
5	1.0	2.4	*	4.0
6	1.2	3.0	*	4.8
8	1.6	4.0	*	6.2
10	1.9	4.3	*	7.2
12	2.0	4.8	*	8.1
14	2.3	5.5	*	9.2
15	2.4	5.9	*	10.0
16	2.6	6.2	*	10.6
18	2.8	6.7	*	11.4
20	3.0	7.0	*	12
-2	-0.3	*	-1.3	*
-4	-0.7	*	-2.8	*
-5	-1.0	*	-3.5	*
-6	-1.4	*	-4.5	*
-8	-1.8	*	-6.3	*
-10	-2.2	*	-8.0	*
-12	-2.6	*	-9.2	*
-14	-3.0	*	-11.0	*
-15	-3.5	*	-12.5	*
-16	-3.9	*	-14.0	*
-18	-4.6	*	-16.0	*
-20	-5.2	*	-18.0	*

### III.4.3. FACTOR DE CORRECCIÓN $k_{ter}$

El factor de corrección  $k_{ter}$  corresponde al parámetro de ondulación del terreno ( $\Delta h$ ). Una aproximación del factor para terrenos con ondulación está dada en la figura 27, la cual se basa en los trabajos de la ITU<sup>1</sup> y Okumura. El factor de corrección estima la atenuación para terrenos urbanos casi lisos. Se podrían calcular predicciones más exactas (para terrenos más accidentados) pero se presentaría dependencia en frecuencia y en la distancia de separación de las antenas. Si se conoce la localización del móvil y éste se encuentra en la cresta (parte más alta) de una ondulación, el factor de corrección  $k_{SP}$  puede ser ignorado. En cambio, si el móvil se localiza en el valle (parte más baja) de la ondulación, la atenuación es más alta y el factor de corrección correspondiente es el que se indica en la figura 28:

<sup>1</sup> ITU Report 370-1, Oslo, 1966 II.

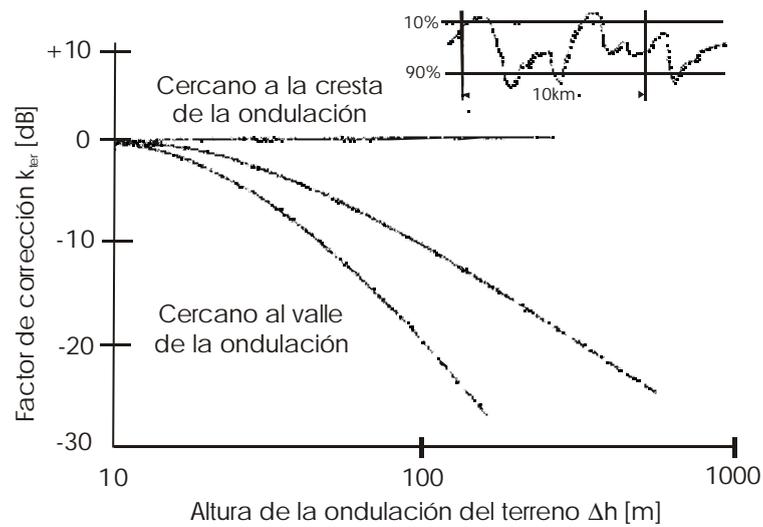


Figura 28. Gráfica del factor de corrección  $k_{ter}$

Los valores del factor de corrección  $k_{ter}$  para terreno con ondulaciones están en función de la variación de la altura  $\Delta h$  (como se muestra en la figura 28). Para facilitar el cálculo se tiene la tabla 4 en la que se determina los tipos de terrenos de acuerdo a  $\Delta h$ .

Tabla 4. Tipos de terreno según la variación de la altura

Tipo de Terreno	Dh [m]
Muy suave	0-5
Suave	5-20
Pocas ondulaciones	20-40
Con ondulaciones	40-80
Colinas	80-150
Pocos obstáculos	150-300
Muchos obstáculos	300-700
Muy obstaculizado	>700

Para cada tipo de terreno se obtuvo el promedio de las pérdidas de acuerdo a las curvas de la figura 28. Los valores resultantes se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Valores del factor de corrección  $k_{ter}$  para diferentes tipos de terreno.

Tipo de Terreno	$k_{ter}$ [dB]
Muy suave	0
Suave	-2
Pocas ondulaciones	-3

Con ondulaciones	-6.5
Colinas	-10.5
Pocos obstáculos	-15
Muchos obstáculos	-21
Muy obstaculizado	-28

### III.4.4. FACTOR DE CORRECCIÓN $k_{ts}$

Usualmente, en trayectorias de propagación donde hay una extensión de agua entre las estaciones transmisoras y receptoras, la señal de potencia recibida tiende a ser más grande que para casos donde la trayectoria es solamente sobre tierra. El cambio de la señal de potencia depende de la distancia de separación de las antenas y también de que la extensión de agua esté situada más cerca al receptor móvil o al transmisor de la estación base, o en alguna parte entre ellos. Se define una razón  $\beta$  que representa la fracción de la trayectoria sobre una extensión de agua. La figura 29 ilustra dos trayectorias geométricas y la definición de facto de corrección  $k_{ts}$  de  $\beta$  en cada caso.

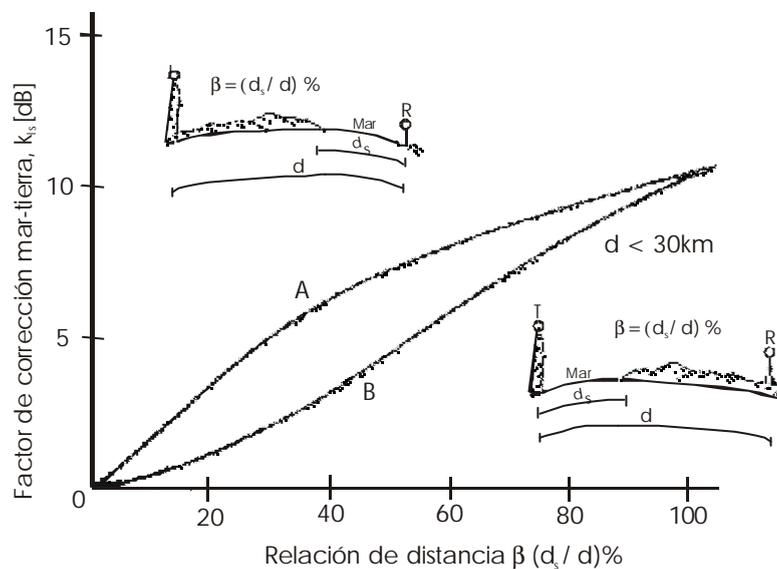


Figura 29. Gráfica del factor de corrección  $k_{ts}$

Se observa que cuando la porción más próxima de la trayectoria desde la antena de la estación base a la antena del móvil es agua, la señal de potencia es típicamente 3 dB más alto que para casos donde la porción más próxima de la trayectoria base-móvil es tierra. Las curvas aproximadas para trayectorias combinadas tierra-mar se obtuvieron experimentalmente por el equipo de Okumura, las cuales proporcionan un factor de

corrección en términos del porcentaje de la trayectoria sobre el agua. En la tabla 6 se concentran los valores correspondientes aproximados para el factor de corrección  $k_{ls}$ .

