

ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y
ELECTRONICA**

**CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA
Y TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCION
DEL TITULO DE INGENIERIA**

**“DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EL ANALISIS DE
MODELOS DE PROPAGACIÓN EN LAS BANDAS 850 Y 1900 MHz”**

IVAN J. BUSTAMANTE H.

**SANGOLQUI – ECUADOR
2007**

CERTIFICACION DE TITULO

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado **“DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EL ANALISIS DE MODELOS DE PROPAGACIÓN EN LAS BANDAS 850 Y 1900 MHz”** fue realizado en su totalidad por el señor Iván Joel Bustamante Hidalgo bajo nuestra dirección.

MSC. Ing. Gonzalo Olmedo
DIRECTOR

Ing. Román Lara
CODIRECTOR

RESUMEN

El siguiente artículo presenta el desarrollo del software para el análisis de los modelos de propagación en las bandas de 850 y 900 MHz que son las frecuencias utilizadas por las compañías celulares en nuestro país, los modelos desarrollados son: Okumura-Hata, Walfish-Ikegami, Modelo de Tierra Plana y por último el modelo de la recomendación ITU-R P.1546, cada uno de estos posee una aplicación diferente y a la vez útil para la planificación de enlaces. Los modelos anteriormente mencionados han sido comparados con sistemas existentes en el mercado para poder comprobar cuan precisos son los resultados que arrojan estos. La herramienta ha sido desarrollada en su totalidad con MATLAB versión R2007a utilizando su entorno proporcionado por el comando *GUIDE*. El propósito de este desarrollo es poder re ensamblar su código para que la herramienta trabaje con parámetros reales como coordenadas geográficas de alguna localidad determinada pudiendo obtener alturas y distancias de la zona determinada en la que se encontrara el enlace de comunicación. Haciendo de esta, una herramienta sumamente útil para la planificación de enlaces y para el control de los niveles de calidad de las señales celulares.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto y todo el esfuerzo que en este se encuentra a mi madre, a mis hermanos Emel, Evonne y Marcos, a mi padre y a toda mi familia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre, quien con su abnegada atención y cuidados ha logrado junto a mí culminar un peldaño más de nuestras vidas.

A mi padre, de quien copie su ejemplo de perseverancia y por todo el apoyo que me entregó

A mis hermanos, Emel, Evonne y Marcos, por todo el apoyo, amor y paciencia que me han brindado; a mi abuelita Laurita a mis tíos, Joel, Holger, Oswaldo, Olivia, Ramiro, Graciela, e Hipatia, quienes siempre han estado pendientes de manera sin igual a cualquier situación.

A mis amigos y primo Renato, por todos estos años compartidos de aventuras, de penas, de alegrías y de mucho esfuerzo que nunca serán olvidados.

A María Fernanda Valle por su ayuda y por todos los ánimos que me brindó los cuales me ayudaron a culminar este proyecto.

A mi Director y Codirector del presente proyecto por darme todo su apoyo y por su gran ayuda y comprensión durante todo este tiempo.

Y agradezco a Dios quien siempre es mi guía.

PROLOGO

En el medio de transmisión para las comunicaciones móviles, el coeficiente de calidad de la comunicación depende de factores del medio ambiente, estos pueden ser edificios, montañas, el clima, túneles, etc., y con el propósito de evitar un poco estos factores dañinos los sistemas de comunicaciones móviles usan frecuencias muy altas y además porque existe congestión en el espectro de bajas frecuencias. Sin embargo el tráfico en altas frecuencias conduce también a tener problemas complicados. Determinados los factores que afectan a las comunicaciones inalámbricas, se concluye en que todo diseño de enlaces necesita de un cálculo o planificación previa en donde se contempla parámetros como distancias entre las antenas transmisoras (Tx) y receptoras (Rx), la potencia de cada una de estas, coeficientes del entorno, entre los cuales se encuentran, permisividad, irregularidad del terreno, si se trata de un área urbana, sub-urbana, rural, etc. El presente proyecto detallado en este documento cumple con estos requisitos y brinda la opción de probar estos datos con algunos modelos de propagación.

Se han desarrollado algunos modelos de propagación en todo el mundo, y cada uno de estos obedece específicamente a la localidad en la que fue desarrollado. Por ejemplo, el modelo de Okumura-Hata fue desarrollado en Japón y todas sus variables son parámetros que afectaban en ese entonces el enlace en el mencionado país. No por este hecho se va a dar de inservible este modelo para la aplicación en otras localidades, pero es obvio que no se obtendrán los datos que reflejen la realidad del entorno.

La mayoría de los modelos desarrollados desde entonces se basan en la fórmula de Hata o son una variable del modelo Okumura-Hata, como lo son los modelos de Walfish-Ikegami, COST 231 y la nueva recomendación de la ITU-R P.1546. Para el caso del modelo de Tierra Plana (*plane Earth*) se considera uno de los principios más básicos de las pérdidas en propagación que es el efecto de la difracción por obstáculos y la pérdida por trayectoria, siendo este modelo totalmente diferente a los anteriores pero con muy poca precisión debido a que no considera todos los parámetros necesarios que reflejen un entorno de enlace.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	15
INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Conceptos básicos	16
1.1.1 Fundamentos de Antena.....	16
1.1.2 Reseña Histórica.....	16
1.1.3 Conceptos Básicos.....	18
. Curvas de Nivel.....	20
1.1.4 Patrón de Pérdidas en Propagación	25
1.1.5 Pérdidas en espacio libre.....	26
1.1.6 Pérdidas en el plano terrestre	28
. Modelo de tierra plana:	32
. Modelo de tierra esférica:	32
CAPÍTULO II.....	35
PERDIDAS DE PROPAGACIÓN.....	35
2.1 Pérdida por difracción por una sola obstrucción.....	41
2.2 Pérdida por difracción por varias obstrucciones	44
2.2.1 Modelos para pérdida por difracción en varios obstáculos.....	44
. Modelo Bullington	44
. Modelo Peterson.....	45
. Modelo Deygout.....	45
CAPÍTULO III.....	47
MODELOS DE PREDICCIÓN.....	47
3.1 Método Egli	49
3.2 Método Blomquist-Ladell.....	50
3.3 Método Longley – Rice	50
3.4 Método Okumura	51
3.5 Fórmula de Hata.....	53
3.6 Método de Parson.....	54
3.7 Método Hata-Cost 231	54
3.8 Método Cost 231 Walfish Ikegami	55
3.9 Método ITU-R P.1546 Modelo de Predicción Punto-Área para servicios terrestres.....	57

3.9.1	Variable Local	58
3.9.2	Variable Temporal	58
3.9.3	Altura Efectiva de Antena Transmisora Tx.....	60
	.Enlaces Inferiores a 15 Km sobre tierra	61
	.Enlaces superiores a 15 Km sobre tierra.....	62
	.Enlaces sobre agua	62
3.9.4	Angulo de vista de terreno	62
3.9.5	Altura de antena receptora	65
3.9.6	Corrección para áreas urbanas y sub urbanas en enlaces cortos	69
3.9.7	Correcciones para enlaces en terrenos mixtos.....	69
3.9.8	Proceso Resumido de la Recomendación ITU-R P. 1546.	72
CAPÍTULO IV		74
CONSIDERACIONES EN OTROS EFECTOS.....		74
4.1	Condiciones atmosféricas	74
4.2	Follaje	75
4.3	Orientación de Calles	76
4.4	Túnel.....	76
CAPÍTULO V		78
DESARROLLO DEL SOFTWARE EN MATLAB		78
5.1	Consideraciones para el diseño del software	78
5.2	Desarrollo del algoritmo de diseño del terreno	78
5.2.1	Diseño del terreno para modelo de Tierra Plana	79
5.2.2	Diseño del terreno para modelo Walfish-Ikegami	80
5.3	Selección del modelo apropiado para el cálculo de propagación	81
5.3.1	Código Fuente de Menú Principal.....	82
5.4	Cálculo de los parámetros de propagación	83
5.4.1	Código Fuente Tierra Plana para cálculos de propagación.....	83
5.4.2	Código Fuente Okumura_Hata para cálculos de propagación.....	90
5.4.3	Código Fuente Walfish-Ikegami para cálculos de propagación.....	99
5.4.4	Código Fuente ITU-R P.1546 para cálculos de propagación.....	107
5.5	Pruebas de evaluación de los programas	118
5.5.1	Okumura-Hata.....	118
5.5.2	Walfish-Ikegami.....	121
5.5.3	ITU-R P.1546.....	125
5.5.4	Tierra Plana	128

CAPÍTULO VI.....	132
MANUAL DE USUARIO.....	132
6.1 Inicialización de menú principal.....	132
6.2 Utilizando el Modelo Tierra Plana.....	133
6.3 Utilizando el Modelo Okumura Hata-Cost231.....	136
6.4 Utilizando el Modelo Walfish-Ikegami.....	139
6.5 Utilizando el Modelo ITU-R P.1546.....	141
CAPÍTULO VII.....	145
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
7.1 Conclusiones.....	145
7.2 Recomendaciones.....	146
CAPÍTULO VIII.....	147
ANEXOS.....	147
REFERENCIAS BIBLIOGRAFIICAS.....	153

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I	15
Tabla. 1.1. División de Frecuencias	17
Tabla. 1.2. Frecuencias Microondas.....	18
Tabla. 1.3. Caracterización del suelo	31
CAPÍTULO II	35
Tabla. 2.1. Valores 1ra Zona de Fresnel[3]	41
CAPÍTULO III.....	47
Tabla. 3.1. Rango Δh y su equivalencia	48
Tabla. 3.2. Coeficientes para cálculo de E resumido [13].....	73
CAPÍTULO IV	74
Tabla. 4.1. Conductividad de Varios tipos de Follaje	76

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I	15
Figura. 1.1. Patrón de radiación de fuente isotrópica[2]	19
Figura. 1.2. Patrón de radiación de antena real[2]	20
Figura. 1.3 Curvas de Nivel[2].....	20
Figura. 1.4. Infinitesimal de área en coordenadas esféricas[1].....	22
Figura. 1.5 Patrón de Radiación Cónico[1]	22
Figura. 1.6 Esquema de transmisión en Espacio Libre[4]	27
Figura. 1.7. Rutas directas e indirectas en tierra[4].....	29
Figura. 1.8. Intensidad de la onda de superficie en tierra seca.	33
Figura. 1.9. Intensidad de la onda de superficie en mar.	33
CAPÍTULO II	35
Figura. 2.1. Propagación por onda ionosférica	36
Figura. 2.2. Mecanismos de propagación por onda de espacio	36
Figura. 2.3 Zonas de Fresnel.....	38
Figura. 2.4. Línea de Vista y primera Zona de Fresnel	39
Figura. 2.5. Difracción por un obstáculo.	42
Figura. 2.6. Pérdidas por difracción por una sola obstrucción[1].....	43
Figura. 2.7. Obstáculo equivalente según Bullington.....	44
Figura. 2.8. Cálculo Aproximado según Epstein & Peterson.	45
Figura. 2.9. Cálculo Aproximado propuesto por Deygout.	46
CAPÍTULO III	47
Figura. 3.1. Cálculo parámetro Δh	49
Figura. 3.2. Promedio de pérdidas en propagación en diferentes terrenos:.....	50
Figura. 3.3. Atenuación en un terreno cuasi regular vs. Frecuencia[1].....	52
Figura. 3.4. Factor de corrección para diferentes tipos de terrenos[1].....	52
Figura. 3.5. Angulo de Incidencia [6].....	56
Figura. 3.6. Distribución normal acumulativa inversa $Q^{-1}(x)$ de Probabilidad.....	59

Figura. 3.7. Determinación de h_1 para enlaces inferiores a 15 Km con casos de relieve. 60

Figura. 3.8. Calculo de h_1 para enlaces inferiores a 15 Km desconociendo el terreno. ...61

Figura. 3.9. Calculo de h_1 para enlaces sobre agua.62

Figura. 3.10. Ángulo θ (a) positive, (b) negative. Obteniendo θ_{tca} 63

Figura. 3.11. Ángulo θ_r de corrección para curvatura de tierra.64

Figura. 3.12. δE_{tca} en función del ángulo de vista θ_{tca} 65

Figura. 3.13. Ejemplo $R' \neq h_2$, resultado no nulo para δE_{h_2} 66

Figura. 3.14. Ejemplo $R' = h_2$, resultado nulo para δE_{h_2} 67

Figura. 3.15. Flujo grama para calculo de δE_{h_2} 68

Figura. 3.16. Corrección de enlaces cortos en terrenos planos69

Figura. 3.17. Situaciones de terrenos mixtos con el mismo tratamiento69

Figura. 3.18. Factor Básico de Interpolación A_o 70

CAPÍTULO IV 74

Figura. 4.1. Atenuación en un túnel [14]77

CAPÍTULO V 78

Figura. 5.1. Diseño del terreno en modelo Tierra Plana79

Figura. 5.2. Diseño del terreno en modelo Tierra Plana79

Figura. 5.3. Diseño del terreno en modelo Walfish81

Figura. 5.4. Menú de inicio para Selección de los Modelos de Propagación81

Figura. 5.5. Cálculos de las pérdidas por trayectoria para ambiente Urbano 119

Figura. 5.6. Calculo utilizando el software desarrollado de Okumura-Hata 119

Figura. 5.7. Cálculos de las pérdidas por trayectoria para ambiente Urbano 120

Figura. 5.8. Calculo utilizando el software desarrollado de Okumura-Hata 121

Figura. 5.9. Calculo de las pérdidas por trayectoria 122

Figura. 5.10. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami en 800 MHz 122

Figura. 5.11. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami 123

Figura. 5.12. Calculo de las pérdidas por trayectoria 124

Figura. 5.13. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami en 1000 MHz 124

Figura. 5.14. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami en 1000 MHz.....	125
Figura. 5.15. Grafica Recomendación ITU-R P.1546.....	126
Figura. 5.16. Grafica de Herramienta desarrollada ITU-R P.1546.....	127
Figura 5.17. Grafica de Perdidas por difracción.....	128
Figura 5.18. Utilizando el Modelo Tierra Plana (a).....	129
Figura 5.19. Utilizando el Modelo Tierra Plana (b).....	130
Figura 5.20. Utilizando el Modelo Tierra Plana (c).....	130
Figura 5.21. Utilizando el Modelo Tierra Plana (d).....	131
CAPÍTULO VI.....	132
Figura. 6.1. Ejecución del menú principal-Paso 1.....	132
Figura. 6.2. Menú principal.....	133
Figura. 6.3. Modelo de Tierra Plana.....	133
Figura. 6.4. Ejemplo de Modelo Tierra Plana.....	134
Figura. 6.5. Gráficos Modelo Tierra Plana(a).....	135
Figura. 6.6. Gráficos Modelo Tierra Plana(b).....	135
Figura. 6.7. Gráficos Modelo Tierra Plana con obstáculos menores a Tx y Rx.....	136
Figura. 6.7. Interfaz Modelo Okumura-Hata.....	137
Figura. 6.8. Alerta Error por ingreso de Dato no numérico.....	137
Figura. 6.9. Alerta Error por ingreso de Dato fuera de rango especificado.....	137
Figura. 6.10. Ejemplo modelo Okumura-Hata.....	138
Figura. 6.11. Grafica Modelo Okumura-Hata.....	139
Figura. 6.12. Modelo Walfish-Ikegami.....	140
Figura. 6.13. Grafica Modelo Walfish-Ikegami.....	141
Figura 6.14. Interfaz Modelo ITU-R P.1546.....	142
Figura 6.15. Utilizando el modelo ITU-R P.1546.....	143
Figura 6.16. Grafica resultante Modelo ITU-R P.1546.....	143
Figura 6.17. Utilizando el modelo ITU-R P.1546.....	144
Figura 6.18. Grafica con la nueva curva.....	144
CAPÍTULO VIII.....	147
Figura 8.1. Grafica ITU-R P.1546.....	147
Figura 8.2. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=100\text{MHz}$, $\%T=10\%$	148

Figura 8.3. Grafica ITU-R P.1546.....	148
Figura 8.4. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=600\text{MHz}$, $\%T=50\%$	149
Figura 8.5. Grafica ITU-R P.1546.....	149
Figura 8.6. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=600\text{MHz}$, $\%T=1\%$	150
Figura 8.7. Grafica ITU-R P.1546.....	150
Figura 8.8. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=2000\text{MHz}$, $\%T=50\%$.	151
Figura 8.9. Grafica ITU-R P.1546.....	151
Figura 8.10. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=2000\text{MHz}$, $\%T=10\%$	152

GLOSARIO

D.

dB: es el acrónimo de la unidad Decibelio.

Decibelio: Se denomina *decibelio* a la unidad relativa empleada en Acústica y Telecomunicación para expresar la relación entre dos magnitudes, acústicas o eléctricas, o entre la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia.

E.

Espectro de frecuencias: es el gráfico que muestra cómo es la descomposición de una señal ondulatoria (sonora, luminosa, electromagnética, etc.) en el dominio frecuencial.

F.

Friss: Desarrollo la formula de transmisión en espacio libre

I.

Isotrópica: se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales medibles dan resultados idénticos con independencia de la dirección escogida para la medida.

Infinitesimal: o infinitésimo es una cantidad infinitamente pequeña.

ITU: son las siglas de “Unión Internacional de Telecomunicaciones”.

ITU-R: Es una referencia desarrollada o sugerida por la *ITU*

P.

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Efectiva. *EIRP* en inglés Effective Isotropic Radiated Power.

R.

RX: Es el acrónimo de Recepción. En ciertos casos se utiliza para denominar a la antena receptora.

T.

Target: En el campo de las antenas, *target* es la dirección en donde el lóbulo de radiación está dirigido.

TX: Es el acrónimo de Transmisión. En ciertos casos se utiliza para denominar a la antena transmisora.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se describirá algunos modelos que representen el fenómeno de propagación en el entorno de las comunicaciones móviles.

Para tener claro algunos conceptos, es necesario revisar una pequeña introducción referente a Teoría de Antenas, a través del cual obtendremos un gran aporte: *la fórmula de transmisión en espacio libre de Friis*, con la que se trabajará posteriormente en los distintos modelos de propagación.

Las comunicaciones móviles son posibles gracias a las ondas de radio, pero es en este medio de transmisión en donde la calidad de la comunicación depende de factores del medio ambiente, estos pueden ser edificios, montañas, el clima, túneles, etc.

Los sistemas de comunicaciones móviles usan frecuencias muy altas, debido a que existe congestión en el espectro de bajas frecuencias[2]. Sin embargo el tráfico en altas frecuencias conduce a tener problemas complicados ya que se debe tener en cuenta un gran número de variables. Por ejemplo, si tenemos una transmisión con una frecuencia de 60 MHz, y calculamos su longitud de onda $\lambda = v/f$ en donde v es la velocidad de propagación en el vacío (velocidad de la luz) y f la frecuencia armónica natural de la onda en transmisión; con lo que se obtiene un resultado de $\lambda = 5$ metros; Entonces, si la onda de transmisión encuentra en su camino a obstáculos con tamaños equivalentes a esta longitud de onda, estos obstáculos trabajarán como diseminadores. Debido a esta propagación diseminada, la señal de radio se desvanece rápidamente con un alcance de más de 40dB por debajo del nivel de la señal.

El desvanecimiento de la señal también es producido por las sombras producidas por montañas, túneles y todo tipo de obstáculos[9]. Todos estos efectos que interfieren en la pérdida de propagación, provocan la pérdida o una mala calidad de las telecomunicaciones. Por todos los fenómenos anteriormente descritos es imposible aplicar una solución determinada para cada uno de estos, por lo que se aplica un método estadístico que ayuda a entender a todos estos fenómenos.

Conceptos básicos

1.1.1 Fundamentos de Antena

Las Antenas son las partes de los sistemas de telecomunicación específicamente diseñadas para radiar o recibir ondas electromagnéticas. También se pueden definir como los dispositivos que adaptan las ondas guiadas, que se transmiten por conductores o guías, a las ondas que se propagan en el espacio libre[3].

Los sistemas de Comunicaciones utilizan antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de televisión o radio, o bien transmitir o recibir señales en equipos portátiles.

1.1.2 Reseña Histórica

Los primeros sistemas de comunicación eléctricos fueron la telegrafía, introducida en 1844, seguida por la telefonía, en el año 1878. En estos sistemas, las señales se enviaban a través de líneas de transmisión de dos hilos conductores, que conectaban el emisor con el receptor.

La teoría de las antenas surge a partir de los desarrollos matemáticos de James C. Maxwell, en 1854, corroborados por los experimentos de Heinrich R. Hertz, en 1887, y los primeros sistemas de radiocomunicaciones de Guglielmo Marconi en 1897. La primera comunicación transoceánica tuvo lugar en 1901, desde Cornualles a Terranova. En 1907 ya existían servicios comerciales de comunicaciones.

Desde la invención de Marconi, hasta los años 40, la tecnología de las antenas se centró en elementos radiantes de hilo, a frecuencias hasta UHF. Inicialmente se utilizaban frecuencias de transmisión entre 50 y 100 kHz, por lo que las antenas eran pequeñas comparadas con la longitud de onda. Tras el descubrimiento del tríodo por De Forest, se puede empezar a trabajar a frecuencias entre 100 kHz y algunos MHz, con tamaños de antenas comparables a la longitud de onda. A partir de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron nuevos elementos radiantes (como guía de ondas, bocinas, reflectores, etc).

Una contribución muy importante fue el desarrollo de los generadores de microondas (como el magnetrón y el klystron) a frecuencias superiores a 1 GHz. En las décadas de 1960 a 1980 los avances en arquitectura y tecnología de computadores tuvieron un gran impacto en el desarrollo de la moderna teoría de antenas. Los métodos numéricos se desarrollaron a partir de 1960 y permitieron el análisis de estructuras inabordables por métodos analíticos. Se desarrollaron métodos asintóticos de baja frecuencia (método de los momentos, diferencias finitas) y de alta frecuencia (teoría geométrica de la difracción GTD, teoría física de la difracción PTD).

En el pasado las antenas eran una parte secundaria en el diseño de un sistema, en la actualidad juegan un papel crítico. Asimismo en la primera mitad del siglo XX se utilizaban métodos de prueba y error, mientras que en la actualidad se consigue pasar del diseño teórico al prototipo final sin necesidad de pruebas intermedias.

Para tener un mejor entendimiento en lo referente a la propagación de las ondas, es importante conocer que es el espectro electromagnético. Como es de conocimiento, Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda. El conjunto de todas las frecuencias se denomina espectro.

Las ondas se clasifican por bandas. Las denominaciones de las bandas de frecuencia se pueden realizar por décadas, como por ejemplo Medium Frequency (MF), High Frequency (HF), Very High Frequency (VHF), Ultra High Frequency (UHF); de manera resumida podemos observarla en la siguiente tabla.

Banda	Denominación	Frecuencia mínima	Frecuencia máxima	Longitud de onda máxima	Longitud de onda mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 KHZ	-	100 Km
VLF	Very Low Frequency	3 KHZ	30 KHZ	100 Km	10 Km
LF	Low Frequency	30 KHZ	300 KHZ	10 Km	1Km
MF	Medium Frequency	300 KHZ	3 MHZ	1 Km	100 m
HF	High Frequency	3 MHZ	30 MHZ	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHZ	300 MHZ	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHZ	3 GHZ	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHZ	30 GHZ	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 GHZ	300 GHZ	1 cm	1mm

Tabla. 1.1. División de Frecuencias

Para frecuencias de microondas se utilizan otras denominaciones, como bandas L,C,S,X, que provienen de los primeros tiempos del radar[2].

Banda	Frecuenci Mínima	Frecuencia Máxima	Longitud de onda máxima	Longitud de onda mínima
L	1 GHZ	2 GHZ	30 cm	15 cm
S	2 GHZ	4 GHZ	15 cm	7.5 cm
C	4 GHZ	8 GHZ	7.5 cm	3.75 cm
X	8 GHZ	12.4 GHZ	3.75 cm	2.42 cm
Ku	12.4 HZ	18 GHZ	2.42 cm	1.66 cm
Ku	18 GHZ	26.5 GHZ	1.66 cm	1.11 cm
Ka	26.5 GHZ	40 GHZ	11.1 mm	7.5 mm
mm	40 GHZ	300 GHZ	7.5 mm	1 mm

Tabla. 1.2. Frecuencias Microondas

1.1.3 Conceptos Básicos

Para un mejor entendimiento se explicará rápidamente los términos a utilizar en el transcurso del proyecto.

Fuente isotrópica: Una fuente isotrópica es aquella que radia energía en todas las direcciones con la misma intensidad.

El vector de *Pointing*: (**P**) O también conocido como densidad de potencia, es el flujo de potencia electromagnética por unidad de área (W/m^2).

La potencia radiada a través de una superficie S (W) está definida por:

$$W = \iint P.ds = \iint P.ds \quad 1.1$$

En donde P es la componente radial de **P**, y ds es el infinitesimal del área S . Al tratarse de una fuente isotrópica, tenemos que radia uniformemente formando una superficie esférica, por lo que se tiene:

$$W = P4\pi d^2 \quad 1.2$$

Siendo d el radio de la esfera formada.

Es decir que en un medio sin pérdidas, la densidad de potencia recibida está dada

por:

$$P = \frac{W}{4\pi d^2} \quad 1.3$$

La intensidad de radiación U es la potencia por unidad de ángulo sólido, es decir que a una distancia d se tendría:

$$U = d^2 P \quad 1.4$$

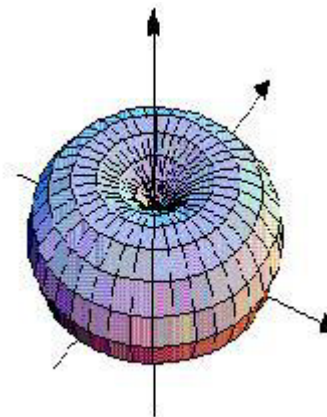
Si reemplazamos la ecuación anterior en la ecuación 3.1, obtenemos la Intensidad de radiación para una fuente isotrópica U_0 .

$$U_0 = d^2 P = \frac{W}{4\pi} \quad 1.5$$

Otro aspecto muy importante a considerar es el entorno en donde se radia la potencia, a este entorno se lo denomina Patrón de radiación.

Si tratásemos con una fuente isotrópica, el patrón de radiación que formaría esta sería de forma circular tanto en el plano horizontal como en el plano vertical, como se indica en la Figura. 1.1.

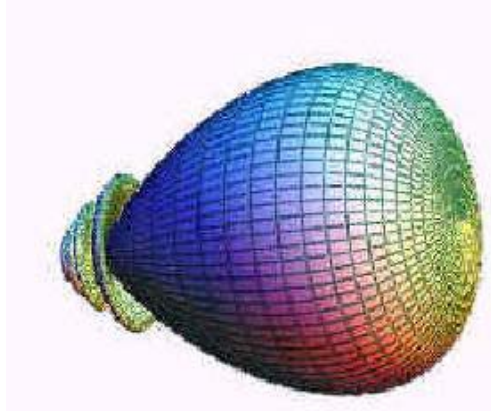
Figura. 1.1. Patrón de radiación de fuente isotrópica[2]



Al tratar con una antena real, esta enfocará con mayor intensidad una región, a esta región se la denomina *Target*, y dicha sección es cubierta por el lóbulo principal de

radiación, mientras que las otras regiones serán cubiertas con menor intensidad por los lóbulos laterales.

Figura. 1.2. Patrón de radiación de antena real[2]

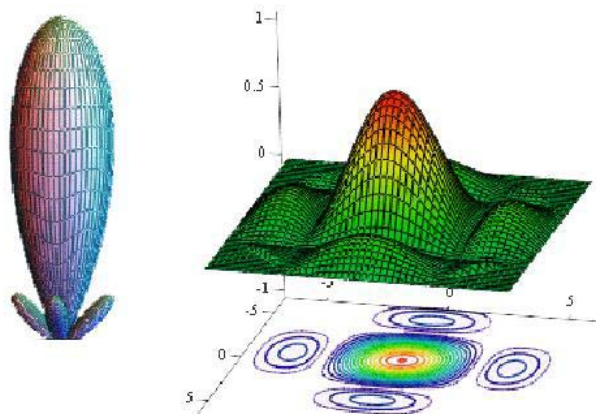


Dependiendo del patrón de radiación, existen antenas omnidireccionales y direccionales, las primeras son aquellas que en el plano horizontal forman un círculo, y las segundas son aquellas que se enfocan en una dirección específica.