Tabla 6. Valores para factor de corrección  $k_{ls}$

(%) ( $ds/d$ )*100	$d \leq 30km$		$d \geq 60km$	
	<i>Mar-Base</i> <i>Tierra-Móvil</i> $k_{sl}$ [dB]	<i>Tierra-Base</i> <i>Mar-Móvil</i> $k_{ls}$ [dB]	<i>Mar-Base</i> <i>Tierra-Móvil</i> $k_{sl}$ [dB]	<i>Tierra-Base</i> <i>Mar-Móvil</i> $k_{ls}$ [dB]
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.5	0.1	0.6	0.7	1.0
5.0	0.3	1.2	1.0	1.8
7.5	0.4	1.7	1.2	2.5
10.0	0.6	2.0	1.5	3.0
12.5	0.8	2.5	1.8	3.8
15.0	1.0	2.9	2.0	4.3
17.5	1.2	3.4	2.4	4.9
20.0	1.4	3.7	2.7	5.4
22.5	1.5	4.1	3.1	6.0
25.0	1.8	4.5	3.4	6.3
27.5	2.1	4.9	3.8	7.0
30.0	2.4	5.2	4.2	7.4
32.5	2.6	5.4	4.5	7.9
35.0	2.9	5.7	4.8	8.2
37.5	3.2	6.1	5.1	8.8
40.0	3.5	6.4	5.5	9.1
42.5	3.8	6.7	6.0	9.5
45.0	4.1	7.0	6.2	9.9
47.5	4.5	7.2	6.6	10.2
50.0	4.7	7.5	7.0	10.5
52.5	5.0	7.7	7.6	10.7
55.0	5.4	8.0	8.0	11.0
57.5	5.7	8.2	8.5	11.3
60.0	6.0	8.4	8.9	11.7
62.5	6.5	8.6	9.5	12.0
65.0	7.0	8.8	10.0	12.4
67.5	6	9.0	10.4	12.6
70.0	7.8	9.2	10.7	12.8
72.5	8.2	9.4	11.2	13.0
75.0	8.6	9.6	11.6	13.2
77.5	9.1	9.8	12.1	13.3
80.0	9.5	10.0	12.5	13.7
82.5	9.9	10.1	12.9	13.8
85.0	10.2	10.2	13.2	14.0
87.5	10.4	10.4	13.7	14.1
90.0	10.6	10.6	14.1	14.2
92.5	10.7	10.7	14.3	14.3
95.0	10.8	10.8	14.5	14.5
97.5	10.9	10.9	14.6	14.6
100	11	11	14.7	14.7

### III.5. DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS BÁSICAS POR PROPAGACIÓN

Para calcular las pérdidas por propagación utilizando el modelo de Okumura, primero se determinan las pérdidas en espacio libre:

$$L_F = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

donde:  $f$  es la frecuencia de propagación en MHz y  
 $d$  es la distancia entre transmisor y receptor en km

Posteriormente, se leen en las curvas que Okumura desarrolló los valores de los factores  $A_{mu}$ ,  $G_{hte}$ ,  $G_{hre}$  y  $G_{area}$ . Entonces, el valor de las pérdidas por trayectorias de propagación está dado por:

$$L_{50}(dB) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(d, h_{te}) - G(f, h_{re}) - G_{AREA}$$

donde  $L_{50}$  [dB] es el valor de las pérdidas medias por propagación.

$L_F$  [dB] son las pérdidas en el espacio libre.

$A_{mu}$  [dB] es la atenuación media relativa en el espacio libre, figura 23.

$G_{hte}$  [dB] es el factor de ganancia de la altura de la antena de la estación base, figura 24.

$G_{hre}$  [dB] es el factor de ganancia de la altura de la antena del móvil, figura 25.

$G_{area}$  [dB] es la ganancia debido al tipo de entorno, figura 26.

Cabe mencionar que las ganancias de la altura de la antena son estrictamente una función de la altura y nada tiene que ver con los patrones de la antena.

Es conveniente recordar que el Modelo de Okumura está referido a un entorno considerado área urbana y a un tipo de terreno casi liso. Si una trayectoria de propagación en particular ocurre en diferentes tipos de entornos o terreno que no es casi-suave, se aplican los factores de corrección adicionales según la siguiente ecuación:

$$P_c = L_{50} + k_{sp} + k_{ls} + k_{ter} + k_{im}$$

donde:  $P_c$  es el valor de las pérdidas totales

$L_{50}$  [dB] es el valor de las pérdidas medias por propagación.

$k_{sp}$  [dB] es el factor de corrección para terreno inclinado, mostrado en la figura 27.

$k_{ter}$  [dB] es el factor de corrección para variaciones de la altura del terreno, mostrado en la figura 28.

$k_{LS}$  [dB] es el factor de corrección terreno-mar, mostrado en la figura 29.

$k_{IM}$  [dB] es el factor de corrección debido a obstáculos entre la base y el móvil, mostrado en la tabla 2.

---

## CAPÍTULO IV. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE OKUMURA

### IV.1. INTRODUCCIÓN

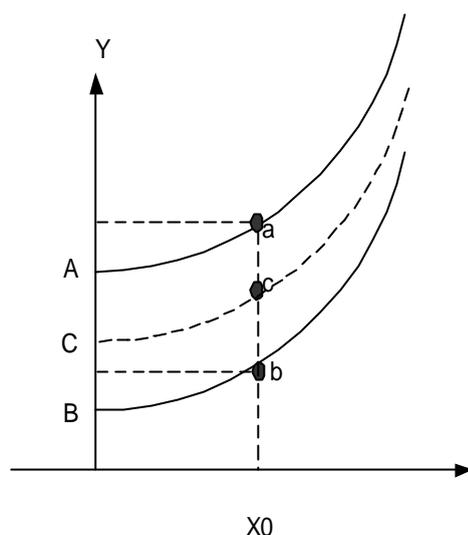
En este capítulo se va a describir el proceso que se siguió para programar el Modelo de Okumura en Matlab. Se eligió utilizar como herramienta a Matlab debido a que este software permite programar funciones matemáticas en forma relativamente sencilla y con gran precisión.

Para poder calcular las pérdidas básicas por transmisión de manera rápida y sencilla, se creó una base de datos de cada uno de los factores que influyen en el cálculo de las pérdidas. De esta forma, se ha implementado cuatro subprogramas que reciben los parámetros de entrada, tales como frecuencia de portadora, distancia entre base y móvil y alturas efectivas de las antenas. En el programa principal se consideran todos los cálculos realizados en los subprogramas y se calculan las pérdidas tomando en cuenta una potencia de 1 Watt por defecto.

Para mostrar gráficamente las pérdidas, en el subprograma llamado AMU se calcula la atenuación media relativa; en otro subprograma llamado GHTE se calcula la ganancia debido a la altura de la antena de la estación base; en GHRE se calcula la ganancia debida a la altura de la antena de la estación móvil y el factor de corrección de acuerdo al tipo de área o entorno se calcula en AREAS. Para realizar estos cálculos son indispensables las gráficas de Okumura.

Para definir cada una de las curvas de las diferentes graficas que elaboró Okumura, se han tomado mediciones empíricas para considerar una curva de referencia. A esta referencia se le aplican ecuaciones matemáticas lineales, cuadráticas y logarítmicas para transformarla de tal forma que se asemeje lo más posible a una de las curvas. Este proceso se sigue con cada curva de cada familia en los cuatro subprogramas. Una vez que cada subprograma ha elaborado sus familias de curvas correspondientes, se muestran la gráficas correspondientes.

Para el proceso anterior, es importante conocer el concepto de la interpolación, ya que ésta se realiza para valores intermedios a los medidos por Okumura. La interpolación que se aplica es logarítmica, dando como resultado un continuo de curvas en cada gráfica de medición, como se muestra en la figura 30.



**Figura 30. Interpolación logarítmica para el cálculo de coordenadas ubicadas entre las curvas de cada gráfica.**

Usando la siguiente ecuación para la interpolación logarítmica:

$$C = B + \frac{\log(a) - \log(b)}{\log(c) - \log(b)} (A - B)$$

La máxima aportación de esta función es que las gráficas de Okumura, para la atenuación media relativa, no han sido capturadas en forma de base de datos (punto a punto) sino que han sido transformadas por medio de ecuaciones lineales, cuadráticas y logarítmicas. Al combinarse las distintas ecuaciones, dan una representación matemática de fácil uso y captura. En otras palabras, es posible manejar una interpolación muy aproximada al valor real para valores que Okumura nunca midió, aunque en realidad parten de las mediciones más cercanas al punto de cálculo descritas en las curvas de Okumura.

## IV.2. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN

**A** continuación se describen brevemente los subprogramas que intervienen en el cálculo de los factores que intervienen en la fórmula de pérdidas básicas por propagación y el programa principal. Cada explicación incluye el diagrama de flujo correspondiente a cada bloque para una mayor comprensión.

---

### IV.2.1. AMU

Es el nombre del subprograma que calcula la atenuación media relativa ( $A_{m}$ ) para una frecuencia y distancia dadas dentro del intervalo de mediciones que realizaron Okumura y su equipo. Esta función proporciona la visualización gráfica del cálculo de la atenuación media relativa correspondiente a las mediciones originales. A diferencia de las mediciones discretas de Okumura, este programa presenta una función continua de la atenuación media relativa  $A_{m}$  para cualquier frecuencia y distancia dentro del rango. Esto es posible por medio de una interpolación entre los intervalos de medición.

La máxima aportación de esta función es que la gráfica de Okumura para la atenuación media relativa no ha sido capturada en forma de base de datos (es decir, punto a punto), sino que se ha obtenido al modificar una curva de referencia por medio de ecuaciones lineales, cuadráticas y logarítmicas.

Este subprograma inicia con el ingreso de los parámetros de entrada: la frecuencia de la señal transmitida y la distancia de separación entre la estación base y el móvil. Cuando el usuario ingresa el valor de la frecuencia, AMU define un vector de valores de frecuencia que consta de 100 elementos.

La familia de curvas elaborada por Okumura para este factor puede dividirse en tres secciones de acuerdo a la frecuencia. La finalidad de esta división es representar cada curva de medición a través de una ecuación. Por lo tanto, el intervalo total de frecuencia está dividido en tres subintervalos. Cada subintervalo de frecuencia se representa por medio de una ecuación lineal del tipo  $y = m(x - x_0) + y_0$ . Se definen ecuaciones para cada subintervalo de frecuencia para 1km de distancia y se unen los valores a través de un vector. Este vector agrupa los valores de los tres subintervalos de frecuencia para una distancia dada. La definición de ecuaciones lineales para cada subintervalo de frecuencia se repite para distancias de 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 y 100km de separación entre la estación base y la móvil.

Una vez creados los vectores de frecuencia para los distintos valores de distancia, se reúnen los vectores con el fin de constituir las curvas de Okumura. Con ello, se genera una matriz que representa una base de datos de los puntos de cada curva. Esta matriz tiene una resolución de 100 elementos por curva. Como se tienen 11 vectores de distancia (porque se consideran 11 diferentes valores) y 100 elementos por vector, la matriz que se construye es de 11x100.

Cuando un usuario introduce el dato de la frecuencia de la señal, el subprograma busca el valor más cercano al dato introducido. Se forma una frecuencia equivalente aproximada y se identifica el índice del vector en donde ésta se localiza. Posteriormente, se realiza una interpolación logarítmica en caso de que el dato de entrada sea un valor intermedio en las gráficas originales de Okumura. Cabe mencionar que para cada valor

intermedio prácticamente se describe una curva imaginaria que corresponde a un balance logarítmico entre las curvas que acotan al dato de entrada.

En el caso de que el dato de distancia proporcionado por el usuario no se encuentre dentro del rango permitido, se le asigna una salida cero. De esta forma, se puede detectar una entrada fuera de rango.

Cuando ya se han delimitado los puntos correspondientes a los datos introducidos de distancia y de frecuencia, se define una función semilogarítmica para ubicar el punto de atenuación asociado a los valores dados. Por último, se muestra una figura que contiene las curvas construidas y se señala el punto correspondiente de atenuación media relativa. También devuelve el valor numérico de la atenuación media relativa.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de este subprograma.

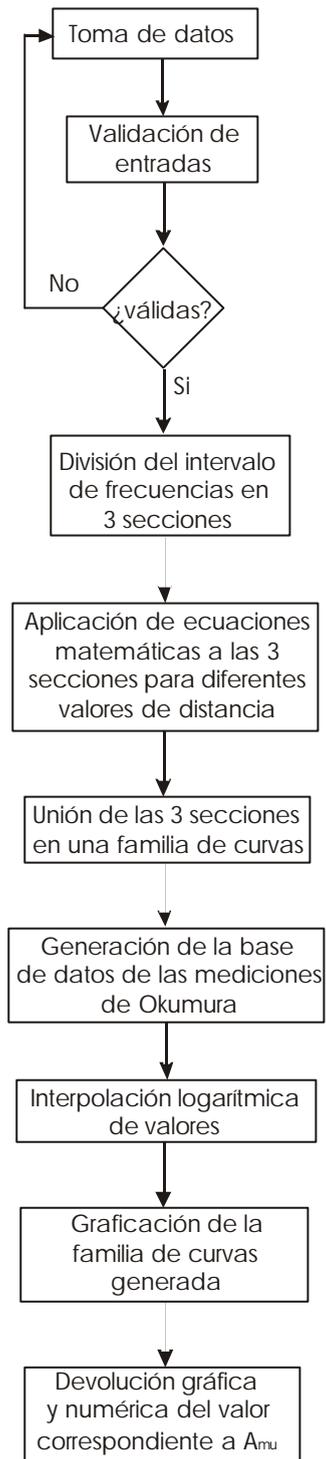


Figura 31. Diagrama de flujo del subprograma AMU

---

## IV.2.2. GHTE

Este subprograma representa el factor de ganancia debido a la altura de la antena de la estación base. Los datos de entrada son: la distancia de separación entre la estación base y el móvil, y la altura efectiva de la antena de la estación base. La información de salida que se obtiene con esta función está denotado por  $G$ , siendo  $G$  el factor de ganancia de altura de la antena de la estación base para los parámetros especificados en la entrada. La función grafica la familia de curvas correspondiente y la coordenada donde habrá que interpolar las mediciones de Okumura.

Al inicio del subprograma se genera un vector que albergará el rango de valores de la altura efectiva de la antena de la estación base. Este vector se genera de tal manera que pueda contener 100 elementos. Para crear las curvas de la ganancia, se dividen en dos secciones. La primera sección consta de 19 elementos y corresponde al rango de alturas de 20 a 400m. La segunda sección consta de 81 elementos y el rango de alturas al que está asociado va de 400 a 1000m. Una vez que se tienen definidas las dos secciones, se les aplica por separado una ecuación logarítmica con un valor escalar diferente a cada una. Esto tiene como objetivo cambiar la forma de la curva según la sección. Es importante mencionar que se tienen diferentes ecuaciones logarítmicas para cada valor de la distancia de separación entre la estación base y el móvil.

Se busca en el vector de alturas el valor más aproximado a la altura proporcionada por el usuario. Se asigna el valor mayor inmediato al introducido. Este paso se hace en dos bloques. En un bloque se busca para alturas menores a 200m y en el otro, para alturas mayores a 200m.

A continuación se lleva a cabo la interpolación para hallar el continuo de cualquier valor intermedio del factor de ganancia  $G_{HTE}$ . Una vez localizado el punto de acuerdo a las entradas especificadas, se realiza la gráfica de la familia de curvas y se señala la coordenada del punto localizado. También se devuelve el valor numérico.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de este subprograma.