.Curvas de Nivel

Cuando la antena es muy directiva, y especialmente en el caso de antenas bidimensionales, se suelen utilizar métodos de representación en forma de curvas de nivel o en forma de funciones tridimensionales. Las gráficas siguientes corresponden a una antena de apertura de dimensiones 2×2 longitudes de onda.

Figura. 1.3 Curvas de Nivel[2]



En los párrafos anteriores se ha mencionado temas sobre la *dirección*, y este está ligado a la *directividad* (D) la cual es representada por la relación entre la intensidad máxima (U_M) con respecto a la intensidad de radiación de una fuente isotrópica (U_o).

$$D = \frac{U_M}{U_o} \quad 1.6$$

Por la ecuación anterior tenemos que la directividad para una fuente isotrópica es igual a 1. Se puede considerar también a la directividad como:

$$D = \frac{U_M}{W/4\pi} = \frac{4\pi}{B} \quad 1.7$$

En donde $W/4\pi$ es la intensidad de radiación promedio (Potencia total sobre el total del ángulo sólido 4π).

Despejando de la ecuación anterior obtenemos:

$$B \equiv \frac{W}{U_M} \quad 1.8$$

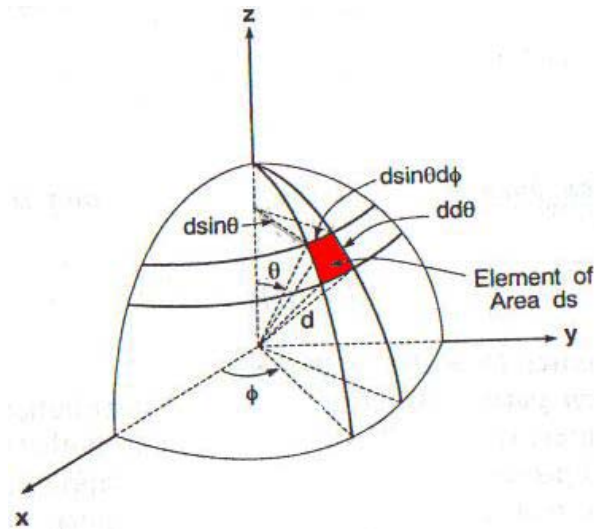
Siendo B el área de haz y es un término adimensional que corresponde al ángulo sólido de la región considerada.

Al reemplazar la ecuación 1.4 en 1.1 y la ecuación 1.1 en 1.8 se obtiene:

$$B = \frac{\iint (U/d^2) ds}{U_M} \quad 1.9$$

En donde el infinitesimal de área ds dependerá del patrón de radiación de la antena, pudiendo ser esta esférica, cónica, etc.

El infinitesimal de área expresado en coordenadas esféricas se lo representa a continuación en la Figura. 1.4.

Figura. 1.4. Infinitesimal de área en coordenadas esféricas[1]

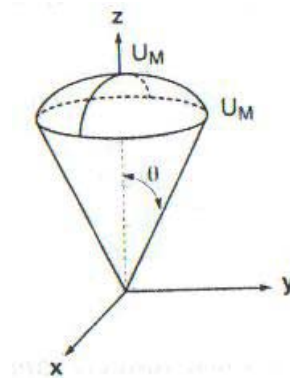
De donde se obtiene:

$$ds = d^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad 1.10$$

Reemplazando en la ecuación 1.9 tenemos:

$$B = \frac{\iint U d\Omega}{U_M} \quad 1.11$$

Entonces la potencia total para una región cónica como la indicada en la Figura. 1.5.

Figura. 1.5 Patrón de Radiación Cónico[1]

Estaría expresada de la siguiente manera:

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^\theta U_M \sin \theta' d\theta' d\phi = 2\pi(1 - \cos \theta)U_M$$

De donde la directividad se obtiene como

$$D = \frac{4\pi}{2\pi(1 - \cos \theta)}$$

Reemplazando en la ecuación anterior distintos valores de θ , se obtiene la Directividad para un solo hemisferio, o para el patrón completo, de la siguiente manera

Si $\theta = \pi/2$

$$D = 2$$

Y para una esfera completa con $\theta = \pi$ se obtiene $D = 1$.

Caso similar se tiene cuando se analiza una fuente con un patrón de radiación cosenoidal.

En este caso, la intensidad de radiación sería: $U = U_M \cos \theta$ con lo que se obtiene

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} U_M \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

$$W = \pi U_M$$

Reemplazando la expresión anterior en la ecuación de la Directividad, obtenemos:

$$D = 4$$

La *Ganancia* (G) expresa una medida de la eficiencia de la antena, y es expresada en relación a una fuente de referencia (Fuente isotrópica).

$$G = \frac{U'_M}{U_o} \quad 1.12$$

La expresión U'_M se refiere a la intensidad de radiación de una antena real, es decir que posee un factor de pérdida. Si la ecuación anterior se la expresara utilizando el concepto de antena sin pérdida, se tendría que añadir un factor η con el cual se tendría que:

$U'_M = \eta U_M$ en donde $0 \leq \eta \leq 1$ es la eficiencia de nuestra antena, y se obtendría:

$$G = \eta \frac{U_M}{U_o} = \eta D \quad 1.13$$

Para una fuente isotrópica y sin pérdidas se tiene que $G = D = 1$, estas dos expresiones, la ganancia y la directividad vienen dadas en Decibeles ($10 \log D$; $10 \log G$).

Otro término muy común en el estudio de las antenas es la *Apertura de la antena* (dado en metros cuadrados), una antena receptora puede ser modelada a través de una impedancia terminal y una impedancia intrínseca, la primera corresponde a la carga que es enviada a la antena y la segunda es la que representa las pérdidas o a la disipación de potencia ya sea por calor o por la acción de radiación de la antena. La apertura de antena es, o representa el radio entre la pérdida de potencia (watts) y la densidad de potencia (watts/m^2) de la onda.

Existen diferentes tipos de aperturas de antena dependiendo las pérdidas:

Apertura Efectiva: Es la relación entre la potencia enviada a la impedancia terminal y la densidad de potencia; la apertura máxima efectiva es conocida como el área efectiva.

Apertura de pérdida: Es la relación entre la potencia disipada como calor y la densidad de potencia.

Apertura diseminadora: Es la relación entre la potencia reflejada por la antena y la densidad de potencia.

Apertura colectora: Es la suma de la efectiva, pérdida, y apertura diseminadora.

Apertura física: Es el tamaño físico de la antena.

Existe una relación entre la Directividad y la apertura, y esta viene dada como sigue:

$$D = KA \quad 1.14$$

En donde K es una constante y A es el área efectiva; al tener dos antenas con directividades D_i y D_j con A_i y A_j se tiene:

$$\frac{D_i}{D_j} = \frac{A_i}{A_j} \quad 1.15$$

A continuación se presenta valores de interés para cierto tipo de antenas:

Antena isotrópica: $A = \lambda^2 / 4\pi$, $D = 1$

Antena de Dipolo corto: $A = 3\lambda^2 / 8\pi$, $D = 3/2$

Antena tipo Dipolo: $A = 30\lambda^2 / 73\pi$, $D = 1.64$

Usando la ecuación 1.15, tenemos:

$$A_i = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_i \quad 1.16$$

Con todos los conocimientos previamente detallados, se puede deducir la fórmula de Friis.

La fórmula de transmisión en espacio libre de *Friis*, se obtiene de la siguiente manera: W_t es la potencia de entrada de una antena con ganancia G_t . La potencia radiada es $G_t W_t$ y la densidad de potencia P a una distancia d es:

$$P = \frac{G_t W_t}{4\pi d^2} \quad 1.17$$

La potencia total recibida por la carga a distancia d es:

$$W_r = A_r P = \frac{A_r G_t W_t}{4\pi d^2} \quad 1.18$$

En donde A_r es la apertura de la antena. Utilizando la ecuación 1.16 en 1.18 se obtiene:

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Si la ganancia es igual a la directividad ($\eta = 1$) en el receptor, entonces:

Y esta última ecuación es conocida como la Fórmula de transmisión en espacio libre de *Friis*.

$$\boxed{\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2} \quad 1.19$$

1.1.4 Patrón de Pérdidas en Propagación

En todos los estudios y proyectos en donde intervenga la propagación de ondas es de vital importancia considerar el patrón de pérdidas (*Path loss* ó *Signal Fade*) o las pérdidas en la trayectoria (l).

Este término representa al decrecimiento de la intensidad de una señal irradiada entre un elemento transmisor (Tx) y un receptor (Rx). Existen algunos aspectos que afectan a dicho fenómeno, entre estos se encuentran:

- Frecuencia Utilizada en la comunicación
- Distancia entre Tx y Rx
- Ganancia de las antenas transmisora y receptora
- Características del medio (topología, clima, obstrucciones naturales, etc).

A la pérdida en trayectoria o *path loss* se la define como la relación entre la potencia recibida (W_r) y la potencia transmitida (W_t).

$$l = \frac{W_r}{W_t} \quad 1.20$$

Si se necesita dicho valor en decibeles, basta afectarlo con el logaritmo de la siguiente manera:

$$L = -10\log(l) = 10\log(W_t) - 10\log(W_r)$$

La expresión anterior y la ec. 1.20 dan como resultado un valor aproximado, ya que para un valor exacto se tendría que considerar un gran número de fenómenos que se presentan en las características del medio, lo cual no es posible; pero existen algunos modelos teóricos los cuales se aplican a casos especiales y estos han sido modificados para dar una medida con mejor aproximación para el patrón de pérdidas en un ambiente de radio móvil.

1.1.5 Pérdidas en espacio libre

En todo análisis de propagación se debe considerar como punto de partida el cálculo del nivel de la señal recibida en una propagación en espacio libre, la cual dependerá de la frecuencia portadora, distancia, ganancia de las antenas entre otros parámetros.

La relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida en espacio libre, está contemplada en la fórmula de Friis como sigue

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad 1.21$$

Al expresarlo en decibeles se obtendría la siguiente expresión:

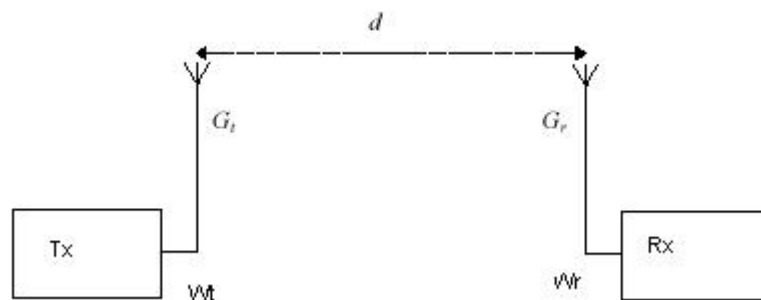
$$L = -10\log G_t - 10\log G_r - 20\log \lambda + 20\log d + 21.98$$

Al usar una fuente isotrópica y sin pérdidas, es decir $G_t = G_r = 1$, considerando la frecuencia en MHz y la distancia en Kilómetros se obtiene:

$$L = 20\log(f) + 20\log(d) + 32.44 \text{ dB} \quad 1.22$$

Para poder comprender de mejor manera los conceptos anteriores se realiza enseguida un ejemplo de cálculo:

Figura. 1.6 Esquema de transmisión en Espacio Libre[4]



La potencia en el receptor de la señal (en espacio libre) será:

$$W_r = W_t + G_t + G_r - L \text{ [dB]}$$

Si se trabaja con una frecuencia de $f = 300 \text{ MHz}$ y una distancia $d = 1 \text{ Km}$, se calcula entonces la pérdida por trayectoria:

$$L = 20\log(300) + 20\log(1) + 32.44 \text{ [dB]}$$

$$L = 81.98 \text{ [dB]}$$

$$\text{Si } d = 2 \text{ Km, } L = 88 \text{ [dB]}$$

Teniendo en cuenta que tanto las potencias como las ganancias de las antenas son fijas, y lo único variable es L que depende de la distancia y la frecuencia, se concluye que si duplicamos la distancia entre las antenas, tendremos una señal recibida 6dB menor, y si duplicamos la potencia de transmisión se obtiene una señal en el receptor de 3dB mayor.

Se debe tener muy en cuenta que en un enlace, la potencia recibida debe ser mayor a la sensibilidad del equipo receptor.

1.1.6 Pérdidas en el plano terrestre

La onda propagada puede llegar al receptor ya sea de forma directa (línea de vista limpia o sin obstáculos), o por medio de una ruta indirecta que puede ser por su reflexión en la tierra o en otro tipo de obstáculos.

Si la señal recibida no proviene de una línea directa, entonces ésta será la combinación de todas las ondas que se forman por la reflexión en los distintos obstáculos por consiguiente la potencia total recibida será resultado de una sumatoria similar.

La potencia de la señal sin una dirección directa, viene dada por la fórmula de Friss pero considerando un factor o coeficiente de reflexión ρ , a demás, la señal reflejada será desplazada por una fase $\Delta\phi$ debido a la trayectoria indirecta. La onda al reflejarse en la tierra pierde parte de su intensidad debido a que existe una proporción absorbida por la tierra, y esta proporción es igual a $(1-\rho)$, que vendría a ser la parte de onda no reflejada y provee de un factor de atenuación A . Por lo que la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida quedaría:

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left| 1 + \rho e^{j\Delta\phi} + (1-\rho)A e^{j\Delta\phi} + \dots \right|^2 \quad 1.23$$

Tanto el coeficiente de Atenuación (A) como el coeficiente de reflexión (ρ) depende de varios factores tales como el ángulo de incidencia, la polarización, constantes terrestres, y frecuencias, por lo que se tiene:

$$\rho = \frac{\sin \theta - K}{\sin \theta + K} \quad 1.24$$

En donde θ es el ángulo de incidencia y K varía con todos los demás parámetros mencionados anteriormente.

Por ejemplo, al considerar un ángulo $\theta = 0$, entonces reemplazando en la ecuación 1.24 obtenemos un $\rho = -1$. ρ tiende a -1 con frecuencias mayores a 100 MHz y con ángulos de incidencia menores a $10^{\circ 2}$. Los efectos de las Ondas que chocan en la tierra, solamente son censadas a unas pocas longitudes de onda sobre el nivel de la tierra, por lo que se usan frecuencias de microonda. Entonces, considerando dicha característica, la ecuación a:

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 |1 - e^{j\Delta\phi}|^2 \quad 1.25$$

Si consideramos como h_1 y h_2 las alturas de la antenas tanto transmisora como receptora, separadas a una distancia d , tal como se indica en la Figura. 1.7.

Figura. 1.7. Rutas directas e indirectas en tierra[4].



Si el tiempo de retraso entre las ondas directa e indirecta es Δt , entonces tenemos que la fase estará dada por $\Delta\phi$, en donde f es la frecuencia de la señal, por lo que

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda} \quad 1.26$$

en donde

$$\Delta d = (i_1 + i_2) - (d_1 + d_2) \quad 1.27$$

y esta es la diferencia entre la ruta directa e indirecta. La diferencia de distancia Δd se la puede representar como una función de h_t , h_r y d , con lo que se obtiene

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left\{ \left[\left(\frac{h_t + h_r}{d} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} - \left[\left(\frac{h_t - h_r}{d} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad 1.28$$

A la ecuación anterior se la puede simplificar aun más usando el concepto de $(1+x)^{1/2}$ es igual a $1+x/2$, en casos donde x sea muy pequeña, por lo que de la ecuación anterior queda

$$\Delta\phi = 4\pi \frac{h_t h_r}{\lambda d} \quad 1.29$$

al trabajar la ecuación 1.25 y pasar del uso de fasores a cosenos y usando las ecuaciones 1.29, obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{W_r}{W_t} = G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \quad 1.30$$

y su valor en decibeles

$$L = -10 \log G_t - 10 \log G_r - 20 \log(h_t h_r) + 40 \log d \quad 1.31$$

En la fórmula anterior se puede deducir que existe una pérdida de 12dB cuando se duplica la distancia, y al doblar la altura de la antena, se obtiene una ganancia de 6 dB (si se trata de una estación base), según el modelo de Okumura (en el caso de antenas de radio móvil) que será analizado en los próximos capítulo, existe una ganancia de 3 dB si $h_r < 3 m$ y 6 dB si $3m \leq h_r \leq 10m$.

En este punto aparece un nuevo concepto, la *suavidad del terreno* o *irregularidad del terreno* a la que se representa con S , y esta depende de varios parámetros entre uno de estos se encuentra la frecuencia.

Dicha suavidad de terreno se adapta dependiendo de ciertos criterios, en este caso se utilizará en criterio de Rayleigh como sigue:

$$S = \frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda} \quad 1.32$$

En donde σ es la desviación estándar de las irregularidades más sobresalientes, θ es el ángulo de incidencia, y λ es la longitud de onda.

Una superficie con $S < 0.1$ es considerado suave o regular, caso contrario con un valor de $S > 10$ en donde se considera a la superficie como irregular o áspera. A las frecuencias de LF (30 kHz – 300 kHz) y MF (300 kHz – 3 MHz) se produce la

propagación mediante onda de tierra u onda de superficie. Esta onda se propaga en la discontinuidad tierra – aire debido a las corrientes inducidas en la Tierra. Este modo sólo propaga la polarización vertical, porque la polarización horizontal se atenúa muy rápidamente debido al carácter conductor de la superficie de la tierra en estas frecuencias.

La onda de espacio compuesta por el rayo directo y del rayo reflejado en el suelo se anula a nivel del suelo, ya que el coeficiente de reflexión en el suelo es prácticamente igual a -1 y los caminos de ambos rayos son prácticamente iguales[4].

La propagación de estas señales depende fundamentalmente de la frecuencia y del tipo de suelo. La caracterización correcta del suelo es fundamental para una correcta predicción de la propagación mediante onda de superficie.

En este caso al suelo se caracteriza como un dieléctrico con pérdidas definido por los parámetros de permisividad relativa y conductividad; en función de estos valores y de la frecuencia predominan corrientes de desplazamiento o de conducción, y el suelo se asemeja más a un dieléctrico o a un conductor.

Tipo de Suelo	permisividad	Conductividad mS/m
Agua de Mar	80	4000
Agua Dulce	80	5
Tierra Humeda	15 - 30	5 - 20
Suelo Rocoso	7	1 - 5
Tierra Seca	4	1 - 10

Tabla. 1.3. Caracterización del suelo

El alcance que se obtiene en este tipo de propagación varía con la frecuencia, la potencia transmitida y el tipo de suelo (tierra seca, húmeda, mar, etc) En LF se pueden conseguir alcances de hasta unos 2000 km, en MF de hasta unos 300 km, mientras que ya en frecuencias más altas como HF, apenas se llega a los 50 km. Las aplicaciones más importantes son los sistemas de comunicaciones navales y los sistemas de radiodifusión (LF y onda media en AM). Las antenas que se utilizan habitualmente son monopolos verticales con alturas entre 50 y 200 m que radian polarización vertical. Para el cálculo del

alcance mediante este mecanismo de propagación se emplea un modelo aproximado de tierra plana, válido para distancias cortas, y un modelo de tierra esférica para distancias largas.

.Modelo de tierra plana:

Este modelo supone una propagación de espacio libre afectada por un factor de atenuación de campo eléctrico F_e . Las antenas que se utilizan son monopolos sobre tierra, la cual se modela como un plano conductor. Para efectos prácticos con este modelo, basta con conocer la directividad de las antenas utilizadas, que depende de su longitud:

- Monopolo corto (longitudes mucho menores λ) sobre tierra $D_o = 3$ (4.77 dBi)
- Monopolo de longitud $\lambda/4$ sobre tierra $D_o = 3.28$ (5.16 dBi) El factor de atenuación de campo F_e (3.5) se calcula a partir de una variable p “*distancia numérica*”, la cual depende de la distancia, de la frecuencia (o longitud de onda) y de la conductividad del suelo.

$$p \approx \frac{\pi d}{60 \lambda^2 \sigma} \quad 1.33$$

Al tratar con distancias grandes ($p \gg 1$), el factor de atenuación de campo tiende a la expresión $F_e \approx \frac{1}{2p}$ con lo que se tiene que el campo eléctrico varía como $1/d^2$. El modelo es válido hasta la distancia en la que la difracción asociada a la curvatura de la Tierra cobra importancia $d_{max} (km) = \frac{100}{\sqrt[3]{f (MHz)}}$

.Modelo de tierra esférica:

Cuando se trabaja con distancias grandes o mayores al caso anterior, es necesario contar con los fenómenos asociados a la difracción que produce la curvatura de la Tierra. La UIT-R proporciona gráficas que modelan la intensidad de campo producida por una antena transmisora, de tipo monopolo corto con potencia radiada de 1 kW, en función de la frecuencia, la distancia y el tipo de terreno. En las Figuras 8 y 9 se presentan las gráficas para dos tipos de terreno: tierra seca y mar.

Figura. 1.8. Intensidad de la onda de superficie en tierra seca. Potencia = 1 kW. Monopolo corto[1]

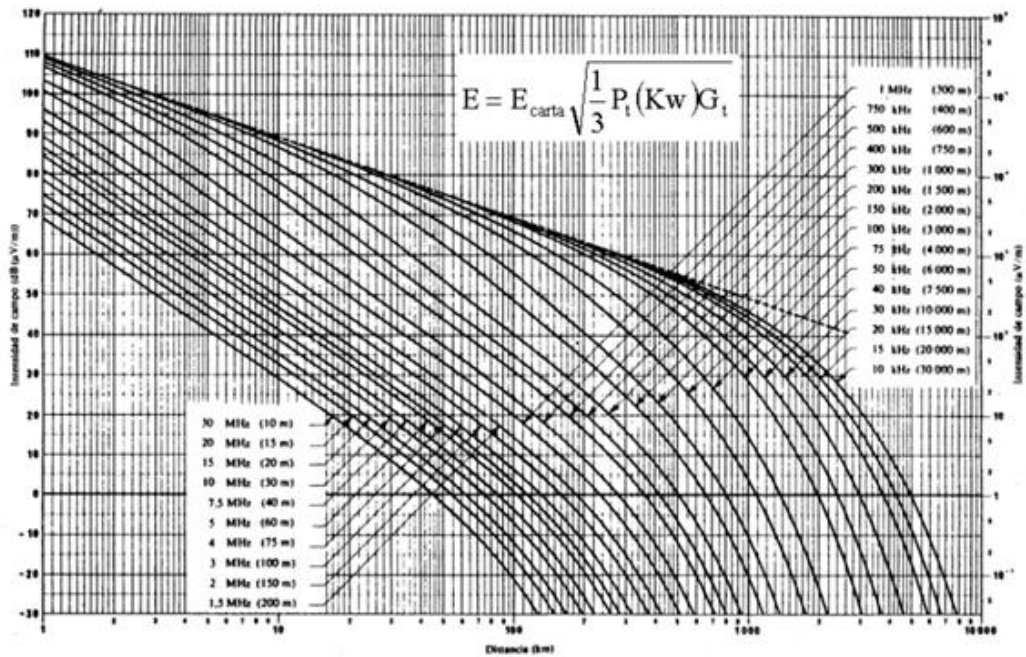
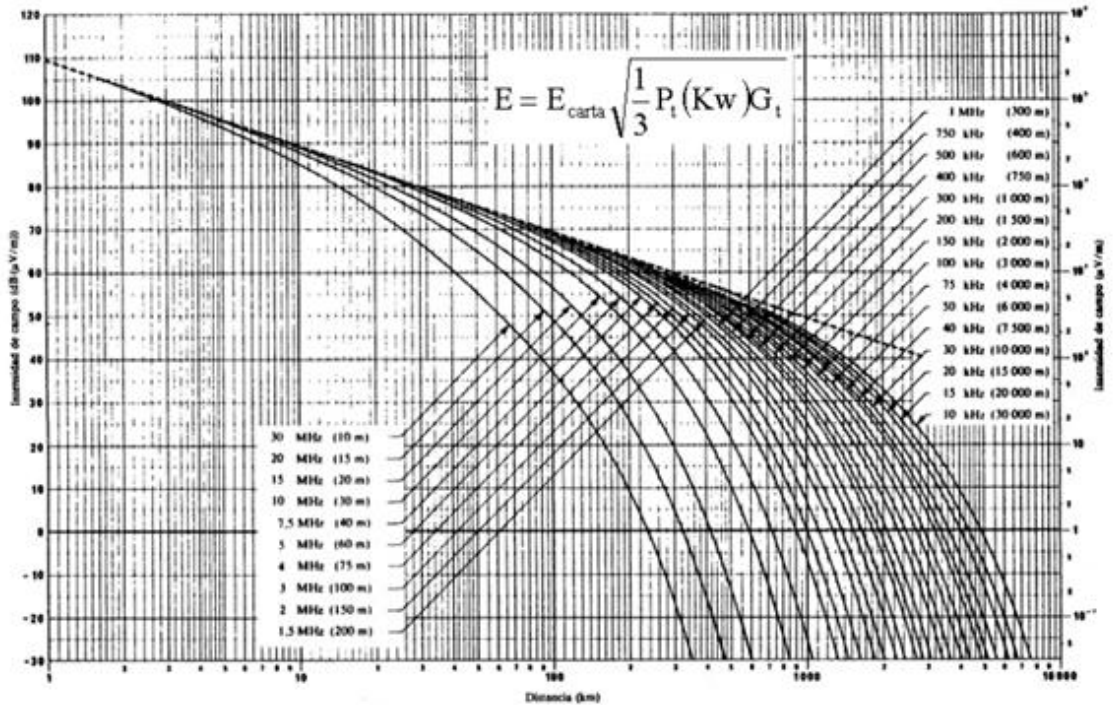


Figura. 1.9. Intensidad de la onda de superficie en mar. Potencia = 1 kW. Monopolo corto[1].



Tal como se observa, el alcance que se obtiene en el mar es mucho mayor del que se obtiene sobre tierra seca y en las mismas condiciones y es obvio debido a la conductividad que posee este medio.

Las graficas solo presentan datos para monopolos cortos, por lo cual, para otro tipo de antenas u otra potencia de transmisión hay que realizar una transformación de los valores leídos en la carta de valores reales de campo.

Esta transformación pasa por la relación entre la PIRE realmente utilizada y la *PIRE* del caso de referencia. Este valor de *PIRE* de referencia es 3 kW (1 kW de potencia radiada por un monopolo corto, con directividad igual a 3).

Del estudio anterior referente a la propagación de ondas en superficie, podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Se trata con una antena relativamente corta como el monopolo corto, la amplitud de los campos no depende de la altura real de esta.
- En las regiones próximas a la antena la potencia en el campo decrece a razón de $1/d$.
- En regiones intermedias el campo decrece como $1/d^2$
- A grandes distancias de la antena transmisora, donde la curvatura de la Tierra se hace importante, el campo decrece de forma exponencial.
- El alcance depende del tipo de terreno, siendo mayor en zonas húmedas que en secas.
- El alcance, para una sensibilidad dada, es menor cuanto mayor es la frecuencia. Por encima de MF el alcance sobre tierra es muy reducido.

CAPÍTULO II

PERDIDAS DE PROPAGACIÓN

Como anteriormente se ha revisado, existen algunos factores tales como el suelo, la troposfera y la ionosfera que son responsables de que el modelo ideal de propagación en espacio libre, descrito en la ecuación de Friis, no sea correcto en la mayoría de los casos reales. Tanto la orografía del suelo como sus características morfológicas condicionan sus propiedades eléctricas, afectando a la propagación de las ondas electromagnéticas.

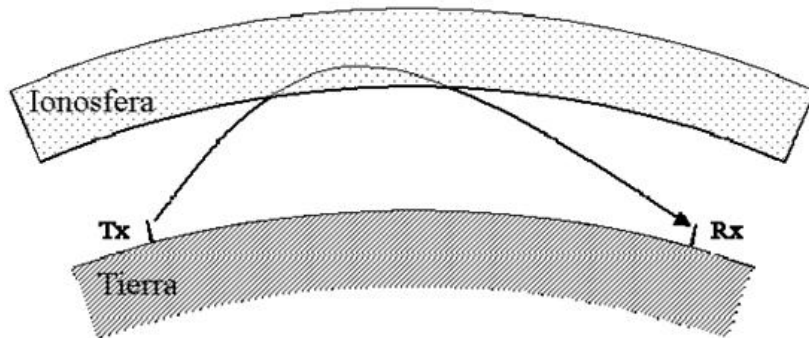
Por ejemplo, a bajas frecuencias (“Médium Frequency”), la Tierra se comporta como buen conductor, excitándose una onda de superficie que se adapta a la orografía del terreno y transporta los campos electromagnéticos mucho más allá de la zona de visibilidad directa. A más alta frecuencia, la atenuación de este medio se incrementa, y es cuando se necesita elevar las antenas respecto al suelo. En este caso, la comunicación se establece normalmente como suma de una onda directa y otra reflejada en el suelo, que interfieren entre sí.

Otro de los factores que interfieren en la propagación de las ondas es la concentración no uniforme de gases en la troposfera, la cual es mayor a menor altura, y esta produce una curvatura de los rayos debido al cambio del índice de refracción del medio con respecto a la altura. Por otra parte en las bandas de microondas se produce una atenuación adicional en las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera. Además, el agua en forma de vapor de agua, o de hidrometeoros como lluvia, niebla, nieve, etc, produce atenuaciones adicionales en la propagación y cierta despolarización.

De igual manera que la troposfera, la ionosfera, capa de la atmósfera entre unos 60 y 400km produce anomalías en la propagación, por ejemplo, refleja las ondas de frecuencias bajas (VLF y LF), refracta a frecuencias de MF y HF, y despolariza la onda en las bandas de VHF y UHF.

A partir de los 30 MHz, la ionosfera es transparente. Pero entre 1.5 y 30 MHz la onda se propaga por la ionosfera aumentando el alcance hasta 7000 Km, claro está que este mecanismo es variable ya que depende del ancho de banda empleado.

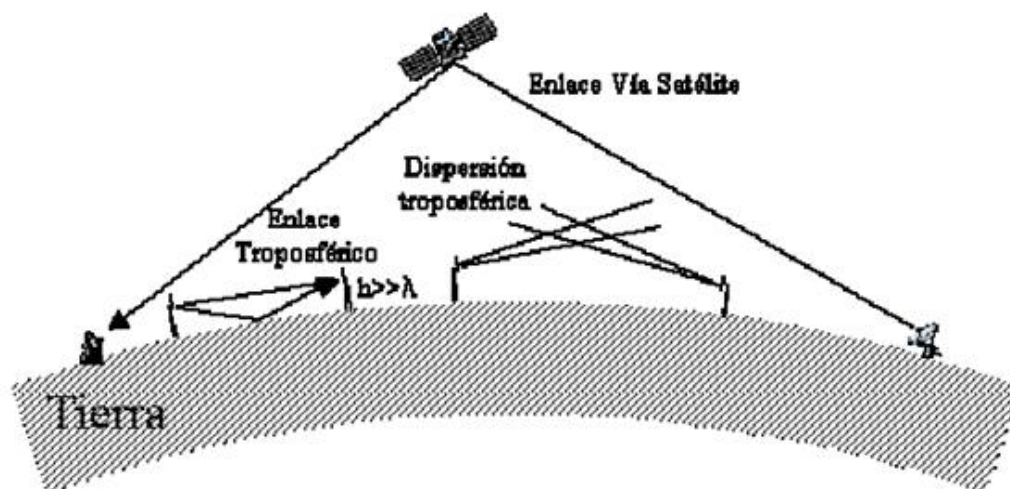
Figura. 2.1. Propagación por onda ionosférica



La propagación por onda de espacio es el mecanismo que se utiliza en la mayoría de los sistemas de comunicaciones tales como la radiodifusión de FM, TV, telefonía móvil, radio enlaces fijos, radiocomunicaciones vía satélite, sistemas de radar, etc.

Las antenas que se emplean son elevadas y directivas, como yagis, bocinas, arrays, reflectores, En la Siguiete Figura se presentan varios mecanismos de propagación por onda de espacio. El más común es el radio enlace terrenal, donde hay que tener en cuenta los efectos del suelo (reflexión y difracción) y los efectos de la troposfera (atenuación y refracción).

Figura. 2.2. Mecanismos de propagación por onda de espacio



En los enlaces vía satélite el nivel de señal recibido es muy bajo, por lo que es importante tal como se a revisado anteriormente el escoger frecuencias suficientemente altas para que la ionosfera sea transparente y considerar también los efectos de la atenuación troposférica.

A demás de la propagación ionosférica, existe un mecanismo llamado de propagación, denominado dispersión troposférica, el cual aprovecha el fenómeno de dispersión de la onda electromagnética debida a las irregularidades dieléctricas de la troposfera asociadas a variaciones de densidad y temperatura de gas.

Con este mecanismo se conseguían alcances bastante mayores que la de línea directa, pero su poca estabilidad y la necesidad de muy altas potencias transmitidas lo han dejado prácticamente en desuso.

Como podemos darnos cuenta, en una situación real, la fórmula de *Friss* en el cálculo de la potencia recibida necesitará de una modificación. En esta fórmula deberemos añadir algunos factores que representen la atenuación para cada circunstancia o fenómeno. Entonces aparece un problema y es que estos factores presentan además una dificultad puesto que el entorno es parcialmente desconocido, y además, varía con el tiempo y con el espacio; por lo que se utilizará un valor medio y una desviación típica, permitiendo valorar la potencia o el campo recibido de modo estadístico.

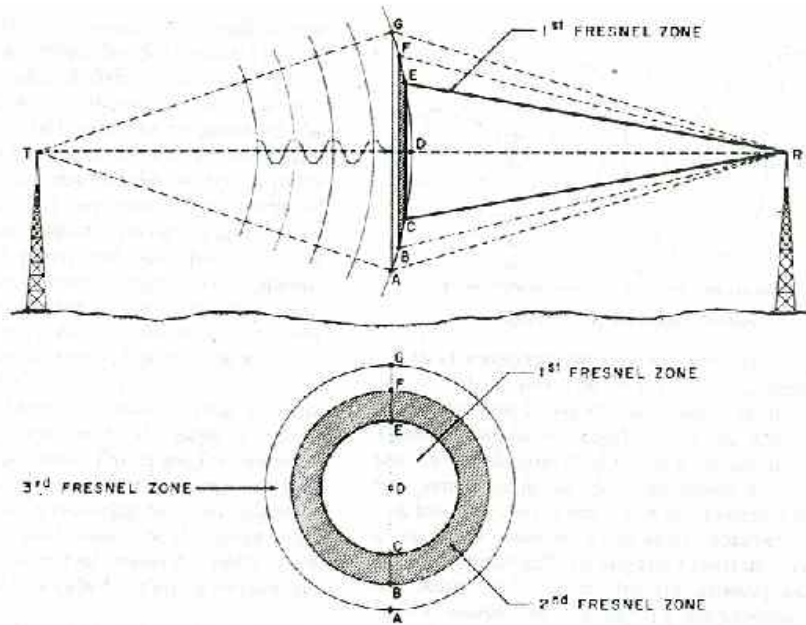
Entonces, los sistemas de comunicaciones móviles necesitan para su instalación y buen funcionamiento, poder determinar las pérdidas en la propagación de las ondas. En la trayectoria de la señal transmitida desde Tx hasta Rx pueden existir algunos obstáculos como colinas, construcciones, árboles, etc; los cuales producirán rutas alternas de llegada a Rx debido a la difracción producida.

Cuando existen estos obstáculos, y que es en la mayoría de los casos de una conexión inalámbrica, se debe tener muy en claro la teoría de las *Zonas de Fresnel*.

La zona de Fresnel es el volumen de espacio entre el emisor de la onda electromagnética y un receptor, de modo a que el desfase de las ondas en dicho volumen no supere los 180 grados. Es decir que la fase mínima se produce por el rayo o haz que une

en línea recta tanto Tx como Rx. “La primera zona de Fresnel abarca hasta que la fase posea un valor de 180° , adoptando la forma de un elipsoide de revolución tal como se indica en la Figura. 2.3, la segunda Zona abarca hasta un desfase de 360° y es un segundo elipsoide que contiene al primero, así del mismo modo se obtiene las zonas superiores¹”

Figura. 2.3 Zonas de Fresnel.



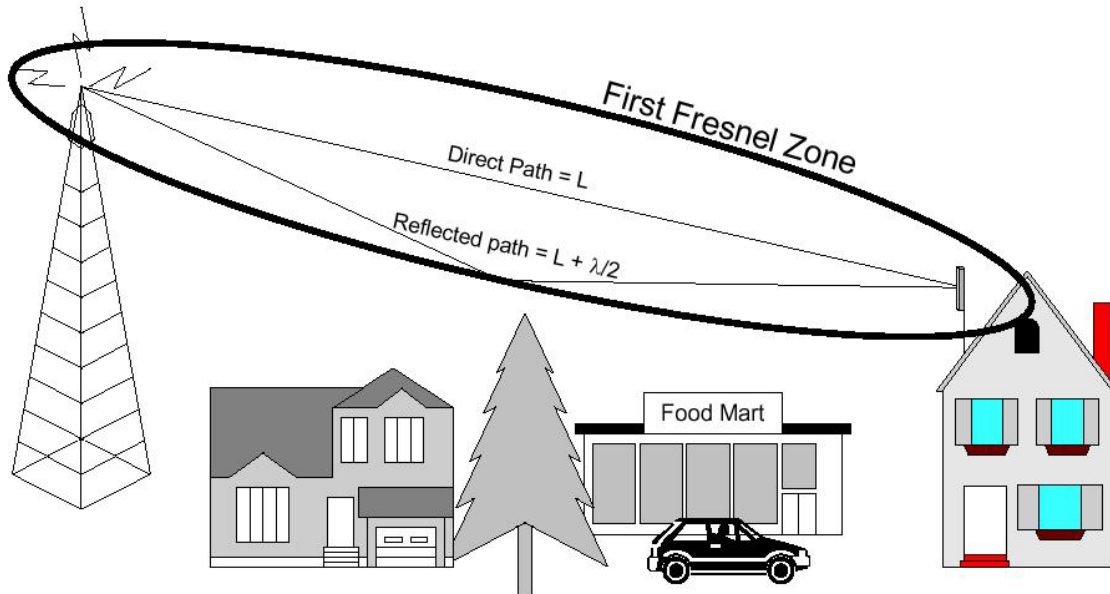
La *zona de Fresnel* es una zona de despeje adicional que hay que tener en consideración además de haber una visibilidad directa entre las dos antenas Figura 2.4. Esto es debido a que toda la primera zona contribuye a la propagación de la onda. Por el contrario, la segunda zona tiene la fase invertida, de modo que su contribución es substractiva. “En general, las zonas impares son positivas, mientras que las pares son negativas².”

¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_Fresnel

² http://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_Fresnel

Figura. 2.4. Línea de Vista y primera Zona de Fresnel¹

Primera Zona de Fresnel



El resultado que se obtiene por esta posible difracción con obstáculos es un aumento o disminución en el nivel de intensidad de señal recibida, la cual se encuentra en estrecha relación con la curvatura de la tierra (K), que generalmente puede tomar valores de $K=2/3$ en el peor de los casos y de $K=4/3$ siendo este un valor óptimo. El concepto de las zonas de Fresnel se puede también utilizar para analizar interferencia por obstáculos cerca de la trayectoria de una antena de radio. Esta zona se debe determinar primero, para mantenerla libre de obstrucciones.

En una transmisión, en la cual existen obstáculos entre Tx y Rx, se debe calcular el valor de la primera Zona de Fresnel y si dentro del 40% de este valor no existe obstrucción, entonces el enlace es factible [1]. En el caso de la telefonía Celular se debe tomar en cuenta la curvatura de la tierra (K), y si se considera un valor de $K=4/3$, entonces las primera zona de Fresnel deberá estar despejada al 100% (caso óptimo), por el contrario con $K=2/3$ debe existir un despeje del 60% para que sea factible la comunicación. Para poder calcular las zonas de fresnel, se debe tener en primer lugar la *línea de vista*, y la zona que rodea a esta

¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_Fresnel

línea de vista es la zona de fresnel, tal como se observa en la figura 9. El radio de la sección transversal de la primera zona de Fresnel tiene su máximo en el centro del enlace. En este punto, el radio r se puede calcular como sigue:

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{nd_1d_2}{fd}} \quad 2.1$$

En donde:

r_n = radio de la n -ésima zona de Fresnel.

d_1 = distancia desde el transmisor al objeto (obstrucción) en km.

d_2 = distancia desde el objeto al receptor en km.

d = distancia total del enlace (Tx - Rx) en km.

f = frecuencia en MHz.

Para un cálculo rápido de la primera zona de Fresnel la cual es la que influye en todos los aspectos de radio enlaces, se procede de la siguiente manera partiendo de la ecuación 2.1 tal como sigue:

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{d}{4f}} \quad 2.2$$

En donde:

r = radio en el centro del enlace en metros (m) .

d = distancia en kilómetros (km).

f = frecuencia transmitida en megahercios (MHz).

En muchas fuentes de información existe una tabla, en la cual se encuentran los valores de la primera zona de Fresnel, la cual será de mucha ayuda en el transcurso del proyecto refiriéndola a las frecuencias celulares.

Distancia KM	1ra Zona 850MHz (m)	1ra Zona 1900 MHz	0.7 de 1ra zona 850	0.7 de 1ra zona 1900	Curvatura Terrestre	Total 850	Total 1900
1	9.39	6.28	6.58	4.40	0	6.58	4.40
2	13.28	8.89	9.30	6.22	0.2	9.50	6.42
3	16.27	10.88	11.39	7.62	0.4	11.79	8.02
4	18.79	12.57	13.15	8.80	0.7	13.85	9.50
5	21.00	14.05	14.70	9.83	1	15.70	10.83
6	23.01	15.39	16.11	10.77	1.5	17.61	12.27
7	24.85	16.62	17.40	11.64	2	19.40	13.64
8	26.57	17.77	18.60	12.44	2.7	21.30	15.14
9	28.18	18.85	19.73	13.19	3.4	23.13	16.59
10	29.70	19.87	20.79	13.91	4.2	24.99	18.11
11	31.15	20.84	21.81	14.59	5	26.81	19.59
12	32.54	21.76	22.78	15.24	6	28.78	21.24
13	33.87	22.65	23.71	15.86	7	30.71	22.86
14	35.15	23.51	24.60	16.46	8.2	32.80	24.66
15	36.38	24.33	25.47	17.03	9.4	34.87	26.43
16	37.57	25.13	26.30	17.59	10.7	37.00	28.29
17	38.73	25.90	27.11	18.13	12	39.11	30.13
18	39.85	26.66	27.90	18.66	13.5	41.40	32.16
19	40.94	27.39	28.66	19.17	15	43.66	34.17
20	42.01	28.10	29.41	19.67	16.7	46.11	36.37
25	46.97	31.41	32.88	21.99	26	58.88	47.99
30	51.45	34.41	36.01	24.09	37.5	73.51	61.59

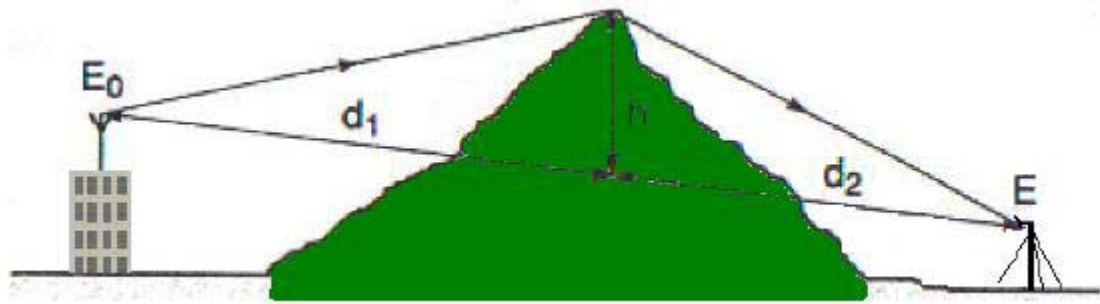
Tabla. 2.1. Valores 1ra Zona de Fresnel[3]

Debido a los diversos factores climatológicos y a la misma orografía del suelo, existen algunos modelos que estudian la fenomenología de los diversos mecanismos, dando una buena estimación de los valores medios. Los modelos más realistas que contemplan las variaciones temporales responden a modelos estadísticos obtenidos a partir de medidas, y estos se presentan a continuación.

Pérdida por difracción por una sola obstrucción

Como se venía tratando anteriormente, al existir un obstáculo entre la trayectoria de propagación, el receptor recibirá la señal más su difracción, tal como se observa en la Figura. 2.5.

Figura. 2.5. Difracción por un obstáculo.



En donde E_0 es la energía del campo eléctrico radiado y E es el del campo difractado, por lo que se tiene:

$$E = E_0 F e^{j\Delta\varphi} \quad 2.2$$

En donde F es el coeficiente de difracción y $\Delta\varphi$ es la diferencia de fase entre las rutas directas e indirectas de la propagación.

El coeficiente de Difracción se lo puede obtener a través de:

$$F = \frac{S(x) + 0.5}{\sqrt{2} \sin(\Delta\varphi + \pi/4)} \quad 2.3$$

Y,

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{S(x) + 0.5}{C(x) + 0.5} \right] - \frac{\pi}{4} \quad 2.4$$

$S(x)$ y $C(x)$ son las integrales seno y coseno de Fresnel tal como sigue:

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad 2.5$$

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} u^2\right) du \quad 2.6$$

Y,

$$x = -h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{d1 + d2}{d1 d2} \right)} \quad 2.7$$

En el caso de que h sea negativa, es decir en el caso de una depresión geográfica, entonces se obtendría una ruta directa entre Tx y Rx.

Con los argumentos anteriores se deduce que la pérdida por difracción es:

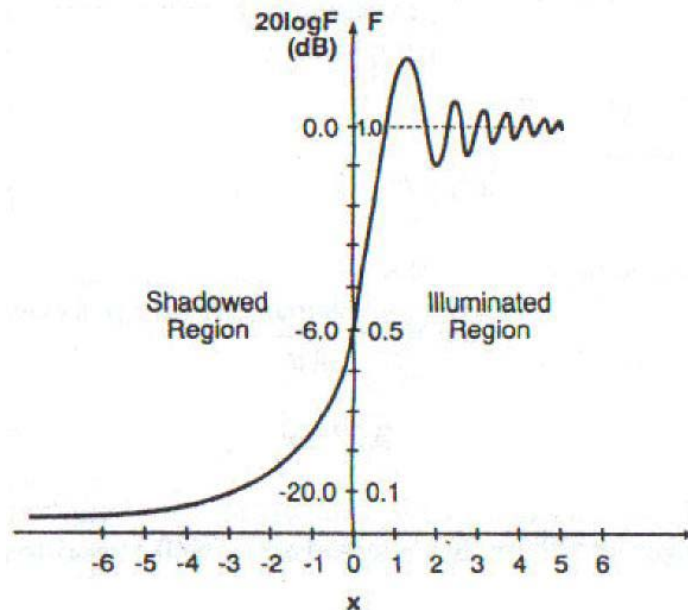
$$L = 10 \log \left| \frac{E}{E_0} \right|^2 = 20 \log F \quad 2.8$$

Trabajando en las integrales de Fresnel se obtiene que:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F = 1 \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} F = 0 \quad F = 0.5 \quad \text{si} \quad x = 0$$

Un valor positivo de h implica una x negativa y en este caso la antena receptora se encuentra en la denominada *región de sombra*, de la cual su curva de pérdidas se encuentra en el plano izquierdo de la Figura 2.6, y con lo que claramente se puede observar que mientras más grande el valor de h también lo será el valor de pérdida. Caso contrario, al obtener una altura negativa, se obtiene una x positiva y la situación de la antena receptora se refleja en la parte derecha de la Figura. 2.6.

Figura. 2.6. Pérdidas por difracción por una sola obstrucción[1].



En el caso de que la obstrucción coincida justo con la línea directa ($x = h = 0$), el campo eléctrico receptado tendrá la mitad de su magnitud del campo transmitido, es decir que la potencia receptada será $\frac{1}{4}$ de la transmitida.

Pérdida por difracción por varias obstrucciones

En un caso real de propagación, la onda u ondas transmitidas sufren el efecto de la difracción no solo por un obstáculo, sino por varios de estos y tal vez sean de diferente tipo, es decir, árboles, edificios, montañas, etc. Para esto se han desarrollado métodos matemáticos que sean de ayuda para poder explicar cómo reacciona la onda frente a estos casos, cabe anotar que ninguno de estos métodos son sencillos. A continuación se detallará algunos de estos métodos, tales como el “Modelo de Bullington”, el “Modelo de Peterson” y por último el “Modelo de Deygout”.

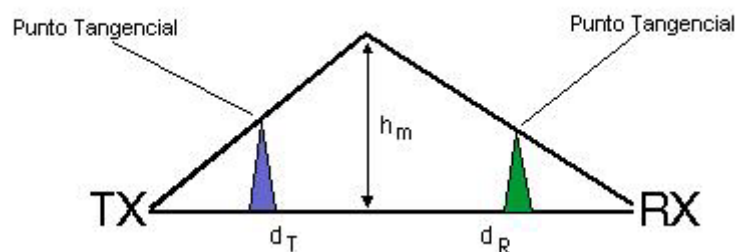
2.2.1 Modelos para pérdida por difracción en varios obstáculos

. Modelo Bullington

Este modelo es uno de los más simples, y se basa o está centrado en un caso para pérdidas de propagación con dos obstáculos. “Si el número de obstáculos es cada vez mayor que 2 entonces este modelo no será tan eficiente[1].

En sí, el modelo de Bullington, se basa en representar a todos los obstáculos que existan entre RX y TX con uno solo que sea equivalente o que cause el mismo efecto que los demás a la onda propagada. Para esto, el modelo toma los dos obstáculos más representativos y realiza una proyección para encontrar el equivalente, tal como se indica en la Figura. 2.7.

Figura. 2.7. Obstáculo equivalente según Bullington.



Como se puede observar en la figura, cualquier otro obstáculo menor a los dos seleccionados es ignorado por dicho modelo.

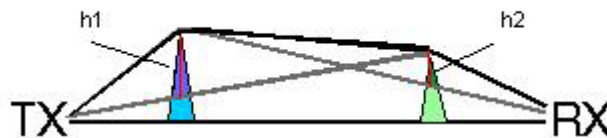
El modelo de Bullington es el más usado y efectivo en modelos de propagación aire tierra. De acuerdo con algunos estudios realizados, este modelo da muy buenos resultados en frecuencias desde 80 MHz a mayores.

.Modelo Peterson

En este modelo se considera a cada obstáculo de manera individual, y se realiza una aproximación del total de la pérdida sumando las pérdidas individuales, como se muestra en la Figura. 2.8.

La primera pérdida es calculada considerando la trayectoria de transmisor – primera obstrucción – segunda obstrucción; mientras que las otras pérdidas serán calculadas tomando en cuenta la ruta de primera obstrucción – segunda obstrucción – receptor.

Figura. 2.8. Cálculo Aproximado según Epstein & Peterson.



En el caso de que las obstrucciones u obstáculos se encuentren muy cercanos uno del otro, alguna de estas alturas no se la determinará de manera correcta, siendo el este método poco eficiente en estos casos.³

.Modelo Deygout

Según Deygout, se calcula en primera instancia la pérdida por propagación considerando la obstrucción dominante en todo el entorno; las otras obstrucciones y las pérdidas causadas por estas, se las realiza en base al obstáculo principal, tal como se ilustra en la Figura. 2.9

³ Foundations of Mobile Radio Engineering. Michel Daoud Yacoub. Pg 74

Figura. 2.9. Cálculo Aproximado propuesto por Deygout

CAPÍTULO III

MODELOS DE PREDICCIÓN

Introducción

Los modelos de predicción o modelos de propagación son un conjunto de operaciones y procesos, usados para representar las características de radio de un ambiente dado.

Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi-empíricos). Mientras que los primeros se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Estos modelos, nos ayudan a predecir la pérdida por trayectoria que una señal de RF que pueda tener entre una estación base y un receptor sea móvil o fijo. La finalidad de aplicar o utilizar estos modelos de predicción para el modelamiento de canales de radio con la información de las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores; gracias a este estudio se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos (especificaciones técnicas).

La validez de estos modelos de predicción se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas de campo reales. Los modelos que se revisaran a continuación tienen una buena correlación en cuanto a las comparaciones mencionadas tanto a nivel de simulación como en mediciones de campo. Los modelos de predicción utilizan para el cálculo de la intensidad de campo de fuerza los modelos previamente estudiados de pérdidas de propagación con cierto tipo de modificaciones, es por eso que su aplicabilidad depende de las especificaciones que este mismo requiera tal como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado o cuasi liso), las características del ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta), características de la atmósfera (índice de refracción, intensidad de las lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre o si se trata de agua), tipo del material de las construcciones urbanas etc. En el

caso de Ecuador, existe una topografía muy irregular y accidentada que caracteriza a toda la región andina, los modelos con mejor desempeño son los que estiman pérdidas por difracción utilizando el modelo clásico de filo de cuchillo y sus distintas variaciones para la extensión a múltiples filos de cuchillo (i.e Epstein-Peterson, Deygout, Bullington etc.), estos modelos que se los ha analizado previamente, analizan punto por punto la trayectoria entre Tx-Rx, identificando las pérdidas causadas por los obstáculos principales y adicionándolas a la solución de Friis.

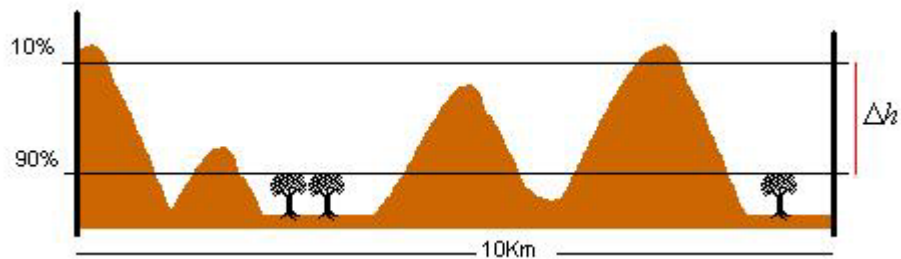
Como todos los modelos dependen de un carácter orográfico, y más aun si se trata de nuestra zona andina, se debe considerar el grado de ondulación que posee el terreno en donde existirá la propagación; este grado de ondulación se lo determina o representa con el parámetro Δh , el cual es medido en un rango de 10 Km, tal como indica la Figura. 3.1.

Este coeficiente indica si en el terreno existe montañas, colinas, o si el terreno es bastante regular o se trata de superficie acuática, estos parámetros se los representa en la siguiente tabla:

Rango (m)	Equivalencia
300 - 700	Montañas Irregulares
150 - 300	Montañas
80 - 150	Colinas
40 - 80	Terreno irregular
20 - 40	Terreno cuasi regular
5 - 20	Terreno Regular
0 - 5	Agua o terreno muy regular

Tabla. 3.1. Rango Δh y su equivalencia

Los algoritmos de predicción son muy complejos y por ende necesitan de una computadora para todos sus cálculos; ahora, el ¿Qué modelo utilizar? Depende de cuanta precisión se requiera.

Figura. 3.1. Cálculo parámetro Δh .