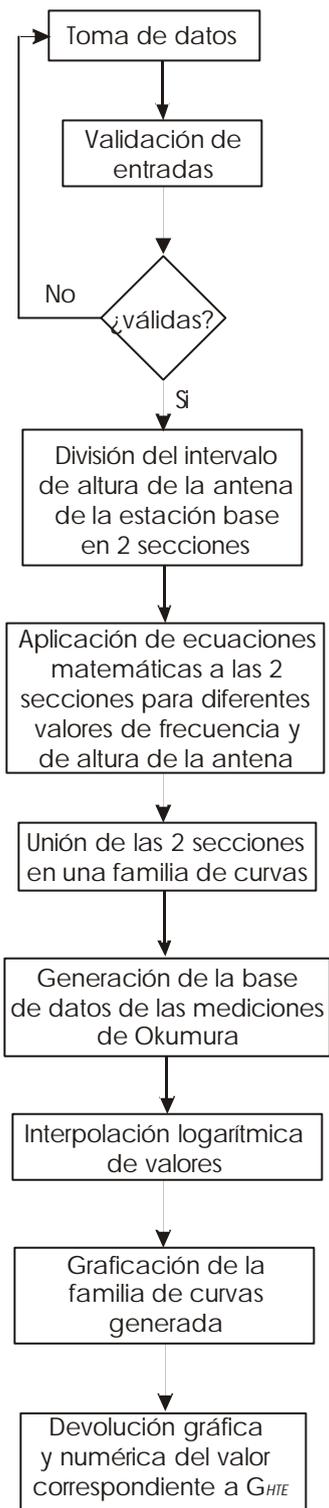


Figura 32. Diagrama de flujo del subprograma GHTE

---

### IV.2.3. GHRE

Este subprograma representa el factor de ganancia debido a la altura de la antena de la estación móvil. Los datos de entrada son: la frecuencia, la altura efectiva de la estación móvil y el grado de urbanización. El grado de urbanización para este programa se asignó de la siguiente manera:

- "0" para ciudades con un grado de urbanización medio y
- "1" para ciudades con un grado de urbanización alto.

La información de salida que se obtiene con esta función está denotado por  $g$ , siendo  $g$  el factor de ganancia debido a la altura de la antena de la estación móvil para los parámetros especificados en la entrada. La función grafica la familia de curvas y la coordenada donde habrá que interpolar las mediciones de Okumura.

Cuando el usuario ingresa los parámetros necesarios, se define el vector de valores para la altura de la antena de la estación móvil. Este vector consta de 100 elementos. Similarmente a la división de frecuencia que se hizo en el subprograma AMU, en este subprograma se dividirá el rango total de alturas. Se definen cuatro secciones de alturas para que la construcción de las curvas sea más fiel. El objetivo de tener cuatro secciones es que se pueden modificar individualmente por medio de ecuaciones y unir las para que se vea como una sola ecuación. Una vez unidos los valores, es posible graficar las curvas.

El siguiente paso es desplegar un menú que facilite la selección del grado de urbanización de la ciudad. Es necesario para construir el vector total de frecuencias. Se consideran cuatro zonas en la gráfica correspondiente a los valores de frecuencia, pero los valores de la altura de la antena del móvil se divide en 4 secciones. La primera zona corresponde a ciudades con grado alto y mediano de urbanización, en el intervalo de 1 a 3m. La aproximación es lineal. De la segunda a la cuarta zona se divide según el grado de urbanización de la ciudad, pero la definición de las zonas es la misma, tanto para ciudades con grado medio como para ciudades de grado alto.

La segunda zona corresponde al intervalo de 3 a 5m. La aproximación se hace por medio de ecuaciones lineales. La tercera zona corresponde al intervalo de 5 a 6m. La aproximación también se hace por medio de ecuaciones lineales. La cuarta zona corresponde al intervalo de 6 a 10m. La aproximación se hace por medio de ecuaciones logarítmicas.

Posteriormente se calcula la ganancia debida a la antena del móvil. El cálculo se divide en alturas menores a 3m, en alturas entre los 3 y los 10 m, y en alturas mayores a los 10m. El último caso no es válido pues se está fuera del rango definido por Okumura, así que se le asigna a la salida por defecto un valor de cero. Esto indicará que el valor introducido de la altura no es válido. Esta condición también se establece para los valores de frecuencia. Para aquellos valores que estén fuera del rango, se les asigna una salida igual a cero.

Finalmente se grafica la familia de curvas y se indica el punto correspondiente a la ganancia debida a la altura de la antena del móvil. También devuelve el valor numérico. La siguiente figura es el diagrama de flujo de este subprograma:

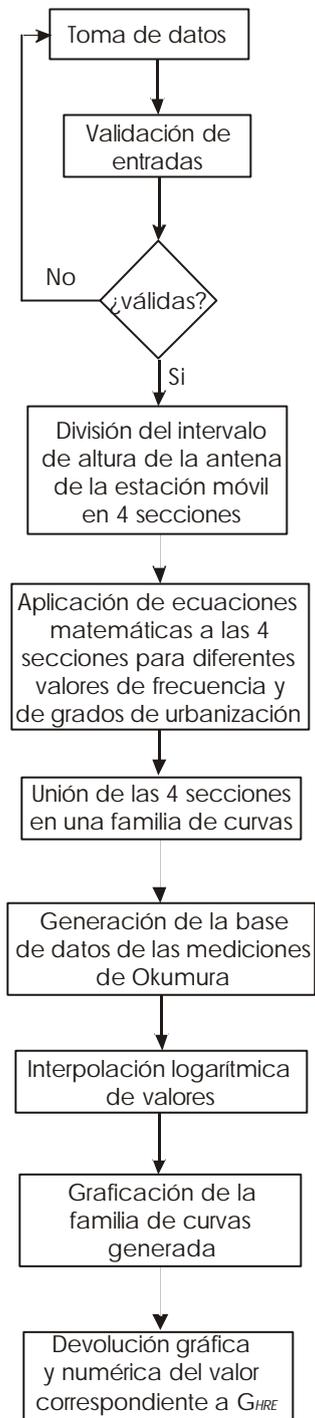


Figura 33. Diagrama de flujo del subprograma GHRE

#### IV.2.4. ÁREAS

Este subprograma muestra un factor de corrección para el tipo de entorno en donde se pretende realizar la simulación. Sabemos que todas las mediciones básicas de Okumura están referidas al entorno urbano y para realizar cálculos en áreas abiertas, cuasiabiertas y suburbanas es necesario establecer un factor de corrección en dB. Esta gráfica fue dada por el equipo de Okumura. El subprograma ÁREAS calcula dicha corrección al especificar en sus entradas la frecuencia de la señal transmitida y el tipo de entorno. El tipo de entorno se asignó de la siguiente manera:

- 1 es para áreas abiertas
- 2 para cuasiabiertas
- 3 para entorno suburbano

Los datos que recibe este subprograma son: la frecuencia de la señal transmitida y el tipo de área. La salida que se obtiene es el valor del factor de corrección en dB correspondiente al tipo de área y frecuencia.

Para comenzar, se define el intervalo de frecuencias tal como se hizo en el subprograma AMU. El vector generado en este paso consta de 100 elementos. Cuando el usuario ingresa el valor de la frecuencia, éste se localiza en el vector de frecuencias. Se toma el valor mayor más próximo al proporcionado por el usuario. Como en AMU, el intervalo de frecuencias también se divide en tres secciones para representar cada curva lo más fiel posible. Así, a cada sección se le podrá aplicar la ecuación que mejor le convenga. La primera sección consta de 7 elementos y va de 100 a 300MHz. La segunda sección contiene 24 elementos y abarca de los 300 a los 1000MHz. Por último, la tercera sección consta de 69 elementos y el rango de frecuencias que le corresponde es de 1000 a 3000MHz.

La aplicación de las ecuaciones a cada sección se hace por separado según el tipo de área. Para ello, se determina el tipo de área con la ayuda de un menú que se le despliega al usuario. Ya que se conoce la frecuencia y el tipo de área, se busca el valor asociado a esos dos parámetros y se devuelve. Finalmente, se grafican las curvas asociadas a este factor de corrección y se señala la coordenada correspondiente.