La factibilidad de utilizar uno de estos modelos, va desde el uso simple de una ecuación (la cual nos podría entregar como resultados datos imprecisos), o el uso de software que a más de brindarnos mucha precisión son muy costos⁴. El objetivo de este proyecto es el estudio y la generación de un código capaz de generar el algoritmo de ciertos tipos de modelos o métodos de predicción, los cuales se detallan a continuación.

Método Egli

El método de Egli fue desarrollado en el año de 1957, y es uno de los más simplificados que existen. En este método se asume un terreno con una irregularidad media, es decir con colinas y elevaciones de hasta 50 pies, por lo que no se necesita ningún dato especial de alturas de obstáculos entre el receptor y transmisor, resumiendo así el cálculo de la pérdida a una sola y simple ecuación; a penas usa factores como frecuencia, altura de antenas y la polarización para una mejora de resultados.

Egli se restringe al cálculo de la intensidad de campo hasta en unos 60 Km con un rango de frecuencias de 40 – 900 MHz.

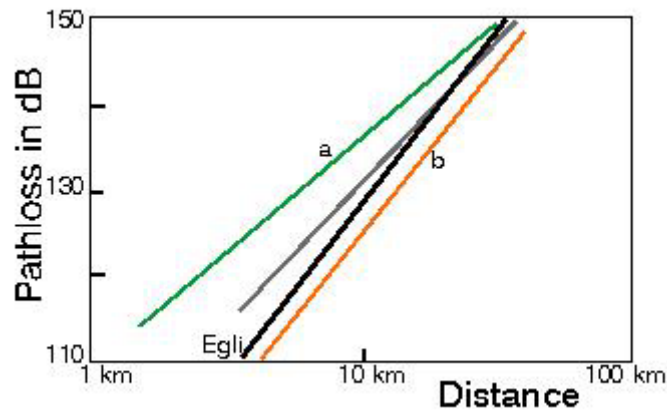
Asume también una altura estándar de antena de 1.5 m, para la cual desarrolló la siguiente ecuación para el cálculo de la pérdida por transmisión o propagación:

$$L = 139.1 - 20 \log h_t + 40 \log d \quad 3.1$$

En donde d es la distancia (Km) entre las antenas transmisora y el receptora y h_t es la altura (m) de la antena en la radio base.

⁴ Foundations of Mobile Radio Engineering. Michel Daoud Yacoub Pg. 78

Figura. 3.2. Promedio de pérdidas en propagación en diferentes terrenos:
 a) área Forestal, b) área abierta, Gris) promedio de "a", Negro) Método de Egli



Como se puede observar en la Figura. 3.2, el método de Egli se ajusta con gran precisión al promedio de pérdida en propagación real, lo cual nos dice si en nuestro trabajo no se requiere de gran precisión, este método sería el ideal debido a la facilidad de obtención de resultados a través de su única fórmula (3.1).

Método Blomquist-Ladell

Este método considera para sus cálculos, la pérdida en espacio libre (L_o), la pérdida en el plano terrestre (L_p), y la pérdida por difracción (L_k), para así con su suma estimar la pérdida total (L), tal como se indica a continuación:

$$L = L_o + \max(L_p, L_k) \quad 3.2 \text{ a}$$

o

$$L = L_o + \sqrt{L_p^2 + L_k^2} \quad 3.2 \text{ b}$$

Este modelo se aplica para frecuencias entre 30 – 900 MHz y distancias de 5 a 22 Km.

Método Longley – Rice

Comenzó en 1968 como un programa para enlaces punto a punto. Este método ayuda a la predicción de la atenuación por pérdidas en espacio libre, es decir que este método se acopla mejor cuando se trabaja en un terreno casi regular caso contrario con el modelo de Bullington.

Longley – Rice requiere de algunos parámetros tales como: frecuencia, altura de las antenas receptora y transmisora, distancia entre estas, el coeficiente de refracción de la

superficie, la conductividad de la tierra, la constante dieléctrica de la tierra, polarización y una descripción total del terreno.

Al contrario que Bullington, Longley trabaja en frecuencias de 20MHz – 40 GHz, para alturas de antena de 0.5 m a 3 Km y distancias entre estas de 1 Km a 2000 Km. Existe un aspecto muy importante con respecto al parámetro que indica la ondulación del terreno, este ya no se basa en una tabla, sino en un cálculo, tal como sigue:

$$\Delta h' = \Delta h [1 - \exp(-0.02d)] \quad 3.3$$

Tanto $\Delta h'$ como Δh están en metros y d en kilómetros. Por ende, si se conoce la característica del terreno, el rango de ondulación será estimado con mejor precisión.

Método Okumura

El método de Okumura fue desarrollado considerando un gran número de parámetros dentro un sector Urbano en Japón (Tokyo). En base a los valores medidos y a métodos estadísticos se calculó el valor medio del campo de fuerza y ciertos factores de corrección. Dentro de los factores de corrección se encuentran el grado de urbanización, el grado de irregularidad del terreno, la locación de la radio base receptora con respecto a colinas cercanas, la orientación de las calles en dicho sector, etc. Este método no es recomendado usarlo para frecuencias bajo los 150 MHz, pero es el método más utilizado para diseño de redes celulares en sistemas de 800 MHz y en específico para coberturas en áreas urbanas, cabe recalcar que el cálculo o desarrollo de este método se refiere a áreas urbanas tomando en cuenta la densidad de Tokio, donde originalmente fue aplicado; es por eso que para la mayoría de las metrópolis del mundo, el modelo urbano de Okumura no se ajusta, por que se recurre al modelo Suburbano que este desarrollo en donde se consideran hileras largas de casas, edificaciones dispersas, etc.

Una característica de este método es que ya considera un factor de regularidad de terreno quasiregular de $\Delta h \approx 20m$.

Entre otros de los factores de corrección se encuentran el factor de atenuación y la ganancia del área (G_{area}), estos dos factores se los calcula tomando una referencia de altura de la radio base transmisora de 200 m, y la antena receptora con un altura de 3 m, en

función de la distancia d , resumiendo, los valores de dichos factores se los obtiene de las siguientes figuras:

Figura. 3.3. Atenuación en un terreno cuasi regular vs. Frecuencia[1]

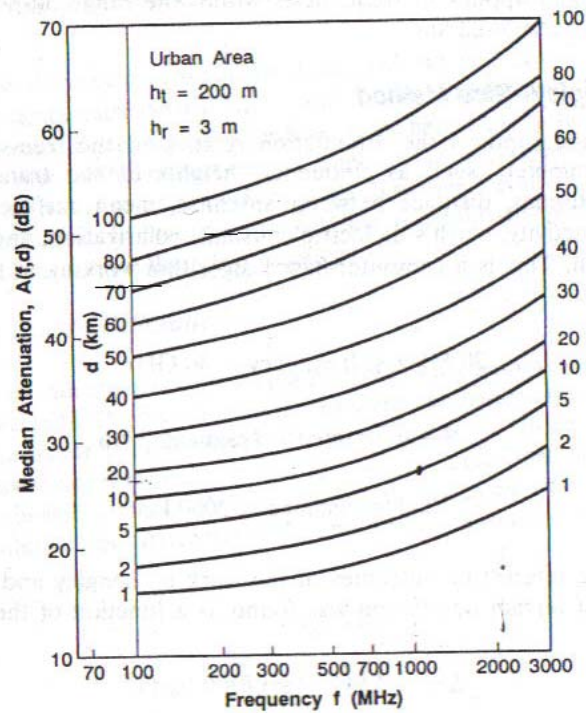
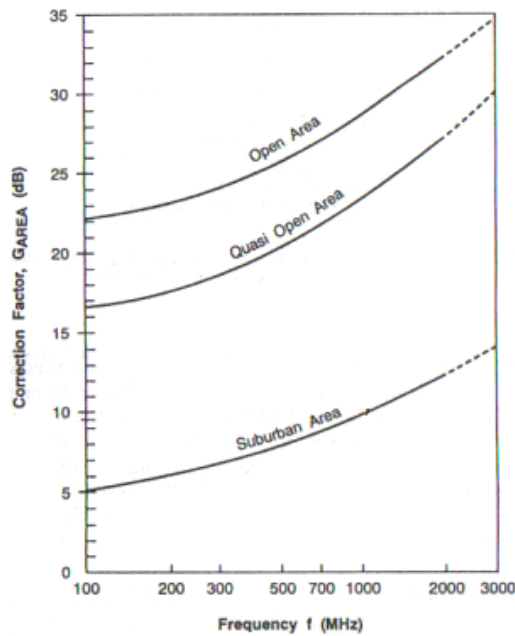


Figura. 3.4. Factor de corrección para diferentes tipos de terrenos[1]



Okumura, calcula la ganancia de la antena de la radio base como sigue:

$$G(h_t) = 20 \log(h_t / 200) \quad h_t > 10m$$

y para el cálculo de la ganancia de la antena móvil es:

$$G(h_r) = 10 \log(h_r / 3) \quad h_r < 3m$$

$$G(h_r) = 20 \log(h_r / 3) \quad 3m \leq h_r \leq 10m$$

El procedimiento utilizado para el cálculo de la pérdida de propagación según Okumura es la siguiente:

1. Dada la distancia d y la frecuencia f , se encuentra la atenuación $A(f, d)$ usando las curvas de la figura [17].
2. De acuerdo con el tipo del terreno, y para la misma frecuencia, se encuentra el respectivo factor de corrección G_{area} .
3. Determinar los factores de corrección $G(h_t)$ y $G(h_r)$ de acuerdo a la altura de las antenas h_t y h_r a través de los resultados obtenidos en los pasos 1 y 2.
4. La pérdida obtenida en el paso anterior es sumada a la pérdida de propagación en espacio libre (L_o) y así se obtiene un valor total de pérdida.

Resumiendo, la pérdida total se condensa así:

$$L = L_o + A(f, d) - G_{area} - G(h_t) - G(h_r) \quad 3.4$$

Fórmula de Hata

Dado que el método de Okumura no puede ser automático debido al uso de curvas para conseguir sus resultados; Hata desarrolló una fórmula empírica que predice con una exactitud similar a la de Okumura.

La fórmula de Hata es la siguiente:

$$L = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_t - A(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log(d) \text{ dB} \quad 3.5$$

Esta fórmula obedece para los siguientes rangos:

$$150 \text{ MHz} \leq f \leq 1000 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} \leq h_t \leq 300 \text{ m}$$

$$1 \text{ Km} \leq d \leq 20 \text{ Km}$$

Ahora solo falta detallar como obtener $A(h_r)$, y es como sigue:

$$A(h_r) = (1.1 \log f - 0.7)h_r - (1.56 \log f - 0.8)db \quad 3.6$$

para $1m \leq h_r \leq 10m$ y se la usa para ciudades pequeñas o medianas.

Una fórmula similar se desarrolló para aplicaciones en ciudades grandes y es la que sigue:

$$A(h_r) = 8.29 \log^2(1.54h_r) - 1.1dB \quad f \leq 200MHz \quad 3.7a$$

$$A(h_r) = 3.2 \log^2(11.75h_r) - 4.97dB \quad f \geq 400MHz \quad 3.7b$$

Con las fórmulas anteriores se logra un sistema automático sin recurrencia a curvas, y con una muy buena precisión pero con un gran limitante, y este es la distancia d que no podrá ser mayor a 20 Km y también que este modelo omite algunas consideraciones tales como el grado de relieve del terreno, la orientación de las calles y el factor de corrección por la cercanía de colinas.

Método de Parson

Este método fue desarrollado para la ciudad de London, por lo que no se lo estudiará a fondo. Este método se basa en dos ecuaciones, la primera trabaja con los datos o inputs como altura de antenas, ganancia, etc, y la segunda es la ecuación de la potencia la cual es multiplicada por un factor de clutter que varía de pendiente del sector.

Método Hata-Cost 231

El modelo Hata-Cost 231, fue creado por la Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica con el fin de tener una mejor correspondencia con las curvas de Okumura para el rango de frecuencias entre los 1500 y 2000 MHz con el fin de implementar el sistema GSM1800 en Europa.

El modelo Hata-Cost 231 tiene un comportamiento similar con la formula de Hata en un área Urbana ya que existe 3 dB de diferencia y una razón para esta diferencia podría ser la corrección del porcentaje de construcciones en el Modelo de formula de Hata. Si el terreno usado tiene diferente porcentaje de construcciones, la diferencia aumentaría o disminuiría dependiendo del terreno. Sin embargo, cuando el estudio se hace para un área abierta y suburbana, el modelo de la formula de Hata se desvía mucho más del modelo Hata-Cost 231.

Los parámetros para Hata-Cost231 son los siguientes:

El cálculo de pérdidas en propagación

$$P_{\text{loss}} = 46.3 + 33.9\log(f) - 13.82\log(h_T) + [44.9 - 6.55\log(h_T)]\log(d) - a(h_R) + C_m \quad 3.8$$

En donde:

$$a(h_R) = (1.1\log(f) - 0.7)h_R - (1.56\log(f) - 0.8)$$

$$C_m = 0\text{dB para ciudades medias y suburbana}$$

$$C_m = 3\text{dB para zonas densamente urbanas}$$

El método Hata-Cost 231 abarca un rango de frecuencias de 1500MHz a 2000MHz, y con un rango de altura de antenas tanto transmisora como receptora de:

$$30\text{m} = h_T = 200\text{m}$$

$$1\text{m} = h_R = 10\text{m}$$

El resto de parámetros, limitaciones y correcciones se mantienen igual que en el modelo de Okumura-Hata o Formula de Hata. La eficacia de este método oscila para un rango de distancias que van desde 1km a 20km[6].

Método Cost 231 Walfish Ikegami

Este modelo se asemeja en la mayoría al anterior Hata-Costo 231, con la diferencia que este modelo se desarrolló para cubrir las necesidades de la mayoría de empresas de telecomunicaciones en lo referente a la frecuencia utilizada y a la calidad de su servicio[8].

Los parámetros y rangos de validez se enlistan a continuación:

- Rango de validez:

Frecuencia f : 800 - 2000 MHz

Distancias $d = 0.02 - 5$ km

Altura de la estación base $h_B = 4 - 50$ m.

Altura de la antena del móvil $h_m = 1 - 3$ m.

- Parámetros

h_R : Altura de los edificios en m

h_B : Altura de la estación base en m, $\Delta h_B = h_B - h_R$

h_m : Altura de la antena del móvil en m, $\Delta h_R = h_R - h_m$

f : Frecuencia en MHz

- d : Distancia transmisor-receptor en km
 b : Separación de edificios en m
 w : Ancho de la calle en m
 φ : Angulo de llegada a la calle ($\varphi=0$, si la calle y la onda Incidente son paralelas)

Para el cálculo de pérdidas en propagación, se tiene:

Pérdidas en trayectos sin visibilidad directa:

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad 3.9$$

En donde:

L_{bf} son las pérdidas en condiciones de espacio libre

$$L_{bf} = 32.45 + 20 \log f(\text{MHz}) + 20 \log d \quad 3.10$$

L_{rts} es la pérdida debida a la difracción “terrace-calle” entre la terraza de los edificios y el móvil,

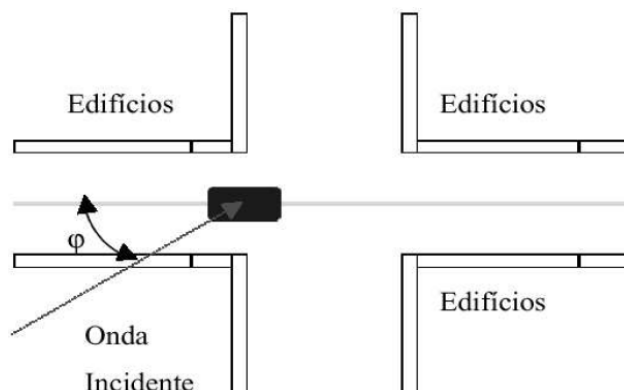
$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log w + 10 \log f + 10 \log \Delta h_R + L_{ORI} \quad 3.11$$

Si, $L_{rts} \leq 0$, se toma $L_{rts} = 0$

L_{ORI} tiene en cuenta el ángulo φ

$$L_{ORI} \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & 0^\circ < \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ) & 35^\circ < \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 55^\circ) & 55^\circ < \varphi < 90^\circ \end{cases}$$

Figura. 3.5. Angulo de Incidencia [6]



L_{msd} es una estimación de la “difracción multiobstáculo” entre el Tx(transmisor) y el edificio próximo al RX(Receptor).

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \cdot \log d + K_f \cdot \log f - 9 \log b \quad 3.12$$

En donde,

$$L_{bsh} = -18 \log (1 + \Delta h_B) \quad 3.13$$

Si $\Delta h_B < 0$, $L_{bsh} = 0$

$$K_a = \begin{cases} 54 & , \text{para } \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0.8 \Delta h_B & , \text{para } \Delta h_B < 0, \text{ y } d \geq 0.5 \\ 54 - 0.8 \Delta h_B \cdot \frac{d}{0.5} & , \text{para } \Delta h_B < 0, \text{ y } d < 0.5 \end{cases}$$

$$K_d = \begin{cases} 18 & , \text{para } \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - \frac{15 \Delta h_B}{h_r} & , \text{para } \Delta h_B < 0 \end{cases}$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{ciudades de tamaño mediano} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{grandes centros metropolitanos} \end{cases}$$

En el caso de desconocer valores, se asumen los siguientes parámetros: $b=20$ a 50 m, $w=b/2$, $hR=3 \times$ Número de pisos + ático, ático 3 ó 0 m, $\varphi=90^\circ$.

En la actualidad, los métodos o modelos más utilizados son la fórmula de Hata o método de Okumura-Hata, el Hata-Cost231 y Walfish-Ikegami. Todo dependen de donde se utilicen.

Método ITU-R P.1546 Modelo de Predicción Punto-Área para servicios terrestres

Este modelo fue desarrollado en Agosto del 2005 y trabaja con frecuencias de 300 MHz a 3000 MHz y es funcional para distancias desde 1 Km hasta 1000 Km. Principalmente fue desarrollado para cubrir los problemas clásicos de otros modelos sobre el uso de frecuencias y distancias; el modelo ITU-R P.1546 realiza una combinación de

varios modelos existentes para así cubrir la mayoría de necesidades que pueda presentar un enlace.

La recomendación ITU-R P.1546 tiene como principal objetivo la utilización de curvas de propagación que se encuentran tabuladas y fueron obtenidas a través de mediciones en zonas templadas tanto de USA como de Europa. Estas curvas serán presentadas en el Anexo1. De forma general, la recomendación nos dice lo siguiente: dados los parámetros de frecuencias, variables de localidad, variable de tiempo y de enlace, alturas del Tx y del Rx, zona geográfica, etc. Busca a través de la variación de estos datos las curvas de medida que más se aproximen al caso real, es decir que si nuestro calculo requiere trabajar con una distancia de 22 Km, y la recomendación nos informa únicamente de curvas para 20 Km y 25 Km, se deberá realizar una interpolación logarítmica para poder obtener el dato deseado a nuestro caso real. Para todas las demás variables es el mismo caso, se deberá encontrar en los datos entregados por la recomendación nuestro límite próximo inferior y superior para realizar la interpolación[13].

Variable Local

Es típico encontrar en esta recomendación que se trabaja con una variabilidad local (VL) del 50%, la variabilidad local abarca muchos aspectos, el coeficiente de campo eléctrico que posee dicha localidad en donde se requiere el análisis de cobertura, montañas, vegetación, clima, etc. Al decir que se considera una variabilidad local del 50% quiere decir, que en toda la extensión del área en donde se está realizando el cálculo, existirá un 50% de esta en donde nuestras condiciones de Potencia de Tx o Rx sean mayores a las estipuladas[11].

Variable Temporal

La Variable temporal (VT) representa las variaciones de campo debido a que tan estable es el canal de enlace. Este puede ser afectado por ciertos valores de índice de refracción atmosférica, posibles movimientos del receptor; entonces, el porcentaje de tiempo (VT) representa la cantidad de tiempo en la que el Rx recibirá una intensidad de señal superior a la estimada. Por ejemplo, si tenemos una intensidad de potencia de -70 dBm con un valor de $VT = 1\%$, significa que la señal recibida será mayor o igual a -70

dBm durante el 1% del tiempo, es decir mientras mayor sea el valor de VT, mayor será la confiabilidad de la predicción[11].

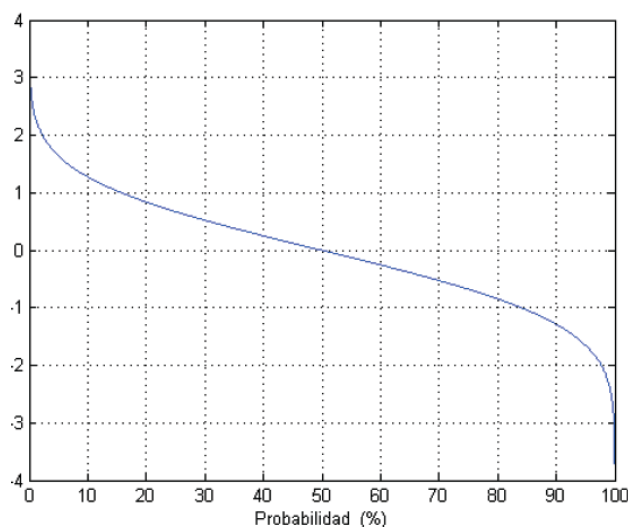
Los valores de VT=1% son generalmente utilizados cuando se desea realizar un análisis de interferencia con otras señales teniendo conocimiento pleno de este problema. Los valores comunes a utilizar para VT son 1%, 10%, y 50% estos valores garantizan la confiabilidad de los cálculos; dado el caso de que se desee trabajar con valores diferentes a los propuestos por la recomendación ITU-R P.1546, se deberá realizar la interpolación tomando en cuenta el valor próximo inferior y próximo superior.

Para realizar una interpolación debido al ingreso de otro valor de VT no estipulado en los nominales, deberá realizarse el siguiente cálculo:

$$E = E(t_{sup}) \left[\frac{Q^{-1}\left(\frac{t_{inf}}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t}{100}\right)}{Q^{-1}\left(\frac{t_{inf}}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t_{sup}}{100}\right)} \right] + E(t_{inf}) \left[\frac{Q^{-1}\left(\frac{t}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t_{sup}}{100}\right)}{Q^{-1}\left(\frac{t_{inf}}{100}\right) - Q^{-1}\left(\frac{t_{sup}}{100}\right)} \right] \quad 3.14$$

En donde t es el valor de VT deseado, t_{inf} y t_{sup} son los valores nominales de VT inmediato inferior e inmediato superior, mientras que $E(t_{inf})$ y $E(t_{sup})$ son los valores nominales que se encuentran tabulados y corresponde a los valores correspondientes de VT nominales y $Q^{-1}(x)$ es el valor de la distribución normal acumulativa inversa que se ilustra en la Figura 3.6

Figura. 3.6. Distribución normal acumulativa inversa $Q^{-1}(x)$ de Probabilidad



Altura Efectiva de Antena Transmisora Tx.

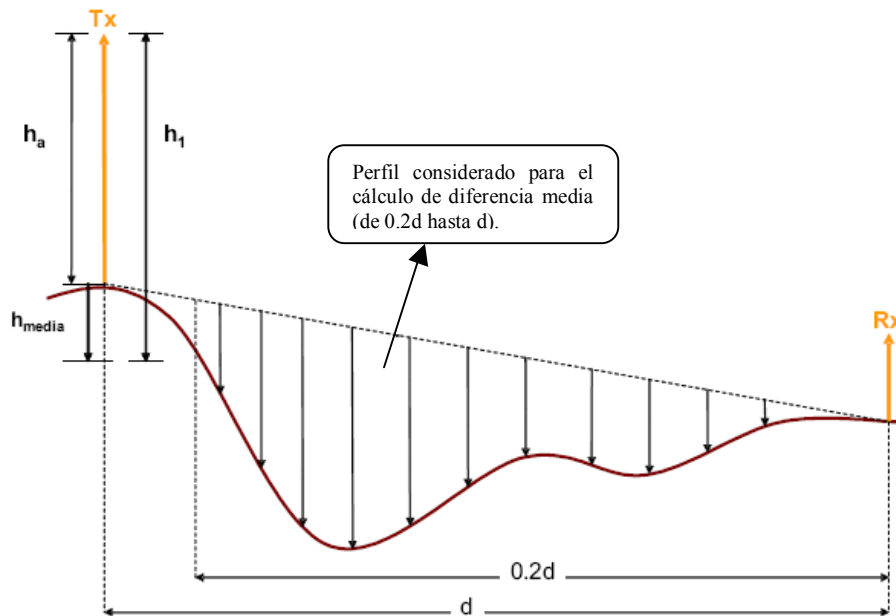
Dentro de los parámetros de la Recomendación ITU-R P.1546 uno de los más importantes es la altura de la Antena Tx (h_1) ya que esta determina un conjunto de medidas que serán utilizadas en los cálculos de cobertura. Se debe tomar en cuenta que para un cálculo terrestre, el valor de h_1 no debe ser menor a 1m, y para cálculos marítimos h_1 no debe ser menor a 3m.

Dependiendo de la altura de la antena Tx se generan tres casos:

- Enlaces inferiores a 15 Km sobre tierra
- Enlaces superiores a 15 km sobre tierra;
- Enlaces sobre agua.

De igual manera, este modelo trabaja con valores nominales de alturas de antenas Tx, en el caso de no trabajar con estos, se realizara la interpolación.

Figura. 3.7. Determinación de h_1 para enlaces inferiores a 15 Km con casos de relieve.



.Enlaces Inferiores a 15 Km sobre tierra

Para estos casos es necesario calcular la altura media (h_{media}) del relieve (desde 0.2d hasta d) relativa a la línea que une la base de Tx con Rx tal como se ilustra en la figura 3.7. Hay que tomar en cuenta que h_{media} puede tomar valores positivos o negativos dependiendo si h_{media} se encuentra arriba o debajo de la antena Tx. En el caso de nuestra figura h_{media} es menor a 0.

Para los cálculos se considera el valor de h_1 que viene dado por:

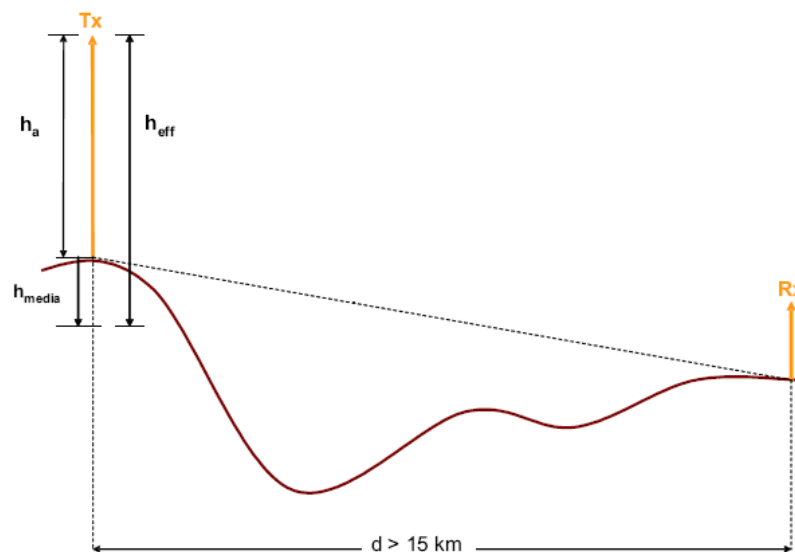
$$h_1 = h_a + h_{media} \quad 3.15$$

En el caso de no conocer las características orográficas, y si nuestro enlace no sobrepasa los 3Km, la Recomendación ITU-R P.1546 indica que

$$h_1 = h_a \quad d < 3\text{Km} \quad 3.16$$

En el caso de no conocer las características orográficas y que el enlace supere los 3Km, se deberá estimar el valor de h_{media} de la manera más conveniente posible. Procediendo de esta manera obtendremos una estimativa de h_{media} y se deberá obtener un parámetro nuevo h_{eff} , representado como se ilustra en la figura 3.8

Figura. 3.8. Cálculo de h_1 para enlaces inferiores a 15 Km desconociendo el terreno.



$$h_{\text{eff}} = h_a - h_{\text{media}} \quad 3.17$$

$$h_1 = h_a + (h_{\text{eff}} - h_a)(d - 3)/12 \quad 3.18$$

Como la distancia máxima para este caso es de 15 Km, podremos simplificar la ecuación 3.18 a:

$$h_1 = h_{\text{eff}} \quad 3.19$$

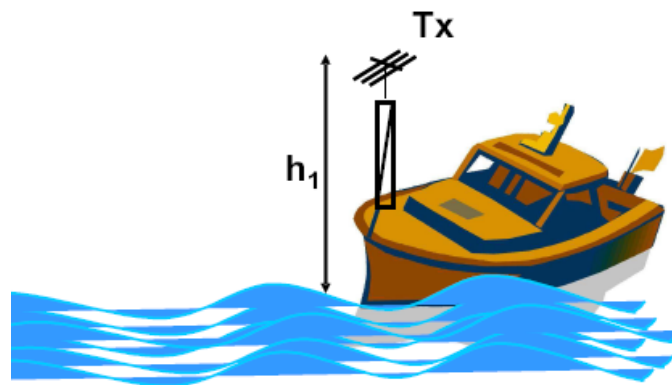
.Enlaces superiores a 15 Km sobre tierra

Al igual que el caso en donde se desconoce las características orográficas para los enlaces mayores a 3Km e inferiores a 15 Km, el valor de h_1 será calculado por medio de la ecuación 3.18.

.Enlaces sobre agua

Para estos casos el valor de h_1 será la altura física de la antena sobre la superficie del agua, como se indica en la figura 3.9

Figura. 3.9. Calculo de h_1 para enlaces sobre agua.



Angulo de vista de terreno

En los distintos relieves que pueden existir, puede presentar la posibilidad de que exista algún obstáculo que impida la línea de vista entre Tx y Rx, para estos casos se deberá tomar en cuenta el ángulo de vista θ_{tea} .

En donde

$$\theta_{tca} = \theta - \theta_r \quad 3.20$$

En donde θ (medido en grados) es el ángulo relativo a la línea de vista entre el Rx y el punto tangencial del obstáculo que se pueda encontrar dentro de los 16 Km entre el Rx y Tx tal como se muestra en la figura 3.10. El ángulo de referencia θ_r el cual se muestra en la figura 3.11 considera la curvatura de la tierra la cual se torna muy importante de acuerdo a como se distancien el Tx del Rx.

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{h_{1s} - h_{2s}}{100d}\right) \quad 3.21$$

En donde h_{1s} y h_{2s} son las alturas del transmisor y del receptor en relación con el nivel del mar, respectivamente y d es la distancia entre estos en Km. El ángulo θ debe ser medido con respecto a la horizontal, será positivo cuando la línea de tangencia se encuentre sobre el horizonte caso contrario será negativo.

Figura. 3.10. Ángulo θ (a) positivo, (b) negativo. Obteniendo θ_{tca}

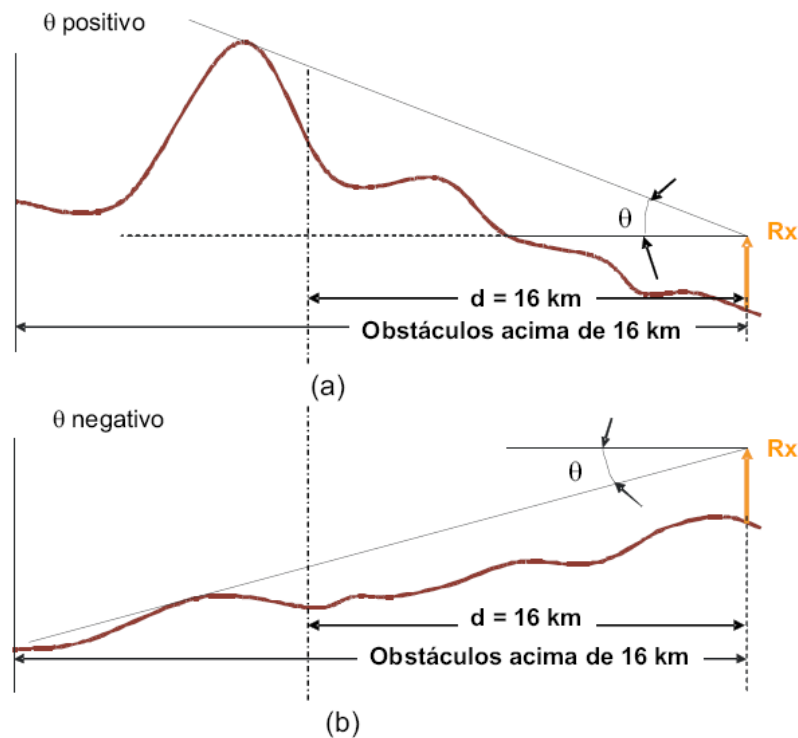
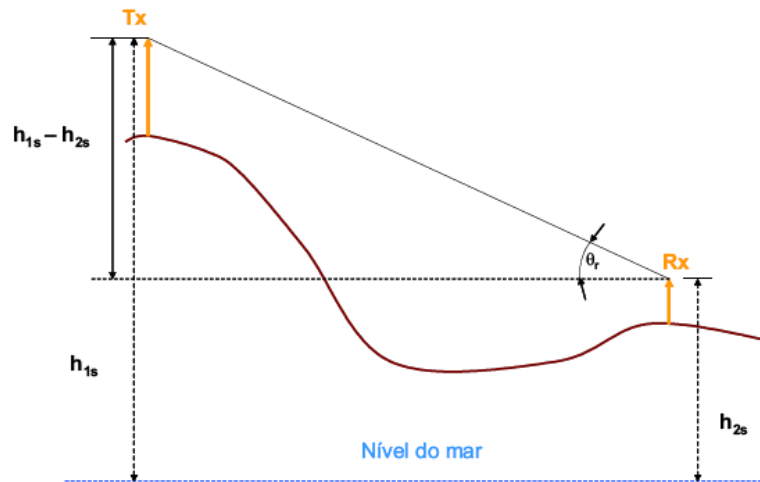


Figura. 3.11. Ángulo θ_r de corrección para curvatura de tierra.

Una vez calculado estos parámetros, se adicionara al cálculo de la intensidad el siguiente complemento.

$$\delta E_{tca} = J(v') - J(v) \quad 3.22$$

En donde

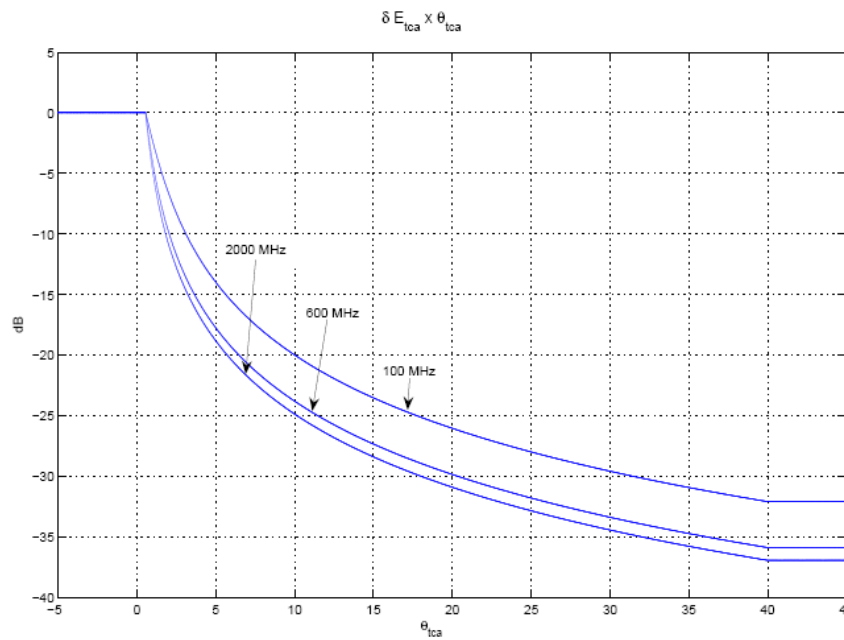
$$J(x) = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(x - 0.1)^2 + 1} + x - 0.1) \quad 3.23$$

$$v = 0.065 \theta_{tca} \sqrt{f} \quad 3.24$$

$$v' = 0.036 \sqrt{f} \quad 3.25$$

f es el valor de la frecuencia en MHz.

Dada la ecuación 3.22 se puede notar que al incrementar el valor de θ_{tca} el valor de δE_{tca} reduce.

Figura. 3.12. δE_{tca} en función del ángulo de vista θ_{tca} .

El ángulo θ_{tca} debe encontrarse en el rango de 0.55 hasta los 45 grados, tal como se observa en la figura 3.12.

Altura de antena receptora

Para la altura de la antena receptora se considera el parámetro h_2 de la base de la antena receptora y también el entorno en donde se encuentra el enlace. En representación de todo este ambiente, la ITU-R P.1546 utiliza una nueva variable R la cual representa la altura de los obstáculos que circundan el entorno del receptor, y esta dependerá de la zona en la que se encuentre, es decir zona densamente urbana, áreas urbanas y rurales.

- $R = 30$ m para áreas densamente urbanas
- $R = 20$ m para áreas urbanas
- $R = 10$ m para áreas rurales

Una vez definidas las alturas h_2 del receptor y la altura R de referencia, se puede aplicar una corrección más al cálculo de la intensidad de campo con δE_{h_2} en función de la altura de la antena receptora. La recomendación ITU-R P.1546 nos entrega las curvas en donde h_2 es igual a las alturas de referencias, es decir, que si el enlace es en una zona densamente urbana, altura $h_2=30$, si estamos en una zona rural será de 10m. En el caso de

enlaces sobre agua, la antena receptora tomara una altura de 10m, al igual que en las zonas rurales.

Después de obtener los datos de h_2 , R , es necesario calcular un parámetro mas, R' , la cual tomo consideración del ángulo del radio de llegada.

Así

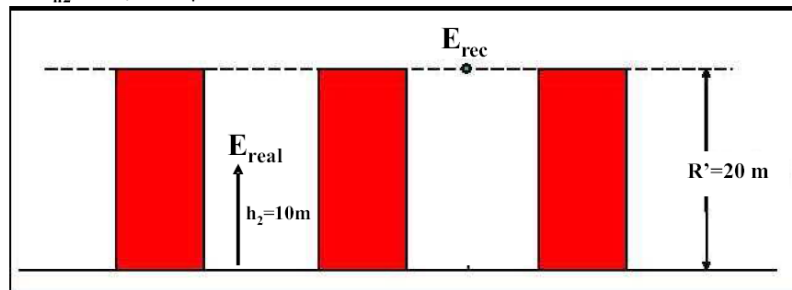
$$R' = \frac{1000dR - 15h_1}{1000d - 15} \quad 3.26$$

En donde d es la distancia del enlace, h_1 es la altura efectiva del transmisor tal como ya se ha explicado en el proceso anterior. Se debe tomar en consideración que el valor mínimo que puede tomar R' es 1 m.

Entonces $\delta E_{h_2} \neq 0$ si $R' \neq h_2$. Este concepto lo podemos visualizar en las figuras 3.13 y 3.14.

Figura. 3.13. Ejemplo $R' \neq h_2$, resultado no nulo para δE_{h_2}

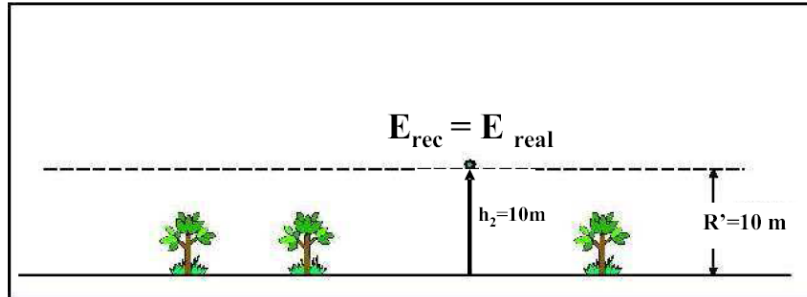
$$\begin{aligned} E_{rec} &= 58,3 \text{ dB}\mu\text{V/m} \\ E_{real} &= 53 \text{ dB } \mu\text{V/m} \\ \delta E_{h_2} &= - 5,3 \text{ dB } \mu\text{V/m} \end{aligned}$$



El caso mostrado en la figura 3.13, $h_2 = 10$ metros, $h_1 = 150$ metros, $d = 50$ Km, el receptor se encuentra en un ambiente urbano por lo tanto $R=20\text{m}$, y consiguiente $R'=19.96$ m, entonces como $R' \neq h_2$ existirá un valor no nulo para δE_{h_2} para compensar esa diferencia entre R' y h_2 . Caso contrario en la figura 3.14, en donde el receptor se encuentra en un ambiente rural $R=10$, por lo tanto $R'=9.96$ entonces $R' \approx h_2$, por lo tanto no existe corrección y tenemos que $E_{rec} = E_{real}$.

Figura. 3.14. Ejemplo $R' = h_2$, resultado nulo para δE_{h_2}

$$\begin{aligned} E_{\text{rec}} &= 58,3 \text{ dB } \mu\text{V/m} \\ E_{\text{real}} &= 58,3 \text{ dB } \mu\text{V/m} \\ \delta E_{h_2} &= 0 \end{aligned}$$



Dado todos los parámetros anteriormente descritos podremos realizar el cálculo de δE_{h_2} tal como sigue:

$$\delta E_{h_2} = 6.03 - J(v) \quad 3.27$$

$J(v)$ esta expresada en la Ecuación 3.23.

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{ctut}} \quad 3.28$$

$$h_{dif} = R' - h_2 \quad 3.29$$

$$\theta_{ctut} = \arctan\left(\frac{h_{dif}}{27}\right) (\text{grados}) \quad 3.30$$

$$K_{nu} = 0.0180 \sqrt{f} \quad 3.31$$

Donde f esta en MHz.

$$\delta E_{h_2} = K_{h_2} \log\left(\frac{h_2}{R'}\right) \quad 3.32$$

$$K_{h_2} = 3,2 + 6,2 \log(f) \quad 3.33$$

$$\delta E_{h_2} = C_{10} \frac{\log\left(\frac{d}{d_{h_2}}\right)}{\log\left(\frac{d_{10}}{d_{h_2}}\right)} \quad 3.34$$

En donde d_{10} y d_{h_2} se encuentran definidos en el flujo grama de la figura 3.15. En el caso de C_{10} es un cálculo de la ecuación 3.32 usando $h_2 = d_{10}$ y $R' = 10\text{m}$.

$$D_{06} = \frac{D_f D_h}{D_f + D_h} \quad 3.35$$

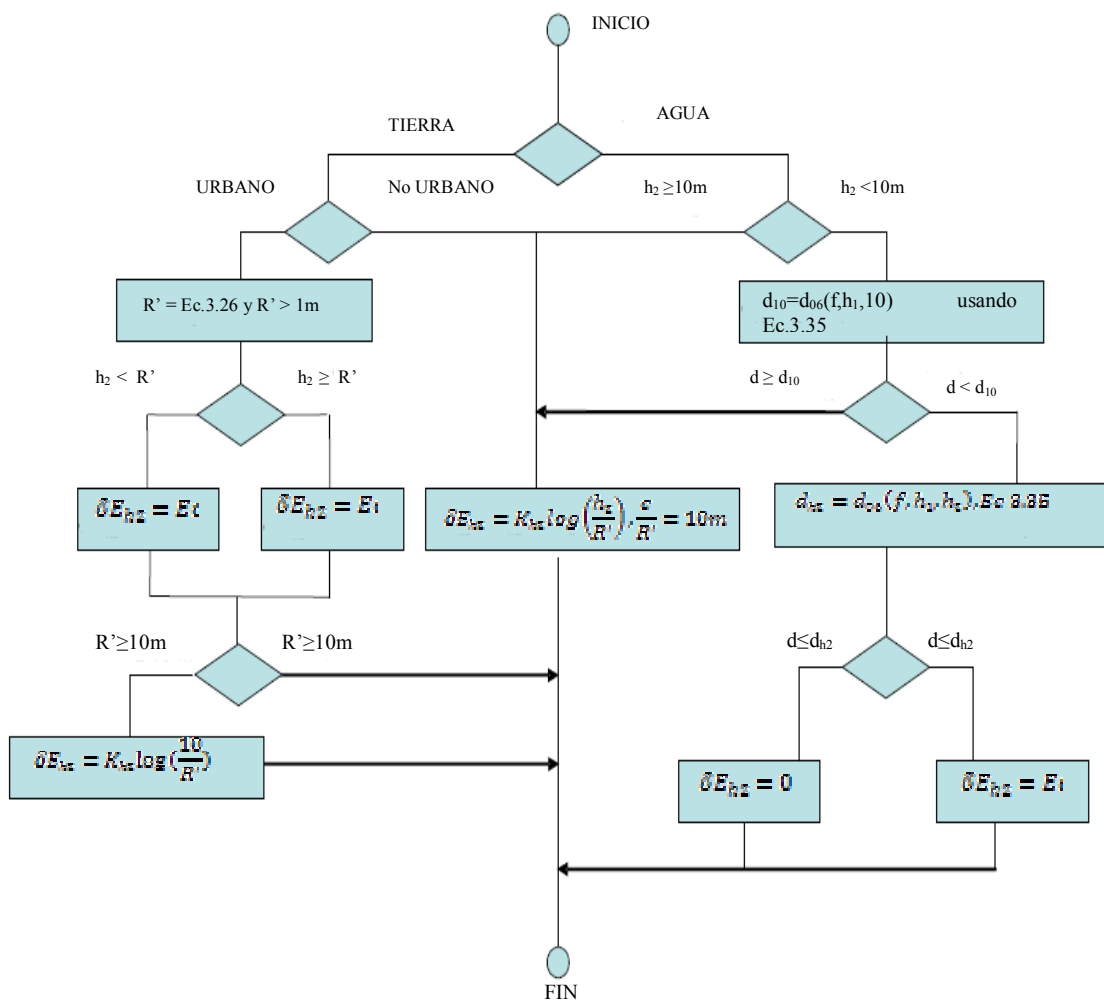
En donde

$$D_f = 0.0000389 f h_1 h_2 \quad 3.36$$

$$D_h = 4.1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad 3.37$$

h_1 y h_2 son las alturas del transmisor y receptor respectivamente.

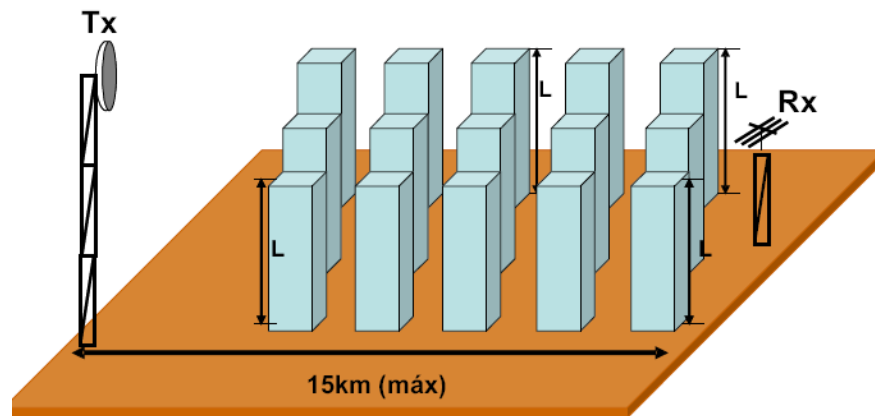
Figura. 3.15. Flujo grama para cálculo de δE_{h2} [11]



Corrección para áreas urbanas y sub urbanas en enlaces cortos

Para aquellas zonas urbanas y sub urbanas, en donde mantienen uniformidad en las alturas de los obstáculos, se debe realizar una corrección en la intensidad de campo que se la llamara δE_{URBANO} . La cual será adicionada al valor total de la intensidad de campo.

Figura. 3.16. Corrección de enlaces cortos en terrenos planos



Debido a la presencia de obstrucciones, la corrección deberá ser aplicada siempre y cuando se cumpla que $h_t - R < 150$ m y es dada por:

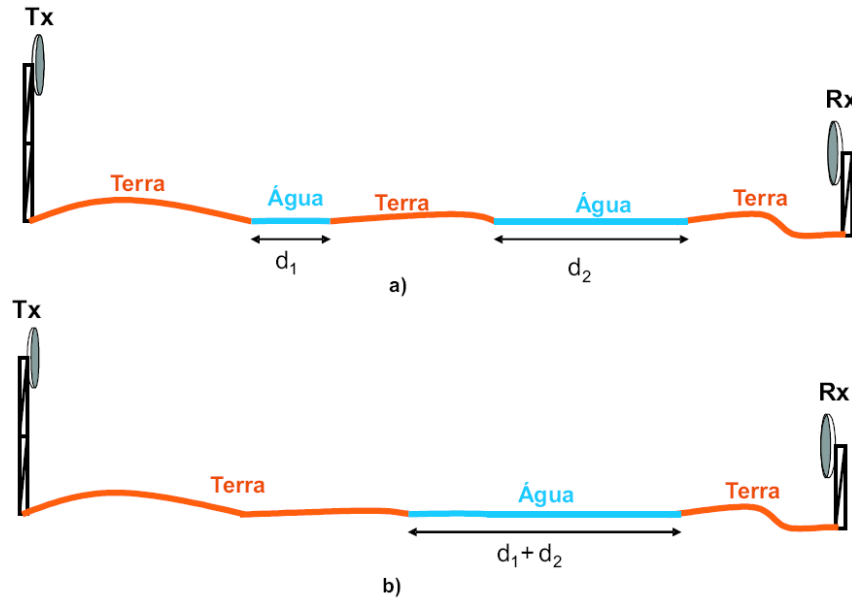
$$\delta E_{URBANO} = -3.3[\log f][1 - 0.85\log(d)][1 - 0.46\log(1 + h_a - R)] \quad 3.38$$

En donde h_a es la altura de la base de la antena transmisora y h_t es la altura efectiva de la misma, R es la altura de referencia del medio analizado, f es la frecuencia en MHz y d es la distancia del enlace en Km.

Correcciones para enlaces en terrenos mixtos

Los terrenos mixtos son aquellos en los que se encuentran zonas de agua y tierra, pueden ser varias secciones de cada una o una sola sección de agua y de tierra.

Figura. 3.17. Situaciones de terrenos mixtos con el mismo tratamiento

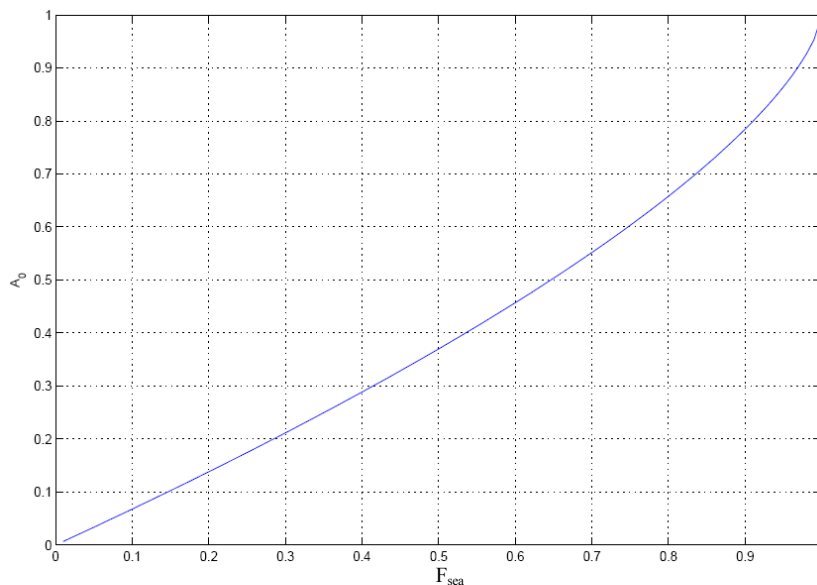


El método general para el cálculo de la intensidad de campo presentado por la recomendación ITU-R P.1546 es

$$E = (1 - A)E_{\text{Terra}}(d) + AE_{\text{Água}}(d) \quad 3.39$$

En donde E_{Terra} y $E_{\text{Água}}$ son las intensidades recomendadas por la ITU para casos puramente terrestres y en agua respectivamente, d es la distancia total del enlace y A es un factor de interpolación para recursos mixtos, el cual será detallado enseguida.

Figura. 3.18. Factor Básico de Interpolación A_0



Para el cálculo del factor de interpolación, es necesario obtener un valor de fracción total del enlace que se encuentre sobre el agua F_{sea} :

$$F_{sea} = \frac{d_{ST}}{d} \quad 3.40$$

En donde d_{ST} es la distancia total que se encuentra el enlace sobre agua y d es la distancia total del enlace. Entonces el factor de interpolación para recursos mixtos está definido como:

$$A = A_o(F_{sea})^V \quad 3.41$$

En donde el valor de $A_o(F_{sea})$ es el factor básico de interpolación y se lo encuentra de la siguiente manera:

$$A_o(F_{sea}) = 1 - (1 - F_{sea})^{2/3} \quad 3.42$$

Los valores reflejados por la ecuación 3.42 pueden ser observados en la figura 3.18.

$$V = \max \left[1; 1 + \frac{\Delta}{40} \right] \quad 3.43$$

En donde Δ se expresa como sigue:

$$\Delta = \sum_{n=1}^{N_s} E_{Sn}(d) \frac{d_{Sn}}{d_{ST}} - \sum_{m=1}^{Ml} E_{Lm}(d) \frac{d_{Lm}}{d_{LT}} \quad 3.44$$

N_s y Ml son los totales de zonas sobre agua y tierra respectivamente, $n=(1,2,3,\dots,N_s)$ y $m=(1,2,3,\dots,Ml)$ son índices que indican las zonas respectivas, d_{Sn} es la distancia total del recurso n , d_{Lm} es el recurso total del recurso m . $E_{Sn}(d)$ y $E_{Lm}(d)$, representan la intensidad de campo para d , considerando el recurso puramente como agua y tierra respectivamente. d_{ST} y d_{LT} son las distancias totales tanto de agua como de tierra que exista en todo el enlace.

$$d_{LT} = d_{L1} + d_{L2} + \dots \quad 3.45$$

$$d_{ST} = d_{S1} + d_{S2} + \dots \quad 3.46$$

La recomendación ITU-R P.1546 no posee ninguna corrección para enlaces sobre agua dulce, solo las tiene para agua salada. Lo único que recomienda hacer es tratar a los enlaces en zonas de agua dulce, o enlaces mixtos con agua dulce, como una zona netamente terrestre.

Proceso Resumido de la Recomendación ITU-R P. 1546.

El siguiente proceso planteado por la recomendación, es utilizado para los cálculos en computadora, y será este entonces el que se utiliza para el desarrollo del software.

En el proceso se contempla el cálculo de una variable K la cual realiza una interpolación automática con cualquier dato de h_l (altura de Tx), los datos que se conservan y no se los considera para interpolarlos / extrapolarlos serán la frecuencia cuyos valores fijos son 100 MHz, 600 MHz, y 2000MHz, y el porcentaje de tiempo que se trabajara con valores de 1%, 10% y 50%.

Se debe tomar en cuenta que los valores de h_l están limitados desde 10 metros hasta los 2000 metros, de igual manera, la restricción que brinda la ITU-R P.1546 con respecto a la distancia es que esta no debe ser menor a 1Km y mayor a los 3000Km. El modelo no muestra su efectividad para distancias mayores a los 3000 Km y eso lo podremos observar en las graficas que arroja la herramienta desarrollada.