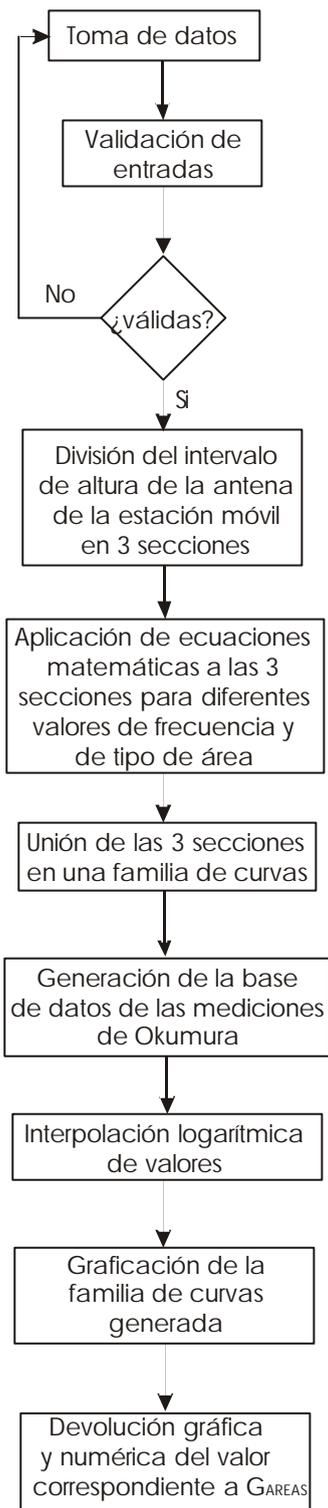


Figura 34. Diagrama de flujo del subprograma ÁREAS

---

#### IV.2.4. PÉRDIDAS

Es el nombre del programa principal. Primordialmente se enfoca en la toma de datos, en llamar a los subprogramas y en el cálculo final de las pérdidas básicas por transmisión.

Este programa inicia con la solicitud al usuario de que proporcione los datos necesarios para ejecutar los programas. La toma de datos incluye el valor de la frecuencia de operación, el valor de la altura de la antena del móvil, el valor de la altura de la antena de la base y el valor de la distancia de separación entre ambas estaciones. Estos cuatro parámetros son fundamentales para ejecutar los subprogramas relacionados a los factores principales.

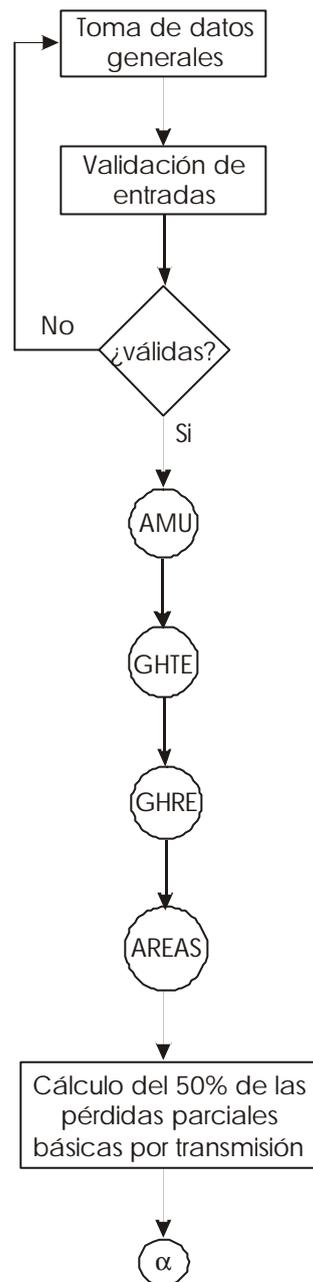
A continuación se presenta al usuario un menú que le ayuda a seleccionar el tipo de ciudad. Este menú indica que se considera únicamente una ciudad medianamente urbanizada o una ciudad altamente urbanizada. El siguiente menú que se despliega ayuda al usuario a determinar el tipo de área. Se le dan tres opciones para elegir: área abierta, cuasiabierta o suburbana.

El siguiente paso es validar cada una de las entradas. Se valida si el valor proporcionado de la frecuencia es permitido o no. Una vez que se han validado todas las entradas, se llama a los cuatro subprogramas para que entreguen los valores de los factores principales. Con estos resultados, se pueden calcular las pérdidas básicas por propagación parcialmente de acuerdo con la fórmula presentada al final del capítulo III de esta tesis.

Como la intención de implementar el Modelo de Okumura es obtener un resultado lo más aproximado posible, se consideraron los factores adicionales. Para ello se introdujeron las tablas de cada factor de corrección adicional y se solicitan al usuario datos concernientes a dichos factores. Se hace una validación de los datos introducidos y con base en ello, se buscan los valores más cercanos en la tabla de cada factor. Por lo general, los datos introducidos no tienen un valor en las tablas de los factores adicionales y para obtener un valor que les corresponda exactamente, se realiza una interpolación logarítmica.

Finalmente, con los valores obtenidos de los factores adicionales, se calculan las pérdidas básicas por propagación de acuerdo a la fórmula presentada en la página 43 de esta tesis.

El diagrama de flujo del programa principal es el que a continuación se presenta:



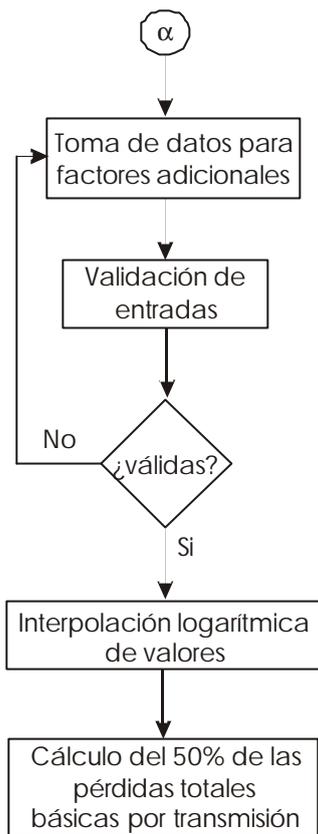


Figura 35. Diagrama de flujo del programa PÉRDIDAS

En el siguiente capítulo se proporcionan los intervalos de cada parámetro de simulación y se muestran dos ejemplos de la simulación del Modelo de Okumura con el fin de que se comprendan los alcances de esta implementación.

---

## CAPÍTULO V. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

### V.1. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Los parámetros de simulación son aquellos que permiten particularizar un caso de transmisión. Los parámetros de simulación y sus rangos permitidos son:

- a. Frecuencia de trabajo: de 100 a 3000MHz
- b. Distancia de separación entre las estaciones: de 1 a 99km
- c. Altura efectiva de la antena en la estación base: de 20 a 1000m

De acuerdo al valor de la altura efectiva de la estación base, se tienen dos intervalos de distancia de separación entre las estaciones:

- Para alturas de la antena de la estación base de 20 a 380m, el rango de distancia de separación permitido es de 1 a 99km
- Para alturas de la antena de la estación base de 380 a 1000m, el rango de distancia de separación permitido es de 1 a  $\infty$ km

- d. Grados de urbanización: medio y alto

De acuerdo al grado de urbanización, se tienen diferentes rangos de frecuencia y de altura de la antena de la estación móvil.