Las ecuaciones para este proceso se detallan enseguida.

$$K = \frac{\log\left(\frac{h_l}{9.575}\right)}{\log(2)} \quad 3.47$$

$$E_u = p_b \cdot \log \left[\frac{10^{-p_b} \frac{E_1 + E_2}{E_1 - E_2}}{10^{p_b} + 10^{p_b}} \right] \quad 3.48$$

En donde

$$p_b = d_0 + d_1 \cdot \sqrt{K} \quad 3.49$$

y,

$$E1 = (a_0 \cdot K^2 + a_1 \cdot K + a_2) \cdot \log(d) + 0.1995 \cdot K^2 + 1.8671 \cdot K + a_3 \quad 3.50$$

$$E2 = E_{rsf} + E_{off} \quad 3.51$$

Donde,

$$E_{rsf} = b_0 \left[\exp[-b_4 \cdot 10^\xi] - 1 \right] + b_1 \cdot \exp \left[- \left(\frac{\log(d) - b_2}{b_3} \right)^2 \right] - b_6 \cdot \log(d) + b_7 \quad 3.52$$

$$\xi = \log(d)^{b_5} \quad 3.53$$

$$E_{off} = \frac{c_0}{2} \cdot K \cdot \left[1 - \operatorname{tgh} \left[c_1 \cdot \left[\log(d) - c_2 - \frac{c_3 K}{c_4} \right] \right] \right] + c_5 \cdot K^{c_6} \quad 3.54$$

Todos los parámetros de a , b , c y d con sus respectivos índices ya se encuentran tabulados por la recomendación ITU-R P.1546 y son mostrados en la tabla 3.2

Frequency	100 MHz			600 MHz			2 000 MHz		
	50	10	1	50	10	1	50	10	1
a_0	0.0814	0.0814	0.0776	0.0946	0.0913	0.0870	0.0946	0.0941	0.0918
a_1	0.761	0.761	0.726	0.8849	0.8539	0.8141	0.8849	0.8805	0.8584
a_2	-30.444	-30.444	-29.028	-35.399	-34.160	-32.567	-35.399	-35.222	-34.337
a_3	90.226	90.226	90.226	92.778	92.778	92.778	94.493	94.493	94.493
b_0	33.6238	40.4554	45.577	51.6386	35.3453	36.8836	30.0051	25.0641	31.3878
b_1	10.8917	12.8206	14.6752	10.9877	15.7595	13.8843	15.4202	22.1011	15.6683
b_2	2.3311	2.2048	2.2333	2.2113	2.2252	2.3469	2.2978	2.3183	2.3941
b_3	0.4427	0.4761	0.5439	0.5384	0.5285	0.5246	0.4971	0.5636	0.5633
b_4	1.256×10^{-7}	7.788×10^{-7}	1.050×10^{-6}	4.323×10^{-6}	1.704×10^{-7}	5.169×10^{-7}	1.677×10^{-7}	3.126×10^{-8}	1.439×10^{-7}
b_5	1.775	1.68	1.65	1.52	1.76	1.69	1.762	1.86	1.77
b_6	49.39	41.78	38.02	49.52	49.06	46.5	55.21	54.39	49.18
b_7	103.01	94.3	91.77	97.28	98.93	101.59	101.89	101.39	100.39
c_0	5.4419	5.4877	4.7697	6.4701	5.8636	4.7453	6.9657	6.5809	6.0398
c_1	3.7364	2.4673	2.7487	2.9820	3.0122	2.9581	3.6532	3.547	2.5951
c_2	1.9457	1.7566	1.6797	1.7604	1.7335	1.9286	1.7658	1.7750	1.9153
c_3	1.845	1.9104	1.8793	1.7508	1.7452	1.7378	1.6268	1.7321	1.6542
c_4	415.91	510.08	343.24	198.33	216.91	247.68	114.39	219.54	186.67
c_5	0.1128	0.1622	0.2642	0.1432	0.1690	0.1842	0.1309	0.1704	0.1019
c_6	2.3538	2.1963	1.9549	2.2690	2.1985	2.0873	2.3286	2.1977	2.3954
d_0	10	5.5	3	5	5	8	8	8	8
d_1	-1	1	2	1.2	1.2	0	0	0	0

Tabla. 3.2. Coeficientes para cálculo de E resumido [13]

Finalmente se calcula la intensidad de campo,

$$E_b = p_{bb} \cdot \log \left[\frac{\frac{E_u + E_{fs}}{10^{P_{bb}}}}{\frac{E_u}{10^{P_{bb}}} + \frac{E_{fs}}{10^{P_{bb}}}} \right] \quad 3.55$$

E_{fs} : Intensidad de campo en espacio libre

$$E_{fs} = 106.9 - 20 \log(d) \quad \text{considerando una ERP} = 1kW \quad 3.56$$

p_{bb} : Coeficiente con valor de 8.

CAPÍTULO IV

CONSIDERACIONES EN OTROS EFECTOS

Existen varios factores que afectan a la propagación de las ondas, y como ya se lo ha revisado en capítulos anteriores, existen modelos y métodos que ya toman en consideración estos factores.

Si retomamos el tema del método de Okumura, este utiliza factores como orientación de calles, construcciones, etc. En otros modelos se toma en cuenta un coeficiente que indica cuan tupida es la vegetación, o que indica la cantidad de obstáculos que se puedan encontrar entre el Tx y el Rx.

En este capítulo se comentará brevemente estos factores y los efectos que estos causan a la propagación, siendo este uno de los principales aspectos a tomar en cuenta en el desarrollo del software.

Condiciones atmosféricas

Como ya se había comentado antes, los fenómenos atmosféricos afectan en las telecomunicaciones, y ahora que se tratan de inalámbricas o móviles depende ampliamente de la frecuencia de propagación; por ejemplo, si se transmite sobre los 10 GHz existirá una pérdida considerable de potencia si existiere lluvia, caso similar sucede cuando se trabaja en frecuencias de 24GHz ya que el vapor de agua absorberá parte de la potencia transmitida afectando a la comunicación[1].

Y un factor que prácticamente es inevitable, sucede cuando se transmite a 60 GHz ya que la presencia de oxígeno causa el mismo efecto que el vapor de agua en frecuencias de 24 Ghz, aquí la única solución es aumentar la potencia de transmisión para que el Rx pueda recibir la información.

Follaje

En esta sección entenderemos como follaje a los árboles y arbustos, tomando en cuenta que estos trabajan como obstáculos difractores, reflectores y a demás absorben la señal de radio.

Estos efectos de follaje se los deberá tomar en cuenta en áreas que no sean urbanas, ya que en estas últimas existe un pequeño número de árboles y arbustos que vendrían a afectar en pequeña escala la señal.

Al hablar de follaje no solamente se debe considerar que se trata de una obstrucción de árboles, sino también dependerá de la humedad de estos, su forma, altura, densidad, etc, lo que hace que el proceso se complique aun más.

Los efectos de follaje son aplicables cuando se trabaja con frecuencias UHF o superiores y también influye el tipo de polarización de nuestra antena, es decir, si se trabaja con una polarización vertical u horizontal.

Las pérdidas causadas por el efecto follaje se han resumido en dos ecuaciones, y dependen directamente de la polarización:

$$L = 1637\sigma + \frac{\exp(-90/f) \log(1+f/10)}{2.99} \frac{dB}{m} \quad (\text{vertical}) \quad 4.1$$

$$L = 1637\sigma + \frac{\exp(-210/f) \log(1+f/200)}{2.34} \frac{dB}{m} \quad (\text{horizontal}) \quad 4.2$$

σ es la conductividad (siemens por metro) y f es la frecuencia en MHz.

Un árbol puede ser considerado como una colina difractora a distancias superiores a la altura del árbol más significativo superior a la antena transmisora.

Por estos efectos, es que en las planeaciones de cobertura se deja un margen de tolerancia de 10 dB la cual respaldará los efectos producidos por los árboles poco frondosos en invierno hasta su época frondosa en verano.

A continuación se presenta una tabla con valores de conductividad para diferentes tipos de follajes:

Tipo de Follaje	$\sigma(x10exp -5)$	
	Seco	Húmedo
árboles poco frondosos o ramas	0.5 - 1	2 - 10
árboles frondosos	1	5 - 20
Bosque	2 -5	5 -20
Vegetación baja	1 - 10	3 - 20
Selva muy densa	10 - 50	50

Tabla. 4.1. Conductividad de Varios tipos de Follaje

Orientación de Calles

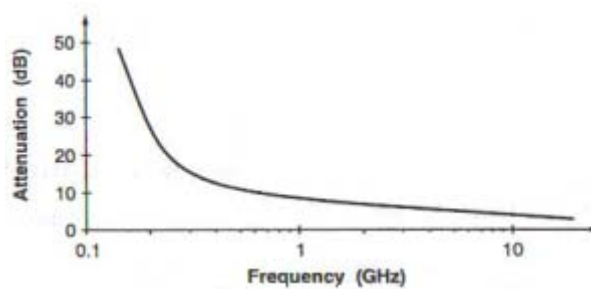
Este aspecto ya ha sido considerado en uno de los modelos anteriores; es Okumura quien incluye este factor debido a que en Tokio los edificios forman largas líneas rectas las cuales ayudan como guías de onda afectando a la dirección de propagación.

Se ha demostrado que un receptor móvil que se encuentra a lo largo de la calle recibe una potencia de 10 a 20 dB superiores a aquellos que se encuentren en calles perpendiculares de la radio base; el efecto de orientación es perceptible hasta los 2 Km a la redonda.

Túnel

El efecto túnel afecta en gran medida a las radio comunicaciones, puede reducirlas en un factor de 20 dB siendo esto muy grave ya que se trataría de una pérdida total de la señal de radio.

Este factor también depende de la frecuencia de trabajo, ya que también puede trabajar como guía de onda.

Figura. 4.1. Atenuación en un túnel [14]

Reudink llevó a cabo una investigación, en la cual medía desde los 300 metros el nivel de atenuación de la señal dentro del túnel y así hasta los 600 metros siguiendo la línea de vista; los resultados de dicha investigación se resumen en la Figura. 4.1.

CAPÍTULO V

DESARROLLO DEL SOFTWARE EN MATLAB

5.1 Consideraciones para el diseño del software

La herramienta a utilizar para la programación del software es Matlab versión 7.4a; las simulaciones se realizan con cuatro modelos: Okumura-Hata, El modelo de tierra Plana en el cual se utiliza el criterio de Bullington para el cálculo de pérdidas por difracción, el modelo de Walfish Ikegami más conocido como Cost 231 y por último el modelo ITU-R P.1546. Cabe anotar que el modelo de Walfish Ikegami es el utilizado por Telefónica Movistar para las ciudades en Ecuador en conjunto con Okumura-Hata.

El modelo de la formula de Hata no se lo ha considerado para este trabajo debido a que tanto los modelos de Costo 231 y el modelo de Okumura-Hata, utilizan dicha fórmula para sus cálculos. En el modelo de Okumura-Hata no se realiza ningún esquema de perfil, ya que este modelo solo trabaja con coeficientes por cada tipo de urbanización en la que se va a trabajar, por esta razón, los cálculos serán realizados para los tres tipos de ciudades: urbana pequeña, urbana mediana, y urbana grande. Para Walfish Ikegami se representa un esquema de perfil en donde se representara por medio de vectores la posición de los edificios y la distancia que existe entre ellos. En el modelo de tierra plana se representa un perfil completo con el número de obstáculos que se ingrese y el grafico de conexión considerando el modelo de Bullington. Y por último el modelo de la ITU-R P.1546, el cual refleja el resultado de la intensidad de campo y una grafica que indica el comportamiento de los diferentes parámetros en el enlace. La simulación de los modelos se las realizo con el fin de que en un siguiente proyecto, se puedan enlazar estos a una base de datos de coordenadas geográficas y así obtener una fiel representación del perfil de enlace.

5.2 Desarrollo del algoritmo de diseño del terreno

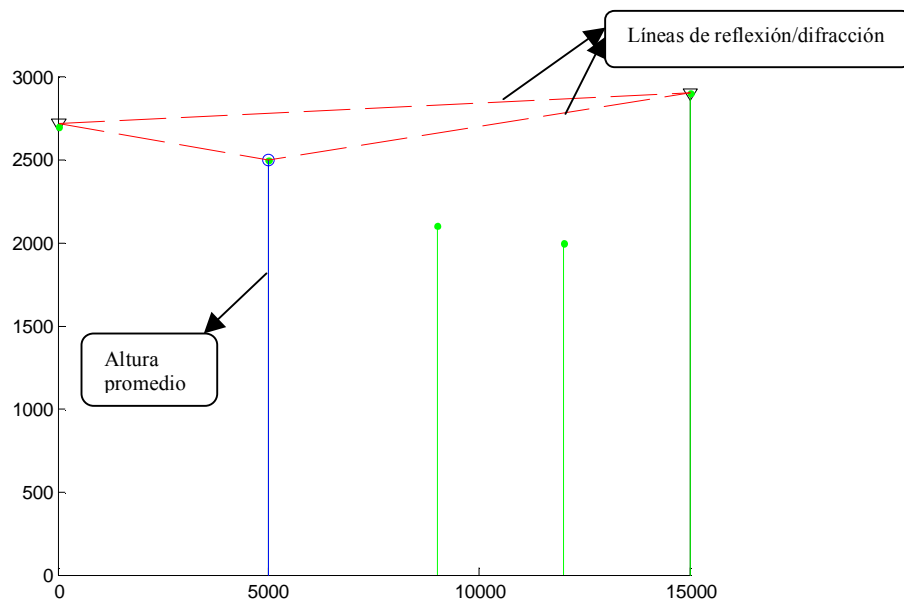
Los modelos que generan una simulación del terreno son, el modelo de tierra plana y el modelo de Walfish Ikegami.

En los dos casos, los obstáculos o edificios son representados por vectores, los cuales estarán posicionados de acuerdo a la distancia que se ha ingresado y con su altura respectiva.

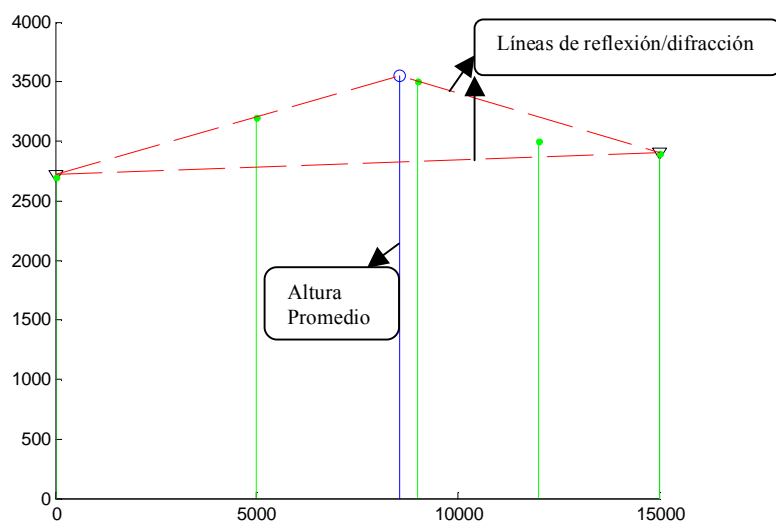
5.2.1 Diseño del terreno para modelo de Tierra Plana

A continuación se explicara cada detalle de la figura.

**Figura. 5.1. Diseño del terreno en modelo Tierra Plana
(Obstáculos menores a altura de antenas)**



**Figura. 5.2. Diseño del terreno en modelo Tierra Plana
(Obstáculos mayores a altura de antenas)**



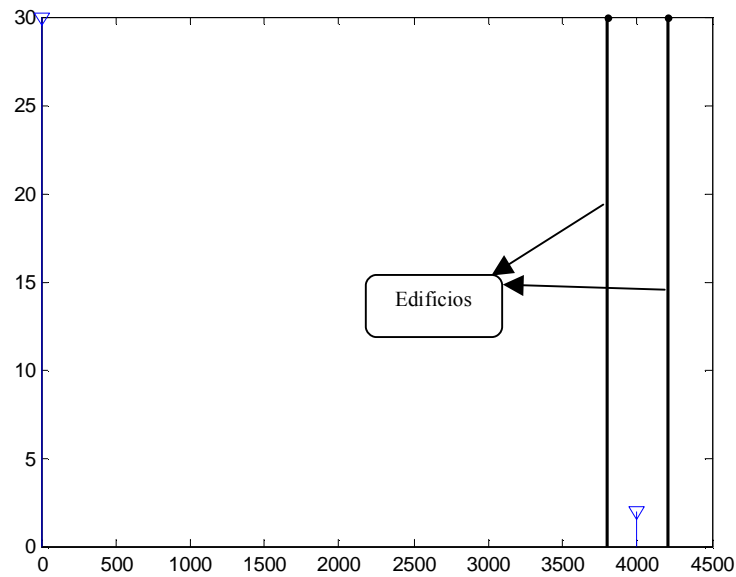
Como se puede observar en las figuras 5.1 y 5.2, tanto la antena transmisora como receptora se encuentran en los extremos de la ventana con las alturas que ingresa el usuario. Entre estas se encuentran representados los obstáculos por medio de vectores, según el modelo de Bullington, se debe encontrar la altura más significativa para el cálculo de las pérdidas por difracción y este vector de altura será caracterizado por su color azul.

Los demás obstáculos son representados por vectores de color verde. En el caso de la figura 5.1, uno de los obstáculos llega a ser el obstáculo de altura más significativa por lo que este se ve pintado de azul.

Para obtener el trazado de las líneas de reflexión/difracción, se considera el valor del ángulo formado por el Tx con respecto a cada uno de los obstáculos ingresados, por medio de un algoritmo se calcula que ángulo es el mayor y por ende que obstáculo posee mayor altura. De la misma forma se procede con la Rx. Una vez identificado el obstáculo con mayor altura que afecta la libre propagación tanto del lado del Tx como del Rx, se calcula el punto de encuentro entre las líneas que se formarían entre el Tx y su obstáculo mayor como del Rx con su obstáculo mayor, con esto calculamos la altura promedio que representa según Bullington el mismo efecto de reflexión/difracción que todos los obstáculos aportan.

5.2.2 Diseño del terreno para modelo Walfish-Ikegami

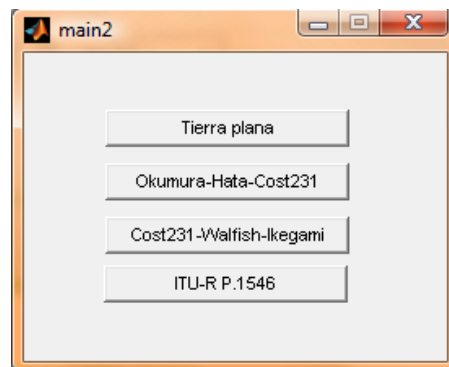
Similar al caso de Tierra Plana, la antena Tx se encuentra en el extremo izquierdo de la ventana, los edificios están representados por los dos vectores de color negro, y la pequeña antena Rx es la que se encuentra entre los edificios tal como lo indica la Figura 5.3.

Figura. 5.3. Diseño del terreno en modelo Walfish

El gráfico es nada más una representación, ya que no esclarece ningún cálculo como lo es en Tierra Plana, este solo nos da la idea de cómo están posicionados los datos que se han ingresado.

5.3 Selección del modelo apropiado para el cálculo de propagación

Según los parámetros obtenidos, Frecuencia, distancias, obstáculos, características especiales de urbe y más, se debe escoger el modelo idóneo para satisfacer los requerimientos. Para esto, se ha contemplado en un menú de inicio (Figura 5.4) los cuatro modelos de propagación.

Figura. 5.4. Menú de inicio para Selección de los Modelos de Propagación

5.3.1 Código Fuente de Menú Principal

```

function varargout = main2(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @main2_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @main2_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function main2_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = main2_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

    • Llamando a modelo Tierra Plana
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
tierra_plana

```

- Llamando a modelo Okumura Hata

`function` pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

okunura_hata

- Llamando a modelo Walfish Ikegami

`function` pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

walfish

- Llamando a modelo ITU-R P.1546

`function` pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

iturp1546

5.4 Cálculo de los parámetros de propagación

Cada modelo se basa en una formula diferente, debido a que poseen variaciones en los parámetros a considerar. Por ejemplo, para el modelo de Tierra Plana es suficiente saber alturas de Tx y Rx, obstáculos y las distancias entre Tx y Rx como de todos los obstáculos referidos a la antena transmisora; para Okumura se necesita nada mas las alturas de Tx y Rx y para Walfish deberemos especificar altura de edificios, distancia entre estos, ancho de las calles, y el ángulo de llegada a la calle.

En el caso del modelo de la recomendación ITU-R P.1546, necesita un parámetro extra a los otros modelos, que es el % de tiempo, este esta limitado a tres valores 1%, 10% y 50% al igual que la frecuencia que se encuentra limitada para los valores de 100MHz, 600MHz y 2000MHz.

A continuación se detallara el código fuente de cada modelo.

5.4.1 Código Fuente Tierra Plana para cálculos de propagación

`function` varargout = tierra_plana(varargin)

gui_Singleton = 1;

gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
 'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
 'gui_OpeningFcn', @tierra_plana_OpeningFcn, ...
 'gui_OutputFcn', @tierra_plana_OutputFcn, ...
 'gui_LayoutFcn', [], ...

```
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function tierra_plana_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = tierra_plana_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function s_htx_Callback(hObject, eventdata, handles)

function s_htx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_hrx_Callback(hObject, eventdata, handles)

function s_hrx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_f_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_f_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_d_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_ptx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_ptx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_gtx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_gtx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_grx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_grx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_hbtx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_hbtx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_hbrx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_hbrx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_h_o_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_h_o_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
```

```
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_d_o_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_d_o_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_ptx_o_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_ptx_o_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
h_o = str2num(get(handles.s_h_o,'String'));
d_o = str2num(get(handles.s_d_o,'String'));
htx = str2double(get(handles.s_htx,'String'));
hrx = str2double(get(handles.s_hrx,'String'));
f = str2double(get(handles.s_f,'String'));
d = str2double(get(handles.s_d,'String'));
ptx = str2double(get(handles.s_ptx,'String'));
gtx = str2double(get(handles.s_gtx,'String'));
grx = str2double(get(handles.s_grx,'String'));
hbtx = str2double(get(handles.s_hbtx,'String'));
hbrx = str2double(get(handles.s_hbrx,'String'));
if isempty(h_o) | isempty(d_o) ...
    | isnan([htx,hrx,f,d,ptx,gtx,hbtx,hbrx])
    error_data
```



```
else
```

```
    d_o = 1000*d_o;
```

```
    d = 1000*d;
```

```
    lambda = 300/f;
```

```
    htx = htx + hbtx;
```

```
    hrx = hrx + hbrx;
```

```
    if (h_o == 0) & (d_o == 0)
```

```
        d_o = (hrx/(htx + hrx))*d;
```

```
    end
```

```
    if (length(h_o) == length(d_o)) & (max(d_o) < d)
```

```
        tg_tx = (h_o - htx)./d_o;
```

```
        tg_rx = (h_o - hrx)./(d - d_o);
```

```
        [m_tx,i] = max(tg_tx);
```

```
        [m_rx,j] = max(tg_rx);
```

```
        if ((i > j) && (hrx > htx))
```

```
            x0 = d_o(i);
```

```
            hm = h_o(i);
```

```
        else
```

```
            m_rx = -m_rx;
```

```
            A = [1,-m_tx;1,-m_rx];
```

```
            b = [htx;hrx-m_rx*d];
```

```
            y = (inv(A)*b)';
```

```
            x0 = y(2);
```

```
            hm = y(1);
```

```
        end
```

```
        dr = sqrt(d^2 + (htx - hrx)^2);
```

```
        dh = htx - hrx;
```

```
        h1 = htx - (x0/d)*dh;
```

```
        h = hm - h1;
```

```
        d1 = (x0/d)*dr;
```

```
        d2 = dr - d1;
```

```
        x = -h*sqrt(2*(d1 + d2)/(lambda*d1*d2));
```

```

sin_u = @(u)sin(0.5*pi*(u.^2));
cos_u = @(u)cos(0.5*pi*(u.^2));
Sx = quad(sin_u,0,x,0.001);
Cx = quad(cos_u,0,x,0.001);
dfi = atan((Sx + 0.5)/(Cx + 0.5));
F = (Sx + 0.5)/(sqrt(2)*sin(dfi));
L = -20*log10(abs(F));
Prx = ptx + gtx + grx + 30 - L;
set(handles.s_L,'String',num2str(L));
set(handles.s_Prx,'String',num2str(Prx));
figure()
hold on
stem(d_o,h_o,'g.')
stem([0 d],[htx hrx],'kv')
stem([0 d],[hbtx hbrx],'g.')
stem(x0,hm)
plot([0,x0,d],[htx,hm,hrx],'--r')
plot([0,d],[htx,hrx],'--r')
hold off
end
end

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.s_h_o,'String','[0]');
set(handles.s_d_o,'String','[0]');
set(handles.s_L,'String','0');
set(handles.s_Prx,'String','0');

function s_L_Callback(hObject, eventdata, handles)

function s_L_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_Prx_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

function s_Prx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

5.4.2 Código Fuente Okumura_Hata para cálculos de propagación

```

function varargout = okunura_hata(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @okunura_hata_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @okunura_hata_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

```

```
% --- Executes just before okunura_hata is made visible.
function okunura_hata_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function vararginout = okunura_hata_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function s_ht_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_ht_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_hm_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_hm_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_d_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function s_f_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

function s_f_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.

```

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
ht = str2double(get(handles.s_ht,'String'));
hm = str2double(get(handles.s_hm,'String'));
d = str2double(get(handles.s_d,'String'));
f = str2double(get(handles.s_f,'String'));
ptx = str2double(get(handles.s_ptx,'String'));
gtx = str2double(get(handles.s_gtx,'String'));
grx = str2double(get(handles.s_grx,'String'));

```

```

if isfinite([ht,hm,d,f,ptx,grx,grx])

```

```

    if (f>=150) && (f<=2000) && (ht>=30) && (ht<=200) && (hm>=1) && (hm<=10)...
        && (d>=1) && (d<=20)
            Lb = 69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(ht) + ...

```

```

(44.9 - 6.55*log10(ht))*log10(d);
cp_ahm = (1.1*log10(f) - 0.7)*hm - (1.56*log10(f) - 0.8);

if (f>150) && (f<=200)
    cg_ahm = 8.29*(log10(1.54*hm))^2 - 1.1;
elseif (f>200) && (f<400)
    cg_ahm = 0;
elseif (f>=400)
    cg_ahm = 3.2*(log10(11.75*hm))^2 - 4.97;
    if f>1500
        Lb = Lb + 3;
    end
end

cp_au = Lb - cp_ahm;
as1 = 2*(log10(f/28))^2 + 5.4;
ar1 = 4.78*(log10(f))^2 - 18.33*log10(f) + 40.94;
as = Lb - as1;
ar = Lb - ar1;
cg_au = Lb - cg_ahm;
p1 = ptx + gtx + grx + 30;
p_cp_au = p1 - cp_au;
p_cg_au = p1 - cg_au;
p_as = p1 - as;
p_ar = p1 - ar;
set(handles.s_cp_au,'String',num2str(cp_au))
set(handles.s_as,'String',num2str(as))
set(handles.s_ar,'String',num2str(ar))
set(handles.s_cg_au,'String',num2str(cg_au))
set(handles.s_p_cp_au,'String',num2str(p_cp_au))
set(handles.s_p_as,'String',num2str(p_as))
set(handles.s_p_ar,'String',num2str(p_ar))

```

```

set(handles.s_p_cg_au,'String',num2str(p_cg_au))
d1 = 1:0.01:20;
n = length(d1);
Lb1 = 69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(ht);
if f>1500
    Lb1 = Lb1 + 3;
end
Lb2 = Lb1 - cp_ahm;
Lb3 = Lb1 - cg_ahm;
Lb4 = Lb1 - as1;
Lb5 = Lb1 - ar1;
for i = 1:n
    Lbd = (44.9 - 6.55*log10(ht))*log10(d1(i));
    Lb_cp(i) = Lb2 + Lbd;
    Lb_cg(i) = Lb3 + Lbd;
    Lb_as(i) = Lb4 + Lbd;
    Lb_ar(i) = Lb5 + Lbd;
end
figure()
plot(d1,Lb_cp,d1,Lb_cg,d1,Lb_as,d1,Lb_ar)
grid
legend('Ciudad pequeña','Ciudad grande','Área suburbana','Área
rural','Location','NorthWest')
else
    error_rango
end
else
    error_data
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_cp_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_as_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_as_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_ar_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_ar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_cg_au_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_cg_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```



```
function s_cg_as_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_cg_as_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
function s_cg_ar_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_cg_ar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
function s_ptx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_ptx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
function s_gtx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_gtx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_grx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_grx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

```
function s_prx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_prx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

end

% --- Executes on button press in pushbutton1.

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(handles.s_ht,'String','30 - 200')
```

```
set(handles.s_hm,'String','3 - 10')
```

```
set(handles.s_d,'String','1 - 20')
```

```
set(handles.s_f,'String','150 - 2000')
```

```
set(handles.s_ptx,'String','0')
```

```
set(handles.s_gtx,'String','0')
```

```
set(handles.s_grx,'String','0')
```

```
function s_p_cp_au_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_p_cp_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_p_as_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function s_p_as_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_p_ar_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_p_ar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_p_cg_au_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_p_cg_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

5.4.3 Código Fuente Walfish-Ikegami para cálculos de propagación

```

function varargout = walfish(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @walfish_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @walfish_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% --- Executes just before walfish is made visible.
function walfish_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = walfish_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function s_hr_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_hr_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_hb_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_hb_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_hm_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_hm_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function s_f_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_f_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_d_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_b_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_b_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_w_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_w_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_fi_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_fi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

% --- Executes on button press in pushbutton2.

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
hr = str2double(get(handles.s_hr,'String'));
hb = str2double(get(handles.s_hb,'String'));
hm = str2double(get(handles.s_hm,'String'));
f = str2double(get(handles.s_f,'String'));
d = str2double(get(handles.s_d,'String'));
b = str2double(get(handles.s_b,'String'));
w = str2double(get(handles.s_w,'String'));
fi = str2double(get(handles.s_fi,'String'));
ptx = str2double(get(handles.s_ptx,'String'));
gtx = str2double(get(handles.s_gtx,'String'));
grx = str2double(get(handles.s_grx,'String'));
% if isfinite(hr) && isfinite(hb) && isfinite(hm) && isfinite(f)
if isfinite([hr,hb,hm,f,d,b,w,fi,ptx,gtx,grx])
    dhb = hb - hr;
    dhr = hr - hm;
    if (f>=800) && (f<=2000) && (d>=0.02) && (d<=5) && (hb>=4) && (hb<=50)...
        && (hm>=1) && (hm<=3) && (fi>0) && (fi<=90) && (b>w)
            Lbf = 32.45 + 20*log10(f) + 20*log10(d);

            if (fi>0) && (fi<35)
                Lori = -10 + 0.354*fi;
            elseif (fi>=35) && (fi<55)
                Lori = 2.5 + 0.075*(fi-35);
```

```
else
    Lori = 4 - 0.114*(fi-55);
end
Lrts = -8.2 - 10*log10(w) + 10*log10(f) + 20*log10(dhr) + Lori;
if Lrts<0
    Lrts = 0;
end

if dhb<0
    Lbsh = 0;
    kd = 18 - 15*dhb/hr;
else
    Lbsh = -18*log10(1 + dhb);
    kd = 18;
end

if dhb>=0
    ka = 54;
else
    if d>=0.5
        ka = 54 - 0.8*dhb;
    else
        ka = 54 - 0.8*dhb*d/0.5;
    end
end

kf_cp = -4 + 0.7*((f/925) - 1);
kf_cg = -4 + 1.5*((f/925) - 1);
Lmsd_cp = Lbsh + ka + kd*log10(d) + kf_cp*log10(f) - 9*log10(b);
Lmsd_cg = Lbsh + ka + kd*log10(d) + kf_cg*log10(f) - 9*log10(b);
L_cp = Lbf + Lrts + Lmsd_cp;
L_cg = Lbf + Lrts + Lmsd_cg;
p1 = ptx + gtx + grx + 30;
```



```

P_cp = p1 - L_cp;
P_cg = p1 - L_cg;
set(handles.s_Lcp,'String',num2str(L_cp));
set(handles.s_Lcg,'String',num2str(L_cg));
set(handles.s_Pcp,'String',num2str(P_cp));
set(handles.s_Pcg,'String',num2str(P_cg));
antenas = [hb hm];
d1 = [0 d*1000];
edificios = [hr hr];
d2 = [d*950 d*1050];
figure()
stem(d1,antenas,'v')
hold on
stem(d2,edificios,'k','LineWidth',2)
hold off
else
    error_rango
end
else
    error_data
end

function s_Lcp_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_Lcp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```
function s_Lcg_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_Lcg_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function s_ptx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_ptx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function s_gtx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_gtx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```
end
```

```
function s_grx_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function s_grx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

set(handles.s_hr,'String','0');
set(handles.s_hb,'String','4 - 50');
set(handles.s_hm,'String','1 - 3');
set(handles.s_f,'String','800 - 2000');
set(handles.s_d,'String','0.02 - 5');
set(handles.s_b,'String','0');
set(handles.s_w,'String','0');
set(handles.s_fi,'String','0 - 90');
set(handles.s_ptx,'String','0');
set(handles.s_gtx,'String','0');
set(handles.s_grx,'String','0');

```

```
function s_Pcp_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_Pcp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```
function s_Pcg_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```
function s_Pcg_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

5.4.4 Código Fuente ITU-R P.1546 para cálculos de propagación

```

function varargout = iturp1546(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @iturp1546_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @iturp1546_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before iturp1546 is made visible.
function iturp1546_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = iturp1546_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function s_ht_Callback(hObject, eventdata, handles)
function s_ht_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_hm_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_hm_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_d_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_d_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_f_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_f_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
ht = str2double(get(handles.s_ht,'String'));
d = str2double(get(handles.s_d,'String'));
f = str2double(get(handles.s_f,'String'));
ptx = str2double(get(handles.s_ptx,'String'));
T = str2double(get(handles.T,'String'));

if isfinite([ht,d,f,ptx,T])

    if ((f==100)|(f==2000)|(f==600)) && (ht>=10) && (ht<=2000) && (d>=1) &&
(d<=30)...
        &&((T==10)|(T==50)|(T==1))
            Efs = 106.9-20*log10(d);

        %llenado de matriz con % de tiempo y de frecuencia

        a=zeros(11,2000,60);

```

```
b=zeros(11,2000,60);  
c=zeros(11,2000,60);  
D=zeros(11,2000,60);
```

%lenado de matriz a0

```
a(10,100,50)=0.0814;  
a(10,100,10)=0.0814;  
a(10,100,1)=0.0776;  
a(10,600,50)=0.0946;  
a(10,600,10)=0.0913;  
a(10,600,1)=0.0870;  
a(10,2000,50)=0.0945;  
a(10,2000,10)=0.0941;  
a(10,2000,1)=0.0918;
```

%lenado de matriz a1

```
a(1,100,50)=0.761;  
a(1,100,10)=0.761;  
a(1,100,1)=0.726;  
a(1,600,50)=0.8849;  
a(1,600,10)=0.8539;  
a(1,600,1)=0.8141;  
a(1,2000,50)=0.8849;  
a(1,2000,10)=0.8805;  
a(1,2000,1)=0.8584;
```

%lenado de matriz a2

```
a(2,100,50)=-30.444;  
a(2,100,10)=-30.444;  
a(2,100,1)=-29.028;  
a(2,600,50)=-35.399;  
a(2,600,10)=-34.160;  
a(2,600,1)=-32.567;  
a(2,2000,50)=-35.399;  
a(2,2000,10)=-35.222;  
a(2,2000,1)=-34.337;
```

%lenado de matriz a3

```
a(3,100,50)=90.226;  
a(3,100,10)=90.226;  
a(3,100,1)=90.226;  
a(3,600,50)=92.778;  
a(3,600,10)=92.778;  
a(3,600,1)=92.778;  
a(3,2000,50)=94.493;  
a(3,2000,10)=94.493;  
a(3,2000,1)=94.493;
```

%llenado de matriz b0

```
b(10,100,50)=33.6238;  
b(10,100,10)=40.4554;  
b(10,100,1)=45.577;  
b(10,600,50)=51.6386;  
b(10,600,10)=35.3453;  
b(10,600,1)=36.8836;  
b(10,2000,50)=30.0051;  
b(10,2000,10)=25.0641;  
b(10,2000,1)=31.3878;
```

%llenado de matriz b1

```
b(1,100,50)=10.8917;  
b(1,100,10)=12.8206;  
b(1,100,1)=14.6752;  
b(1,600,50)=10.9877;  
b(1,600,10)=15.7595;  
b(1,600,1)=13.8843;  
b(1,2000,50)=15.4202;  
b(1,2000,10)=22.1011;  
b(1,2000,1)=15.6683;
```

%llenado de matriz b2

```
b(2,100,50)=2.3311;  
b(2,100,10)=2.2048;  
b(2,100,1)=2.2333;  
b(2,600,50)=2.2113;  
b(2,600,10)=2.2252;  
b(2,600,1)=2.3469;  
b(2,2000,50)=2.2978;  
b(2,2000,10)=2.3183;  
b(2,2000,1)=2.3941;
```

%llenado de matriz b3

```
b(3,100,50)=0.4427;  
b(3,100,10)=0.4761;  
b(3,100,1)=0.5439;  
b(3,600,50)=0.5384;  
b(3,600,10)=0.5285;  
b(3,600,1)=0.5246;  
b(3,2000,50)=0.4971;  
b(3,2000,10)=0.5636;  
b(3,2000,1)=0.5633;
```

%llenado de matriz b4

```
b(4,100,50)=1.256*10^-7;  
b(4,100,10)=7.788*10^-7;  
b(4,100,1)=1.050*10^-6;  
b(4,600,50)=4.323*10^-6;  
b(4,600,10)=1.704*10^-7;  
b(4,600,1)=5.169*10^-7;  
b(4,2000,50)=1.677*10^-7;  
b(4,2000,10)=3.126*10^-8;  
b(4,2000,1)=1.439*10^-7;
```

%llenado de matriz b5

```
b(5,100,50)=1.775;  
b(5,100,10)=1.68;  
b(5,100,1)=1.65;  
b(5,600,50)=1.52;  
b(5,600,10)=1.76;  
b(5,600,1)=1.69;  
b(5,2000,50)=1.762;  
b(5,2000,10)=1.86;  
b(5,2000,1)=1.77;
```

%llenado de matriz b6

```
b(6,100,50)=49.39;  
b(6,100,10)=41.78;  
b(6,100,1)=38.02;  
b(6,600,50)=49.52;  
b(6,600,10)=49.06;  
b(6,600,1)=46.5;  
b(6,2000,50)=55.21;  
b(6,2000,10)=54.39;  
b(6,2000,1)=49.18;
```

%llenado de matriz b7

```
b(7,100,50)=103.01;  
b(7,100,10)=94.3;  
b(7,100,1)=91.77;  
b(7,600,50)=97.28;  
b(7,600,10)=98.93;  
b(7,600,1)=101.59;  
b(7,2000,50)=101.89;  
b(7,2000,10)=101.39;  
b(7,2000,1)=100.39;
```

%llenado matriz c0


```
c(10,100,50)=5.4419;  
c(10,100,10)=5.4877;  
c(10,100,1)=4.7697;  
c(10,600,50)=6.4701;  
c(10,600,10)=5.8636;  
c(10,600,1)=4.7453;  
c(10,2000,50)=6.9657;  
c(10,2000,10)=6.5809;  
c(10,2000,1)=6.0398;
```

%llenado matriz c1

```
c(1,100,50)=3.7364;  
c(1,100,10)=2.4673;  
c(1,100,1)=2.7487;  
c(1,600,50)=2.9820;  
c(1,600,10)=3.0122;  
c(1,600,1)=2.9581;  
c(1,2000,50)=3.6532;  
c(1,2000,10)=3.547;  
c(1,2000,1)=2.5951;
```

%llenado matriz c2

```
c(2,100,50)=1.9457;  
c(2,100,10)=1.7566;  
c(2,100,1)=1.6797;  
c(2,600,50)=1.7604;  
c(2,600,10)=1.7335;  
c(2,600,1)=1.9286;  
c(2,2000,50)=1.7658;  
c(2,2000,10)=1.7750;  
c(2,2000,1)=1.9153;
```

%llenado matriz c3

```
c(3,100,50)=1.845;  
c(3,100,10)=1.9104;  
c(3,100,1)=1.8793;  
c(3,600,50)=1.7508;  
c(3,600,10)=1.7452;  
c(3,600,1)=1.7378;  
c(3,2000,50)=1.6268;  
c(3,2000,10)=1.7321;  
c(3,2000,1)=1.6542;
```

%llenado matriz c4

```
c(4,100,50)=415.91;  
c(4,100,10)=510.08;  
c(4,100,1)=343.24;  
c(4,600,50)=198.33;  
c(4,600,10)=216.91;  
c(4,600,1)=247.68;  
c(4,2000,50)=114.39;  
c(4,2000,10)=219.54;  
c(4,2000,1)=186.67;
```

%llenado matriz c5

```
c(5,100,50)=0.1128;  
c(5,100,10)=0.1622;  
c(5,100,1)=0.2642;  
c(5,600,50)=0.1432;  
c(5,600,10)=0.1690;  
c(5,600,1)=0.1842;  
c(5,2000,50)=0.1309;  
c(5,2000,10)=0.1704;  
c(5,2000,1)=0.1019;
```

%llenado matriz c6

```
c(6,100,50)=2.3538;  
c(6,100,10)=2.1963;  
c(6,100,1)=1.9549;  
c(6,600,50)=2.2690;  
c(6,600,10)=2.1985;  
c(6,600,1)=2.0873;  
c(6,2000,50)=2.3286;  
c(6,2000,10)=2.1977;  
c(6,2000,1)=2.3954;
```

%llenado de la matriz D0

```
D(10,100,50)=10;  
D(10,100,10)=5.5;  
D(10,100,1)=3;  
D(10,600,50)=5;  
D(10,600,10)=5;  
D(10,600,1)=8;  
D(10,2000,50)=8;  
D(10,2000,10)=8;  
D(10,2000,1)=8;
```

```
%llenado de la matriz D1
```

```
D(1,100,50)=-1;
D(1,100,10)=1;
D(1,100,1)=2;
D(1,600,50)=1.2;
D(1,600,10)=1.2;
D(1,600,1)=0;
D(1,2000,50)=0;
D(1,2000,10)=0;
D(1,2000,1)=0;
% Fin de llenado de matrices
```

```
% calculo de la intensidad de campo
```

```
seta = log10(d).^b(5,f,T);
k = log10(ht/9.375)/log10(2);
pb = D(10,f,T)+D(1,f,T)*sqrt(k);
pbb = 8;

E1 = (a(10,f,T)*k.^2 + a(1,f,T)*k + a(2,f,T)) * log10(d) + 0.1995*k.^2 + 1.8671*k +
a(3,f,T);

Eref = b(10,f,T)*(exp(-b(4,f,T)*10.^seta)-1) + b(1,f,T)*exp(-((log10(d)-
b(2,f,T))/b(3,f,T)).^2) - b(6,f,T)*log10(d) + b(7,f,T);

Eoff = c(10,f,T)/2*k.*(1-tanh(c(1,f,T)*(log10(d)-c(2,f,T)-((c(3,f,T).^k)/c(4,f,T)))) +
c(5,f,T)*k.^c(6,f,T);

E2 = Eref+Eoff;

Eu = pb.*log10((10.^((E1+E2)./pb))./(10.^(E1./pb)+10.^(E2./pb)));

% Modificeret (41), hvor ERP korrigeres og FS_offset trækkes fra.
Eb = pbb*log10(10.^((Eu+Efs)./pbb))./(10.^(Eu/pbb)+10.^(Efs/pbb)) + dBkW(ptx);

set(handles.intensidad,'String',num2str(Eb));
```

```
%Grafico de resultados
```

```
d=logspace(0,4);
valmax=106.9-20*log10(d);

figure(1);
semilogx(d,valmax,'g-');
hold on
grid on
```

```

seta = log10(d).^b(5,f,T);
k = log10(ht/9.375)/log10(2);
pb = D(10,f,T)+D(1,f,T)*sqrt(k);
pbb = 8;

E1 = (a(10,f,T)*k.^2 + a(1,f,T)*k + a(2,f,T)) * log10(d) + 0.1995*k.^2 + 1.8671*k +
a(3,f,T);

Eref = b(10,f,T)*(exp(-b(4,f,T)*10.^seta)-1) + b(1,f,T)*exp(-((log10(d)-
b(2,f,T))/b(3,f,T)).^2) - b(6,f,T)*log10(d) + b(7,f,T);

Eoff = c(10,f,T)/2*k.*(1-tanh(c(1,f,T)*(log10(d)-c(2,f,T)-((c(3,f,T).^k)/c(4,f,T)))))) +
c(5,f,T)*k.^c(6,f,T);

E2 = Eref+Eoff;

Eu = pb.*log10((10.^((E1+E2)./pb))./(10.^(E1./pb)+10.^(E2./pb)));

% Modificeret (41), hvor ERP korrigeres og FS_offset trækkes fra.
Ebttotal = pbb*log10(10.^((Eu+Efs)./pbb))./(10.^(Eu/pbb)+10.^(Efs/pbb))) + dBkW(ptx);

for i = 1:length(d)
    if Ebttotal(i)>valmax(i)
        Ebttotal(i)=valmax(i);
    end
end

semilogx(d,Ebttotal,'b');

hold off
title(['ITU-R P.1546 Intensidad de Campo']);
xlabel('d [km]');
ylabel('E intensidad de campo [dBμV/m]')
legend('Valor Maximo de E', 'Intensidad de Campo')
% fin de grafico

else
    error_rango
end
else
    error_data
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function intensidad_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_as_Callback(hObject, eventdata, handles)
function s_as_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_ar_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_ar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_cg_au_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_cg_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_cg_as_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_cg_as_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_cg_ar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_cg_ar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_ptx_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_ptx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_gtx_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_gtx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_grx_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_grx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function s_prx_Callback(hObject, eventdata, handles)
function s_prx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

set(handles.s_ht,'String','10 - 2000')
set(handles.s_d,'String','1 - 30')
set(handles.s_f,'String','100,600,2000')
set(handles.T,'String','1-10-50')
set(handles.s_ptx,'String','0')