Si se tiene una ciudad con un grado de urbanización medio:

- Con frecuencias hasta 400MHz, rango de la altura efectiva de la antena de la estación móvil: 1 a 3m
- Con frecuencias hasta 2000MHz, rango de la altura efectiva de la antena de la estación móvil: 3 a 10m

Si se tiene una ciudad con un grado de urbanización alto:

- Con frecuencias hasta 100MHz, rango de la altura efectiva de la antena de la estación móvil: 1 a 3m
- Con frecuencias hasta 1000MHz, rango de la altura efectiva de la antena de la estación móvil: 3 a 10m

- e. Tipos de área:

- Abiertas (asignadas a la opción 1 en el menú que despliega el programa)
- Cuasiabiertas (asignadas a la opción 2 en el menú que despliega el programa)
- Suburbanas (asignadas a la opción 3 en el menú que despliega el programa)

Cabe señalar que los factores de corrección principales también tienen rangos. Estos rangos se proporcionan a continuación para que el usuario los conozca:

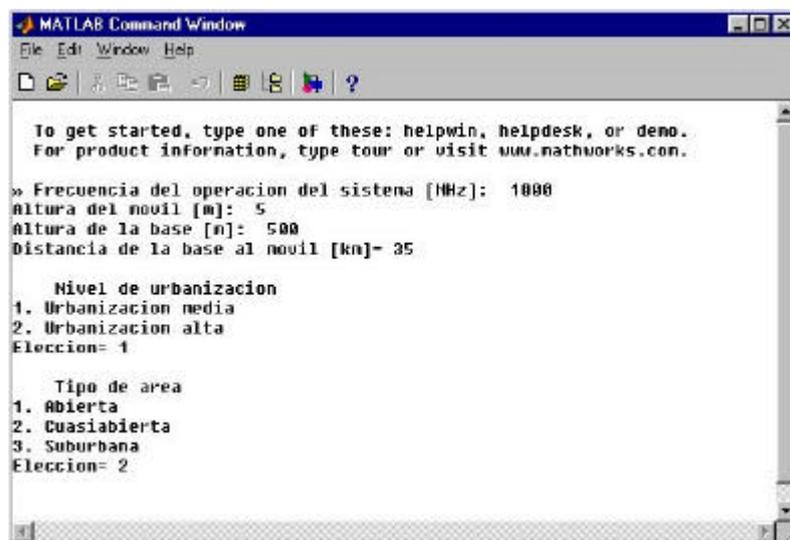
- a. Atenuación media relativa: de 10 a 70dB
- b. Factor de ganancia  $G_{hte}$ : de -5 a 20dB
- c. Factor de ganancia  $G_{hre}$ : de -30 a 30dB
- d. Factor de ganancia  $G_{areas}$ : de 0 a 35dB

## V.2. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En esta sección se muestra un ejemplo de la ejecución del programa con el fin de proporcionar una idea de sus alcances. En la simulación se ejemplificó un sistema con los siguientes valores:

Frecuencia de operación = 1000 MHz  
 Altura efectiva de la estación móvil = 5 m  
 Altura efectiva de la estación base = 500 m  
 Nivel de urbanización = media  
 Tipo de área = cuasiabierta

En la ventana principal de Matlab, los datos se seleccionan de la siguiente forma:



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
To get started, type one of these: helpwin, helpdesk, or demo.
For product information, type tour or visit www.mathworks.com.
» Frecuencia del operacion del sistema [MHz]: 1000
Altura del movil [m]: 5
Altura de la base [m]: 500
Distancia de la base al movil [km]- 35

    Nivel de urbanizacion
1. Urbanizacion media
2. Urbanizacion alta
Eleccion= 1

    Tipo de area
1. Abierta
2. Cuasiabierta
3. Suburbana
Eleccion= 2
  
```

Figura 36. Ventana simulación del programa con los valores de la simulación

Al ejecutarse el programa, se despliegan cuatro figuras con las gráficas de los factores de corrección principales, mostrando el punto correspondiente a los datos introducidos en el ejemplo:

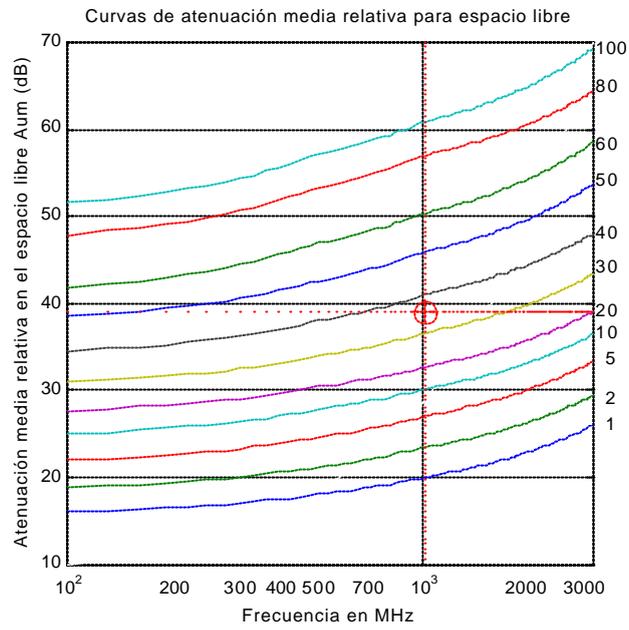


Figura 37. Gráfica del factor  $A_{\mu}$  elaborada en la simulación

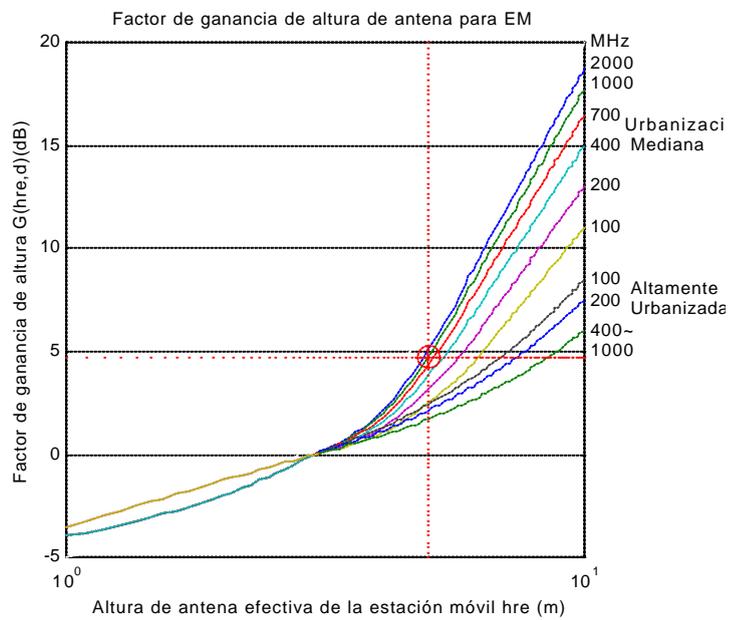


Figura 38. Gráfica del factor  $G_{hre}$  elaborada en la simulación

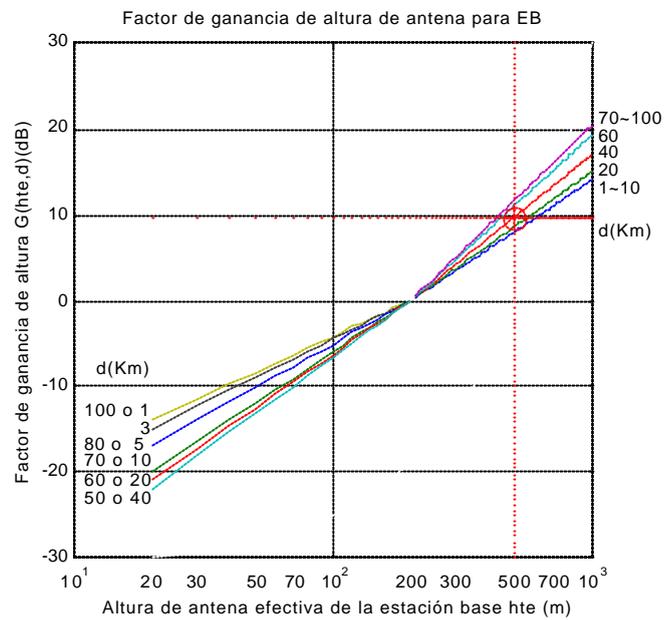


Figura 39. Gráfica del factor  $G_{hte}$  elaborada en la simulación

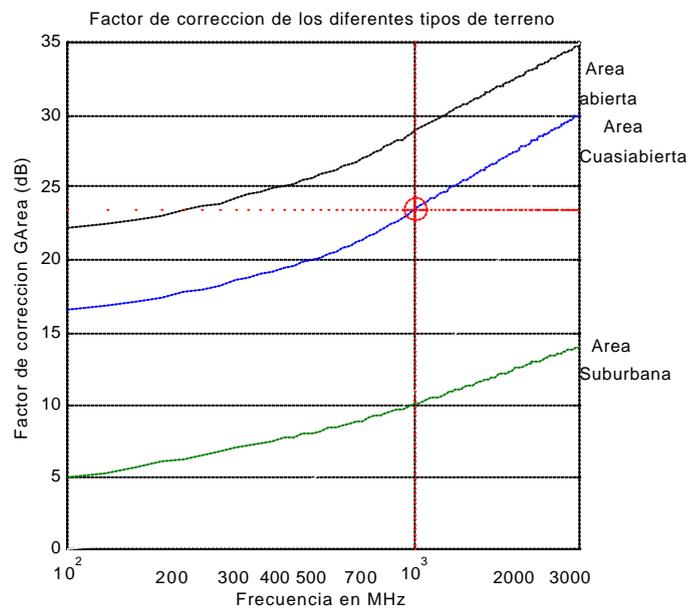


Figura 40. Gráfica del factor  $G_{areas}$  elaborada en la simulación

Después de obtener las gráficas de los factores de corrección, se introdujeron condiciones adicionales para hacer uso de los factores restantes:

Distancia del móvil al obstáculo = 5Km

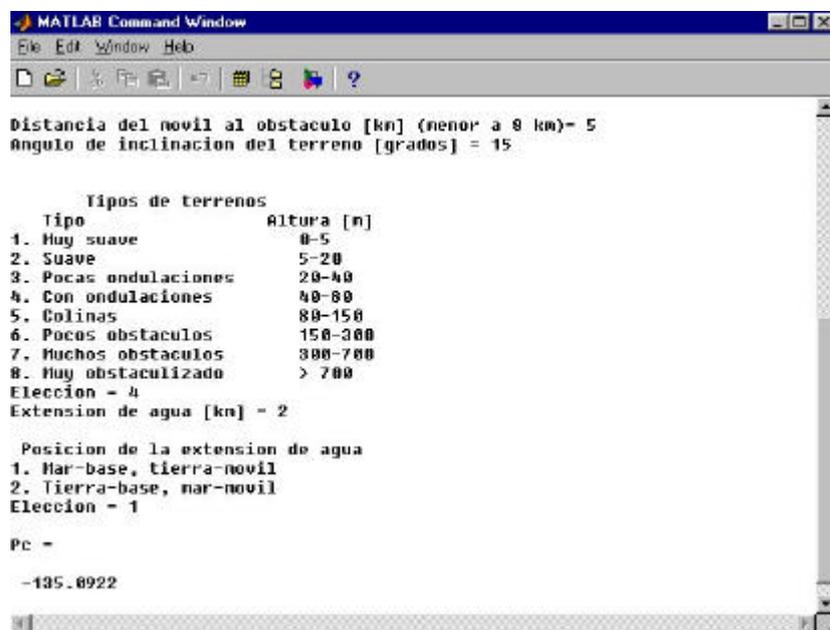
Ángulo de inclinación del terreno = 15 grados

Tipo de terreno = Con ondulaciones

Extensión del agua = 2 Km

Posición de la extensión del agua = Mar : base, Tierra : móvil.

En el programa se muestra una ventana en la que se solicitan estos datos:



```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help

Distancia del movil al obstaculo [kn] (menor a 0 km) = 5
Angulo de inclinacion del terreno [grados] = 15

Tipos de terrenos
Tipo          Altura [m]
1. Muy suave  0-5
2. Suave      5-20
3. Pocas ondulaciones 20-40
4. Con ondulaciones 40-80
5. Colinas    80-150
6. Pocos obstaculos 150-300
7. Muchos obstaculos 300-700
8. Muy obstaculizado > 700
Eleccion = 4
Extension de agua [kn] = 2

Posicion de la extension de agua
1. Mar-base, tierra-movil
2. Tierra-base, mar-movil
Eleccion = 1

Pc =

-135.0922

```

Figura 41. Ventana principal del programa con los parámetros adicionales

Finalmente observamos el resultado de las pérdidas totales por propagación utilizando el modelo Okumura con parámetros adicionales para diferentes tipos de terreno. El valor en el ejemplo de la simulación fue:

$P_c = -135.0922$  dB.

---

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo del siglo XX, las comunicaciones inalámbricas fueron las que más campos de desarrollo tuvieron, desde los primeros sistemas de comunicación marinos hasta los enlaces satelitales y las tecnologías celulares más recientes. El avance de las comunicaciones inalámbricas ha sido posible gracias a diversas aportaciones, de las cuales unas analizan sus características y otras se aplican a soluciones reales. Algunas de estas aportaciones solucionan uno de los problemas básicos de las comunicaciones inalámbricas, el cálculo de las pérdidas por propagación que sufre una señal de radiofrecuencia en un medio determinado.

Para la solución de este problema, existen los métodos empíricos y los analíticos. La principal ventaja de los métodos empíricos es que no se define matemáticamente un modelo, sino que son producto de una cantidad considerable de mediciones y pueden generalizarse más fácilmente agregando algunos arreglos estadísticos. En cambio, para emplear un método analítico en diversos ambientes, sería necesario caracterizar matemáticamente cada uno de los ambientes en los que se aplicaría.

El objetivo central de esta tesis se enfocó en explicar y simular el método de Okumura a partir de su programación en Matlab. Se eligió el método de Okumura; entre otros, debido a que es el método empírico más completo, además de que su entendimiento requiere de la asimilación de los conceptos teóricos en forma cualitativa; de hecho, la única fórmula matemática que emplea este método es la de pérdidas en el espacio libre. Inclusive, se han realizado estudios que han demostrado que este método se puede aplicar a áreas urbanas y suburbanas principalmente, aunque también en otros tipos de ambientes con un grado de certeza aceptable.

Sin embargo, este método tiene dos desventajas significativas: no ofrece un resultado exacto de las pérdidas por propagación, sino una aproximación de las pérdidas medias y tiene una “respuesta” lenta para cambios rápidos en el terreno, por lo que el método es recomendable para áreas urbanas y suburbanas.

Respecto a los resultados obtenidos en el trabajo realizado en esta tesis, se pueden resaltar dos puntos. El primero es que se pudo entender el método de Okumura gracias a una explicación de los conceptos básicos de propagación de señales, importantes para entender los factores de corrección que intervienen en el método. El segundo punto es referente a la programación de los factores. Los factores principales se calcularon con base en la generación en matlab de las gráficas originales del método de Okumura y los factores adicionales fueron calculados por medio de sus tablas de valores. El conjunto de resultados derivó en el programa principal que

arroja como resultado la aproximación de las pérdidas totales por propagación considerando las posibilidades en las que una señal de radiofrecuencia se propaga en el medio.

Con respecto a la evaluación de resultados, se puede concluir que el programa realizado como parte de la tesis se apega lo mejor posible a las gráficas originales del modelo, es decir, las gráficas realizadas por el equipo de Okumura. Si existe una diferencia o no entre los resultados y las condiciones reales, no se puede determinar con base en las investigaciones aquí realizadas, pero existen varios documentos en los que se afirma que con sólo aplicar los factores de corrección adicionales, se tiene una aproximación muy cercana a las pérdidas reales. Observando las gráficas originales (las realizadas por Okumura) y las gráficas que elabora la simulación de Matlab, se puede concluir que los resultados son muy parecidos, aunque sin duda existen errores que afecten el resultado numérico. Por ejemplo, en la gráfica elaborada por ÁREAS se aprecia un error de 1dB en la curva para área suburbana. En las demás gráficas se tiene una aproximación aceptable.

Es fácil pensar que las condiciones bajo las que el equipo de Okumura realizó las gráficas de los factores son similares a los de esta ciudad. Como se explicó en el capítulo III, la clasificación del terreno se hizo de acuerdo al tipo de obstáculos y con ello, se tiene que el área suburbana y urbana de Japón son similares a las de la Ciudad de México, pues no existen muchas áreas abiertas y si las hay, son muy pequeñas.

Los trabajos futuros que podrían surgir a partir de este trabajo de tesis son realizar los experimentos similares a los que llevó a cabo Okumura en Japón, pero en la Ciudad de México. Estos experimentos confirmarían o negarían concretamente los resultados arrojados en esta tesis. Sería una forma de corroborar que las gráficas realizadas por Okumura hace aproximadamente 40 años son aplicables a cualquier medio o no y las razones por las que se llega a esa conclusión.

Sería deseable que la aportación que se hace en esta tesis respecto al método de Okumura pudiera servir como referencia o información adicional para los estudiantes interesados en las comunicaciones inalámbricas y, específicamente, en la propagación de señales en el medio.

---

## ANEXO A. GUÍA DE USUARIO

El programa diseñado con el nombre “perdidas.m”, debe ejecutarse en la versión de Matlab 5.1 o superiores.

- ◆ La primera línea que aparecerá al correr el programa es la entrada de la frecuencia de operación del sistema la cual debe estar en el rango de 100 a 2000 MHz.
- ◆ La siguiente entrada es de la altura efectiva a la que se encuentra el móvil, que deberá ser desde 3m hasta 10 m.
- ◆ La entrada para la altura efectiva de la estación base debe tener un valor en el rango desde 20m hasta 1000 m.
- ◆ El siguiente dato que se proporciona es la distancia de la estación base a la unidad móvil, comprendida en el rango desde 1km hasta 99 km.
- ◆ En el siguiente paso se pregunta cuál es el nivel de urbanización. Existen dos opciones: urbanización media o urbanización alta.
- ◆ Una vez seleccionado el nivel de urbanización, se elige el tipo de área según el tipo de entorno. Las opciones son: área abierta, área cuasiabierta o suburbana.
- ◆ Si los anteriores datos fueron introducidos en los rangos permitidos correspondientes a cada parámetro, el programa de Matlab desplegará nuevas ventanas que solicitan información de los factores de corrección que intervienen en el cálculo del 50% de las pérdidas en el modelo Okumura.
- ◆ Los factores de corrección (expresados en dB) son los siguientes:
  - Atenuación media relativa para el espacio libre,  $A_{mu}$ . El programa de matlab lo despliega en la Figura 1.
  - Factor de ganancia debido a la altura efectiva de la antena en la estación móvil,  $G(h_{ref})$ . El programa de matlab lo despliega en la Figura 2.
  - Factor de ganancia debido a la altura efectiva de la antena en la estación base,  $G(h_e, d)$ . El programa de matlab lo despliega en la Figura 3.
  - Factor de corrección del ambiente,  $G_{area}$ . El programa de matlab lo despliega en la Figura 4.
- ◆ En caso de que alguno de los datos no haya sido proporcionado adecuadamente (es decir, que su valor no esté en el rango permitido), se presentará en la ventana de comandos la línea de entrada para ingresarlo nuevamente, ahora con el rango de valores esperado.
- ◆ Ya ingresados los valores particularizados para un ambiente urbano y cuasi-liso, el programa solicita los datos requeridos para obtener los factores adicionales, los cuales se utilizan para calcular las pérdidas en otros casos.
- ◆ Se pide ingresar la distancia del móvil al obstáculo, que debe ser menor a 8 Km.

- ◆ El siguiente dato a introducir es el ángulo de inclinación del terreno en cuestión.
- ◆ A continuación se elige el tipo de terreno. Tanto la clasificación del terreno como sus rangos de altura se encuentran detallados al ejecutar el programa (en la ventana aparece una tabla que ayuda a determinar el tipo de terreno).
- ◆ Se ingresa la extensión del agua. La única condición para este valor es que no sea mayor a la distancia entre la base y el móvil.
- ◆ El último valor a introducir es la posición de la extensión del agua. Las opciones están definidas al ejecutar el programa (por ejemplo, la extensión de agua está cercana al transmisor o al receptor).
- ◆ Por último, el programa realiza los cálculos necesarios para mostrar finalmente el valor de “Pc”, definido como el 50% de las pérdidas totales por propagación en donde se aplican factores adicionales para otros casos.

Debido a que el trabajo elaborado en esta tesis pretende servir como herramienta de trabajo enfocada a la docencia en el área de las telecomunicaciones, se proporciona el código fuente de la implementación del método de Okumura con el fin de que pueda ser aprovechado por cualquier persona interesada en ello.

---

## REFERENCIAS

1. Jakes William, Microwave Mobile Communications, IEEE Press-IEEE Communications Society, first edition, U.S.A. 1994, pp. 79-131.
2. Garg Vijay Kumar, Wireless and Personal Communications Systems, Prentice-Hall, U.S.A. 1996, pp. 66-69.
3. Gibson Jerry D., The Mobile Communications Handbook, CRC Press – IEEE Press, first edition, U.S.A. 1996, pp. 363-364.
4. Rappaport Theodore S., Wireless Communications: Principles and Practice, Prentice Hall PTR, first edition, U.S.A. 1996, pp. 116-119.
5. Nathan Blaunstein, Radio Propagation in Cellular Networks, Artech House Publishers, first edition, U.S.A. 1999, pp.386.
6. José M. Hernando and F.Pérez-Fontan, Introduction to Mobile Communicactions Engineering, Artech House Publishers, first edition, U.S.A. 1999, pp. 535.
7. Hess Garry C., Land-Mobile Radio System Engineering, Artech House – Mobile communications Series, first edition, U.S.A. 1993, pp. 38-46.
8. “Propagation Model Overview”, internet: [http://www.mapinfo.com/community/library/dbplan\\_prop.pdf](http://www.mapinfo.com/community/library/dbplan_prop.pdf)
9. “Propagation Analysis”, internet: <http://www.ornl.gov/radio/propana.htm>
10. “Terrain Analysis Package (TAP) Propagation Comparison”, internet: <http://www.softwright.com/faq/engineering/Propagation%20Models.html>
11. “Okumura’s Model” by Jerry Place, internet: [http://www.cstp.umkc.edu/~place/courses/cs513/Path\\_Loss\\_slides/node3.html](http://www.cstp.umkc.edu/~place/courses/cs513/Path_Loss_slides/node3.html)
12. Lee, William C.Y. Mobile Communications Design Enviroment. Ed. Wiley Series in Telecommunications. 2da edición. E.U., 1993, pp. 68-71.

13. Freeman, Roger L. Radio Systems Design for Telecommunications (1-100GHz). Ed. John Wiley & Sons. Primera edición. E.U., 1987, pp 1-24.
  
14. Lara Rodríguez, Domingo; Muñoz, David y Rosas García, Salvador. Sistemas de Comunicación Móvil. Una introducción. Ed. Alfaomega. Primera edición. México, 1992, pp 1-7.
  
15. Okumura, Yoshihisia; Ohmori, Eiji; Kawano, Tomihiko y Fukuda, Kaneharu. Field Strenght and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service. Review of the Electrical Communication Laboratory. Volumen 16, números 9 y 10. Septiembre y octubre de 1968.