```

```

function s_p_cp_au_Callback(hObject, eventdata, handles)
function s_p_cp_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function s_p_as_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_p_as_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s_p_ar_Callback(hObject, eventdata, handles)
function s_p_ar_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function s_p_cg_au_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s_p_cg_au_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function T_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function intensidad_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

5.5 Pruebas de evaluación de los programas

5.5.1 Okumura-Hata

El primer programa a comparar será el de Okumura-Hata, el software desarrollado se comparara con los resultados entregados en un programa de la Web. Cabe considerar que el programa de la Web tal como se identificara en las siguientes imágenes no toma en cuenta todos los parámetros que se consideran en la herramienta utilizada.

Figura. 5.5. Cálculos de las pérdidas por trayectoria para ambiente Urbano Con el modelo Okumura-Hata para frecuencia de 150 MHz y distancia 1 Km

The screenshot shows a software window titled 'Urbano' with the following sections:

- Selección de Frecuencia de Operación:** Two radio buttons are present. The first, '150 MHz <= F < 1500 MHz', is selected. The second is '1500 MHz <= F <= 2000 MHz'.
- Completar los siguientes datos:** Four input fields:
 - a) Altura de la Antena del móvil (1 <= H <= 10 m.): 10 metros
 - b) Altura efectiva de la Antena de la Base: 5 metros
 - c) Distancia entre la Base y el Móvil (1 <= H <= 20 Km.): 1 Km
 - d) Frecuencia de Operación: 150 MHz
- Calculo de Pérdidas por Trayectoria:** Contains 'Calcular' and 'Borrar Datos' buttons. A text box labeled 'Lp' displays the result '102.474480391487 dB', which is circled in red.

Ahora compararemos el resultado con el software desarrollado.

Figura. 5.6. Calculo utilizando el software desarrollado de Okumura-Hata

The screenshot shows a software window titled 'Okumura-Hata-Cost231' with the following sections:

Datos Enlace

Altura de la antena transmisora [m]:	30
Altura de la antena receptora [m]:	2
Distancia entre las antenas [km]:	1
Frecuencia de operación [Mhz]:	150
Potencia de transmisión [dBw]:	0
Ganancia de la antena transmisora [dB]:	0
Ganancia de la antena receptora [dB]:	0

Buttons: 'Calcular', 'Reset'

Resultados

Pérdidas

Área urbana ciudad pequeña [dB]:	105.27
Área urbana ciudad grande [dB]:	105.1841
Área suburbana [dB]:	69.6
Área rural [dB]:	62.3754

Potencias de Recepción

Área urbana ciudad pequeña [dBW]:	-75.27
Área urbana ciudad grande [dBW]:	-75.1841
Área suburbana [dBW]:	-69.6
Área rural [dBW]:	-52.3754

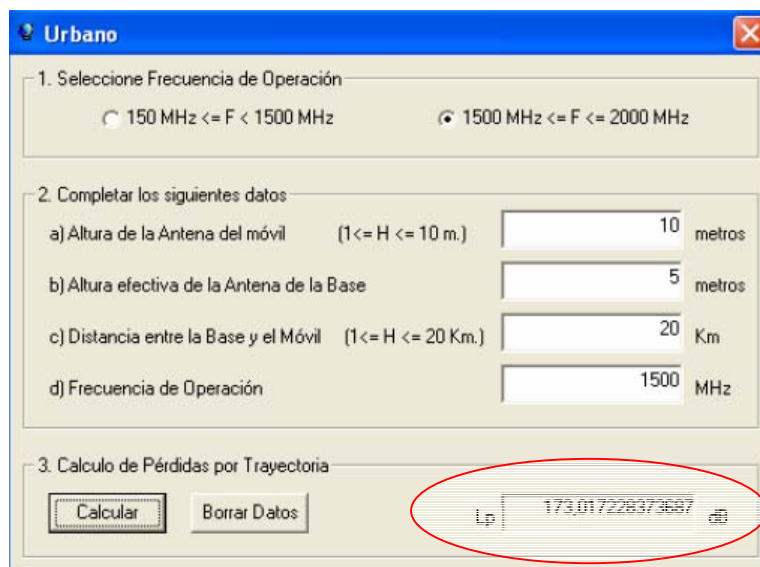
The 'Pérdidas' table is circled in red.

Como se puede observar, los valores calculados por el software desarrollado son semejantes al comparado. Hay que tomar en cuenta que los parámetros considerados en la herramienta desarrollada son más numerosos que los del comparado, por ende el valor de pérdidas debe variar.

Un parámetro que no podemos igualar al del software de la Web es la altura del Tx, debido a que nuestro modelo restringe este valor en un rango de 30 a 50 metros y no podemos ingresar el dato de 15 metros para Tx.

Ahora realizaremos el mismo análisis para distinta frecuencia y distancia.

Figura. 5.7. Cálculos de las pérdidas por trayectoria para ambiente Urbano Con el modelo Okumura-Hata para frecuencia de 1500 MHz y distancia 20 Km



The screenshot shows a software window titled "Urbano" with a blue header and a close button. It contains three sections:

- 1. Seleccione Frecuencia de Operación:** Two radio buttons are present. The first is "150 MHz <= F < 1500 MHz" and the second is "1500 MHz <= F <= 2000 MHz", which is selected.
- 2. Completar los siguientes datos:** Four input fields with labels and units:
 - a) Altura de la Antena del móvil (1 <= H <= 10 m.): 10 metros
 - b) Altura efectiva de la Antena de la Base: 5 metros
 - c) Distancia entre la Base y el Móvil (1 <= H <= 20 Km.): 20 Km
 - d) Frecuencia de Operación: 1500 MHz
- 3. Calculo de Pérdidas por Trayectoria:** Two buttons, "Calcular" and "Borrar Datos", are on the left. On the right, a text box labeled "Lp" contains the value "173,017228373687" and is circled in red.

De igual manera realizaremos el cálculo con los parámetros principales de frecuencia y distancia con la herramienta desarrollada.

Figura. 5.8. Calculo utilizando el software desarrollado de Okumura-Hata

Okumura-Hata-Cost231

Datos Enlace

Altura de la antena transmisora [m]:	30
Altura de la antena receptora [m]:	2
Distancia entre las antenas [km]:	20
Frecuencia de operación [Mhz]:	1500
Potencia de transmisión [dBw]:	0
Ganancia de la antena transmisora [dB]:	0
Ganancia de la antena receptora [dB]:	0

Calcular Reset

Resultados

Pérdidas

Área urbana ciudad pequeña [dB]:	179.6186
Área urbana ciudad grande [dB]:	160.0059
Área suburbana [dB]:	139.6729
Área rural [dB]:	120.1106

Potencias de Recepción

Área urbana ciudad pequeña [dBW]:	-149.6186
Área urbana ciudad grande [dBW]:	-150.0059
Área suburbana [dBW]:	-139.6729
Área rural [dBW]:	-120.1106

De igual manera existe una diferencia en los resultados aproximadamente un 3% de diferencia, ahora el problema estaría en comprobar cuál de las dos herramientas posee el valor más cercano a la realidad.

5.5.2 Walfish-Ikegami

En base al mismo software utilizado en la comparación para Okumura-Hata realizaremos las pruebas para el modelo de Walfish-Ikegami. En la figura 5.9, se puede observar los resultados que arroja el software de la web, y de enseguida se notara que en este no se considera un aspecto que en la herramienta desarrollada indicada en la figura 5.10 es de mucha importancia, este es el ancho de la calle. Para poder coincidir con los datos, se ingresara a la herramienta el valor de 0.001 m para el ancho de las calles queriendo en lo posible anular este valor que no es considerado por el otro software.

Figura. 5.9. Calculo de las pérdidas por trayectoria
Con el modelo Walfish-Ikegami para frecuencia de 800 MHz y ángulo de 45

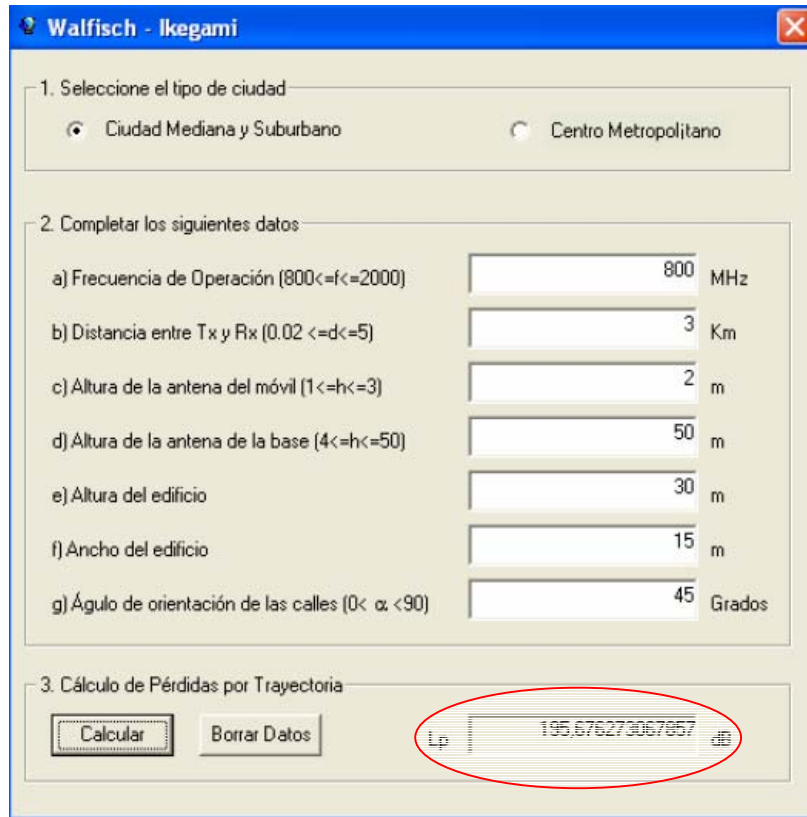
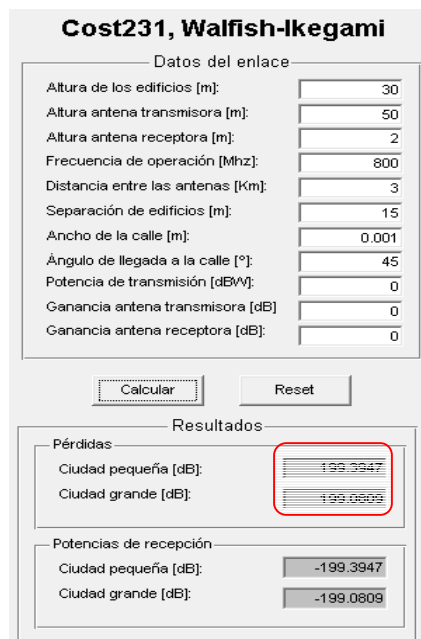


Figura. 5.10. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami en 800 MHz



Similar al caso de Okumura-Hata, se puede observar que la diferencia entre los valores es de un 3%, ahora el hecho de no considerar el ancho de la calle se lo hizo únicamente para coincidir con los valores ingresados en el otro software. Enseguida se observa el cálculo considerando el ancho de la calle estándar de 8 metros.

**Figura. 5.11. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami
Se considera el ancho de la calle**

The screenshot shows a software interface titled "Cost231, Walfish-Ikegami". It is divided into two main sections: "Datos del enlace" (Link Data) and "Resultados" (Results).

Datos del enlace:

Altura de los edificios [m]:	30
Altura antena transmisora [m]:	50
Altura antena receptora [m]:	2
Frecuencia de operación [Mhz]:	800
Distancia entre las antenas [Km]:	3
Separación de edificios [m]:	15
Ancho de la calle [m]:	8
Ángulo de llegada a la calle [°]:	45
Potencia de transmisión [dBW]:	0
Ganancia antena transmisora [dB]:	0
Ganancia antena receptora [dB]:	0

Buttons: "Calcular" (Calculate) and "Reset".

Resultados:

Pérdidas:	
Ciudad pequeña [dB]:	160.3638
Ciudad grande [dB]:	160.05
Potencias de recepción:	
Ciudad pequeña [dB]:	-160.3638
Ciudad grande [dB]:	-160.05

En este cálculo se puede observar que las pérdidas disminuyen y eso se da debido a que mientras exista una especie de guía o un efecto de túnel para las ondas, estas se propagaran con menos pérdidas ya que se centralizan en el canal limitado.

**Figura. 5.12. Calculo de las pérdidas por trayectoria
Con el modelo Walfish-Ikegami para frecuencia de 1000 MHz y ángulo de 90**

The screenshot shows the 'Walfisch - Ikegami' software window. It is divided into three main sections:

- 1. Seleccione el tipo de ciudad:** Two radio buttons are present: 'Ciudad Mediana y Suburbano' (unselected) and 'Centro Metropolitano' (selected).
- 2. Completar los siguientes datos:** A list of seven input fields:
 - a) Frecuencia de Operación (800<=f<=2000): 1000 MHz
 - b) Distancia entre Tx y Rx (0.02 <=d<=5): 5 Km
 - c) Altura de la antena del móvil (1 <=h<=3): 2 m
 - d) Altura de la antena de la base (4 <=h<=50): 50 m
 - e) Altura del edificio: 50 m
 - f) Ancho del edificio: 20 m
 - g) Ángulo de orientación de las calles (0 <= α <= 90): 90 Grados
- 3. Cálculo de Pérdidas por Trayectoria:** Contains 'Calcular' and 'Borrar Datos' buttons. Below them is a text box labeled 'Lp' containing the value '243.064353304673 dB', which is circled in red.

Para el cálculo con la herramienta desarrollada, de igual manera se ha despreciado en lo posible el valor de ancho de calle, y se obtiene los siguientes resultados.

Figura. 5.13. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami en 1000 MHz

The screenshot shows the 'Cost231, Walfish-Ikegami' software window. It is divided into two main sections:

- Datos del enlace:** A list of input fields:
 - Altura de los edificios [m]: 50
 - Altura antena transmisora [m]: 50
 - Altura antena receptora [m]: 2
 - Frecuencia de operación [Mhz]: 1000
 - Distancia entre las antenas [Km]: 5
 - Separación de edificios [m]: 20
 - Ancho de la calle [m]: 0.001
 - Ángulo de llegada a la calle [°]: 90
 - Potencia de transmisión [dBW]: 0
 - Ganancia antena transmisora [dB]: 0
 - Ganancia antena receptora [dB]: 0
- Resultados:**
 - Pérdidas:**
 - Ciudad pequeña [dB]: 234.9067
 - Ciudad grande [dB]: 235.1013
 - Potencias de recepción:**
 - Ciudad pequeña [dB]: 234.9067
 - Ciudad grande [dB]: 235.1013

The 'Potencias de recepción' section is circled in red.

En esta ocasión, los valores poseen una variación considerable aproximado al 13%. Esto no quiere decir que la herramienta desarrollada arroje resultados poco certeros o que

el software de la web lo hace así; se deberá considerar que aunque siendo el mismo modelo tratado de Walfish-Ikegami ha existido varias cambios y recomendaciones por la ITU que pueden haber influenciado en unos de estos dos software y por eso la diferencia de sus resultados.

Por último para confirmar que las pérdidas disminuyen dependiendo del ancho de la calle, se resolverá el mismo caso aplicando el ancho de calle estándar de 8 metros.

Figura. 5.14. Calculo utilizando el software desarrollado de Walfish-Ikegami en 1000 MHz Y considerando el ancho de calle a 8 metros

Cost231, Walfish-Ikegami

Datos del enlace

Altura de los edificios [m]:	50
Altura antena transmisora [m]:	50
Altura antena receptora [m]:	2
Frecuencia de operación [Mhz]:	1000
Distancia entre las antenas [Km]:	5
Separación de edificios [m]:	20
Ancho de la calle [m]:	8
Ángulo de llegada a la calle [°]:	90
Potencia de transmisión [dBW]:	0
Ganancia antena transmisora [dB]	0
Ganancia antena receptora [dB]:	0

Resultados

Pérdidas	
Ciudad pequeña [dB]:	195.8758
Ciudad grande [dB]:	196.0704
Potencias de recepción	
Ciudad pequeña [dB]:	-195.8758
Ciudad grande [dB]:	-196.0704

En la figura 5.14 se comprueba que añadiendo el ancho de la calle, las pérdidas se reducen, y en este caso se redujeron aproximadamente en un 23%.

5.5.3 ITU-R P.1546

Para este modelo, se realizara la comparación con las graficas que nos brinda la recomendación ITU-R P.1546

Figura. 5.15. Grafica Recomendación ITU-R P.1546.[13]

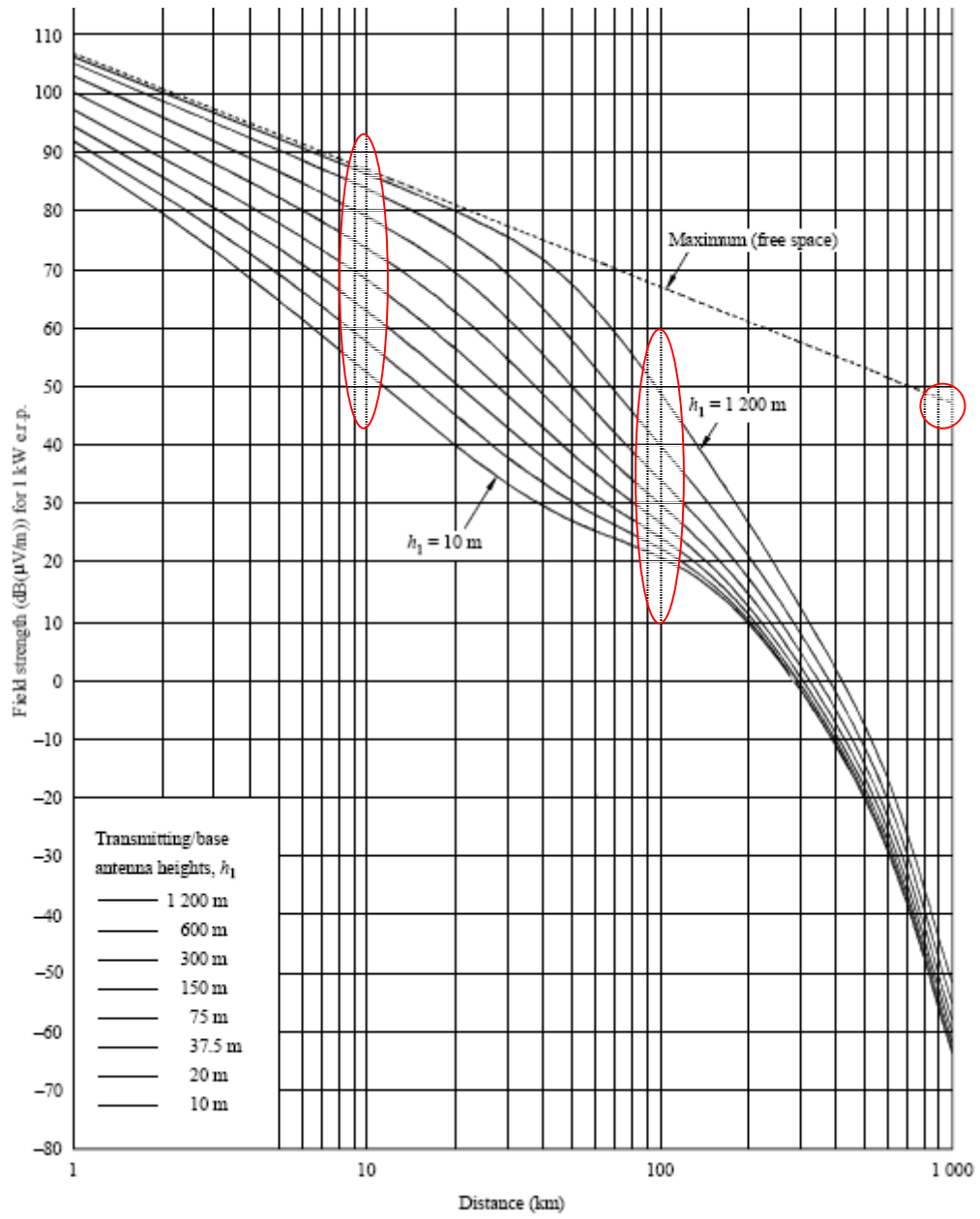
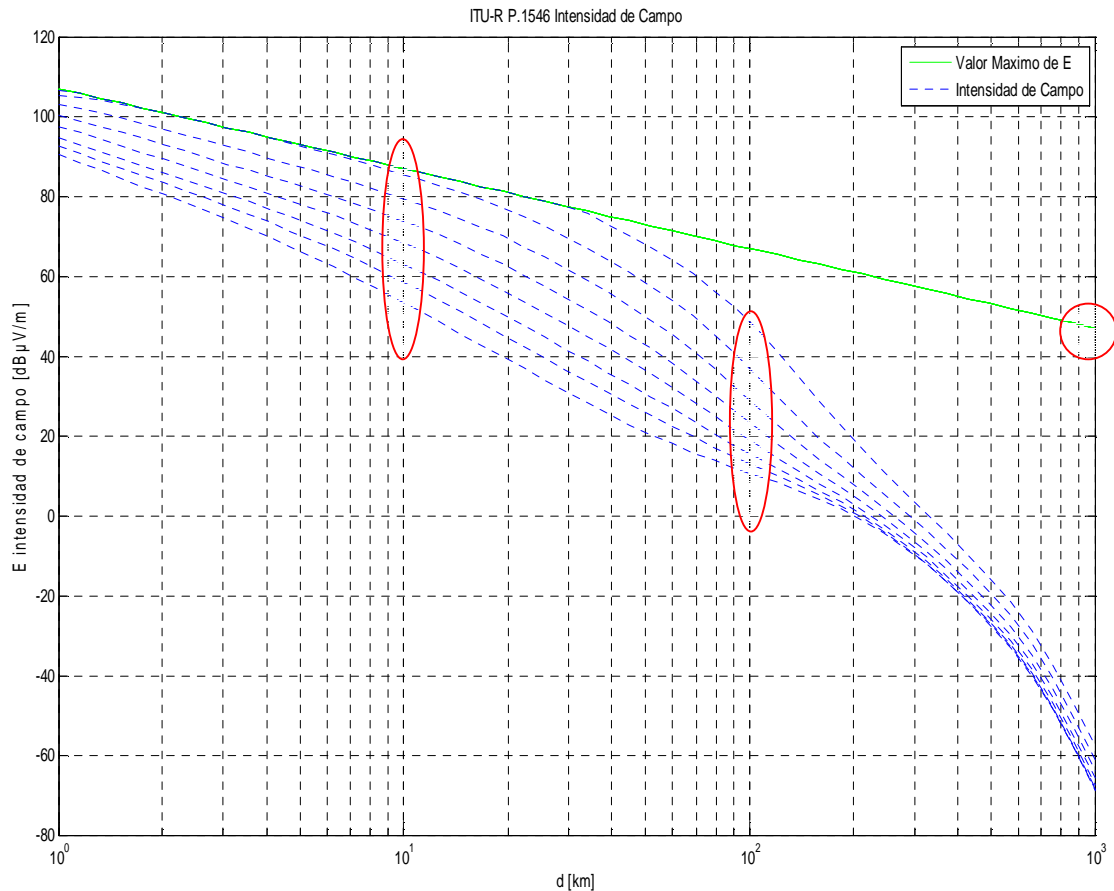


Figura. 5.16. Grafica de Herramienta desarrollada ITU-R P.1546.
F=100MHz, h=10m, T= 50%



Las dos graficas 5.15 y 5.16 obedecen a los mismo datos, $f=100\text{MHz}$, $T=50\%$, $\text{ERP}=1\text{kW}$ y altura de antena Tx de 10,20,37.5,75,150,300,600,1200 metros. Se ha seleccionado los tres sectores marcados con el círculo rojo para comparar los valores entre la grafica de la ITU y del software.

Los valores son exactos en las dos graficas, en el caso del grafico producido por el software no posee la misma escala que la ITU pero se puede apreciar la precisión de los valores. Quiere decir que la herramienta desarrollada arroja resultados muy confiables, tal vez con un mínimo de margen de error que no sobrepasa del 2%.

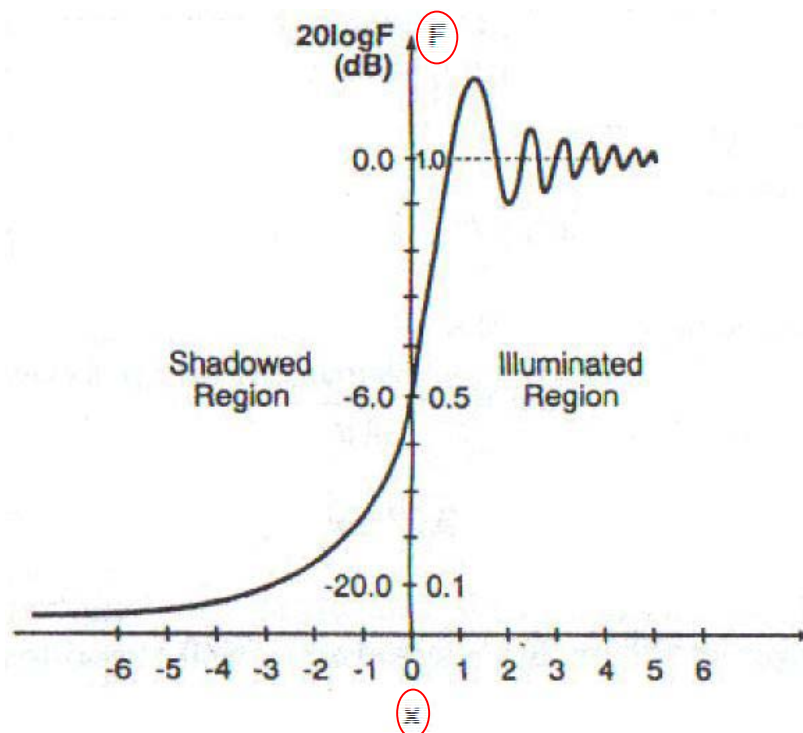
La misma prueba se realiza para frecuencias de 600 MHz y 2000 MHz, con variación en el valor de %T de 1%, 10% y 50%. Notaremos que en todos los casos existe a misma exactitud que con el anteriormente indicado.

Estas graficas podrán ser encontradas en el Anexo A.

5.5.4 Tierra Plana

Este modelo no se lo pudo comparar con alguno de la web, debido a que en esta herramienta se utiliza el principio de pérdidas por difracción de Bullington. Motivo por el cual lo evaluaremos dependiendo los valores resultantes que este arroje y la grafica que nos proporcione la fuente de consulta.

Figura 5.17. Grafica de Perdidas por difracción



Para comprobar la precisión de los datos producidos por la herramienta, necesitamos que estos obedezcan a la curva presentada en la figura 5.17

Pondremos a prueba a la herramienta y el único valor a variar será las alturas de los obstáculos. En la pantalla de Matlab aparecerá el valor de x que es el mismo que aparece en la grafica. Dado a que este valor depende de h (altura que obstruye del obstáculo) también será reflejada en cada cálculo.

Por último, en la grafica, en la parte derecha de esta existe una variable F, a la cual también presentaremos en cada variación. Dado todas estas comparaciones se decidirá si la herramienta es confiable o no

Figura 5.18. Utilizando el Modelo Tierra Plana (a).

Como se indica en la figura anterior, el dato a variar será la altura del obstáculo, en este cálculo, los valores que Matlab nos entrega son los siguientes:

- $h = 59$; $x = -1.9862$ y $F = 0.1118$.

Si se trasladan los valores de x y de F en la grafica de la figura 5.17, se podrá observar que el valor de las pérdidas son muy precisas.

Al variar la altura a 2100, los valores calculados son:

- $h = 109$; $x = -3.6695$ y $F = 0.0613$.

y la herramienta desarrollada nos da el resultado indicado en la siguiente figura

Figura 5.19. Utilizando el Modelo Tierra Plana (b).

Altura de los obstáculos [m]:	[2100]
Distancia de los obstáculos a la antena transmisora [Km]:	[10]
<input type="button" value="Calcular"/>	
Resultados	
Pérdidas por Difracción	-24.2573
Perdidas Totales [dB]:	-19.2083
Potencia Rx [dB]:	26.198

Este valor también coincide con gran exactitud a la grafica de la figura 5.17.

Esta vez se incrementara drásticamente el valor de la altura a 3100 metros, dando como resultados:

- $h = 1109$; $x = -37.3344$ y $F = 0.0060$

y el valor de la perdida por difracción se indica en la figura siguiente.

Figura 5.20. Utilizando el Modelo Tierra Plana (c).

Altura de los obstáculos [m]:	[3100]
Distancia de los obstáculos a la antena transmisora [Km]:	[10]
<input type="button" value="Calcular"/>	
Resultados	
Pérdidas por Difracción	-44.3956
Perdidas Totales [dB]:	-39.3466
Potencia Rx [dB]:	46.3363

Valor que al comparar con la grafica 5.17 es notorio que posee concordancia.

Ratificando la teoría expuesta en los primeros capítulos, en donde afirma que el valor de F tiende a 0 si x incrementa su valor en el eje negativo, se ha podido comprobar en este ultimo cálculo. El caso opuesto es que F tienda a 1 cuando x incrementa en el eje positivo. Para demostrarlo modificaremos el valor de la altura a 850 metros, y los valores resultantes son los siguientes:

- $h = -1.1410e+003$; $x = 38.411644$ y $F = 0.9942$

Figura 5.21. Utilizando el Modelo Tierra Plana (d).

Altura de los obstáculos [m]:	[850]
Distancia de los obstáculos a la antena transmisora [Km]:	[10]
<input type="button" value="Calcular"/>	
Resultados	
Pérdias por Difraccion	-0.050911
Perdidas Totales [dB]:	4.9981
Potencia Rx [dB]:	1.9916

Con esto se demuestra que la herramienta desarrollada es muy confiable.

CAPÍTULO VI

MANUAL DE USUARIO

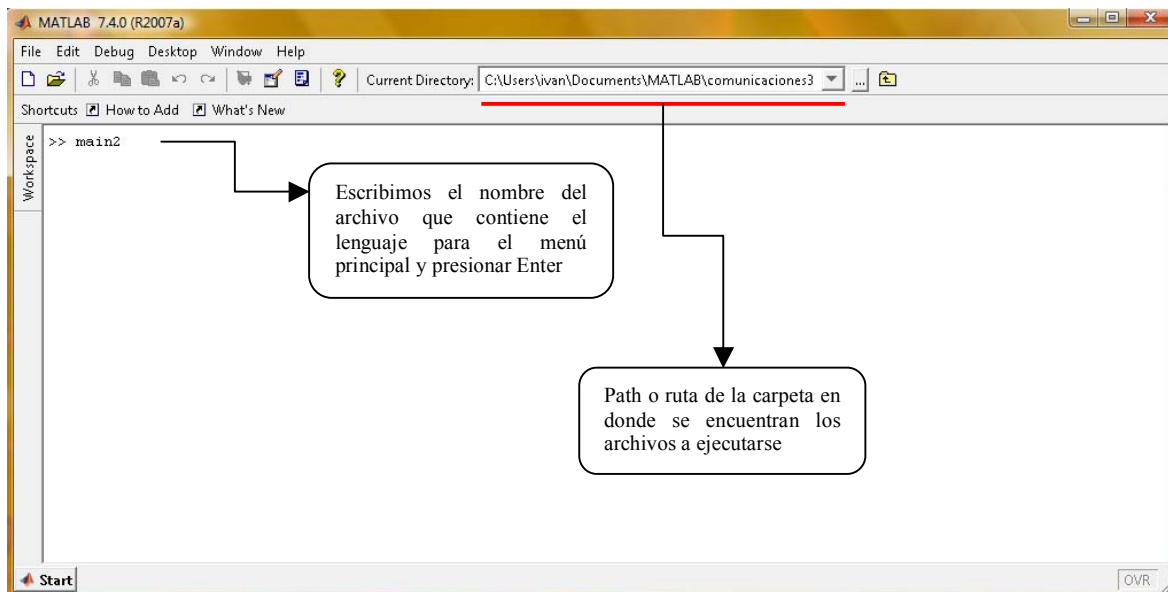
Contenido:

6.1 Inicialización de menú principal

Para iniciar el menú principal, se debe identificar que versión de MATLAB se encuentra instalada. Una vez identificada la versión, sabremos en donde grabar los archivos .M. Si la versión a utilizar es inferior a 7.4a, se deberá almacenar los archivos en la carpeta *work* de Matlab, si la versión es 7.4a o superior, almacenar los archivos dentro de la carpeta *work* de Matlab, si la versión es 7.4a o superior, almacenar los archivos dentro de la carpeta MATLAB que se crea automáticamente en la sección de Documentos.

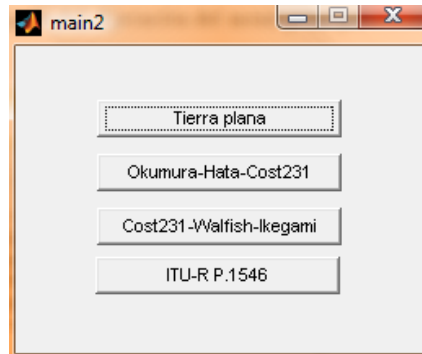
Una vez grabados todos los archivos, procedemos a ejecutar el menú principal:

Figura. 6.1. Ejecución del menú principal-Paso 1.



Una vez ingresado el comando del menú principal *main2*, se desplegará el menú con los diferentes modelos de propagación, tal como lo indica la Figura 6.2

Figura. 6.2. Menú principal.



El menú despliega cuatro opciones de modelos de propagación. Para acceder a cada uno de estos, es necesario hacer un clic en el botón del modelo que se desee consultar.

6.2 Utilizando el Modelo Tierra Plana

Es la primera opción que despliega el menú. Este modelo contempla en sus cálculos la existencia de obstáculos, no realiza un cálculo de *línea de vista* ya que considera factores como la reflexión.

Figura. 6.3. Modelo de Tierra Plana.

Datos Enlace

Altura de la antena transmisora [m]:	<input type="text" value="0"/>
Altura de la antena receptora [m]:	<input type="text" value="0"/>
Frecuencia de operación [MHz]:	<input type="text" value="0"/>
Distancia entre las antenas [Km]:	<input type="text" value="0"/>
Potencia de la antena transmisora [kW]:	<input type="text" value="0"/>
Ganancia de la antena transmisora [dB]:	<input type="text" value="0"/>
Ganancia de la antena receptora [dB]:	<input type="text" value="0"/>

Datos Orografía

Altura de la base de la antena transmisora [m]:	<input type="text" value="0"/>
Altura de la base de la antena receptora [m]:	<input type="text" value="0"/>
Altura de los obstáculos [m]:	<input type="text" value="[0]"/>
Distancia de los obstáculos a la antena transmisora [km]:	<input type="text" value="[0]"/>

Calcular

Resultados

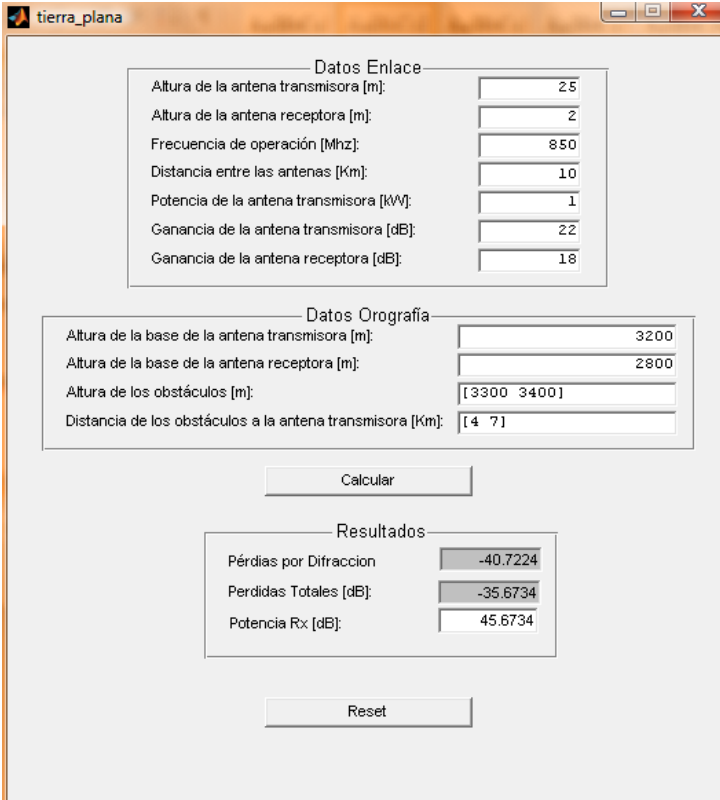
Pérdidas por Difraccion	<input type="text" value="0"/>
Pérdidas Totales [dB]:	<input type="text" value="0"/>
Potencia Rx [dB]:	<input type="text" value="0"/>

Reset

Al acceder al primer modelo “Tierra Plana”, se desplegara una pantalla tal como se indica en la Figura 6.3. Los datos requeridos se muestran en cada uno de los ítem a completar.

Para los datos orográficos, es importante considerar la altura de los obstáculos se llena en forma de vector, por lo que después de cada dato de deberá distinguir el siguiente con un *espacio*, de igual manera el vector de las distancias de obstáculos. Una vez completado el ingreso de los datos, es suficiente hacer un clic en el botón de calcular, y de inmediato aparecerán los datos de Perdidas (dB) y la potencia de recepción (dBmW) tal como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura. 6.4. Ejemplo de Modelo Tierra Plana.



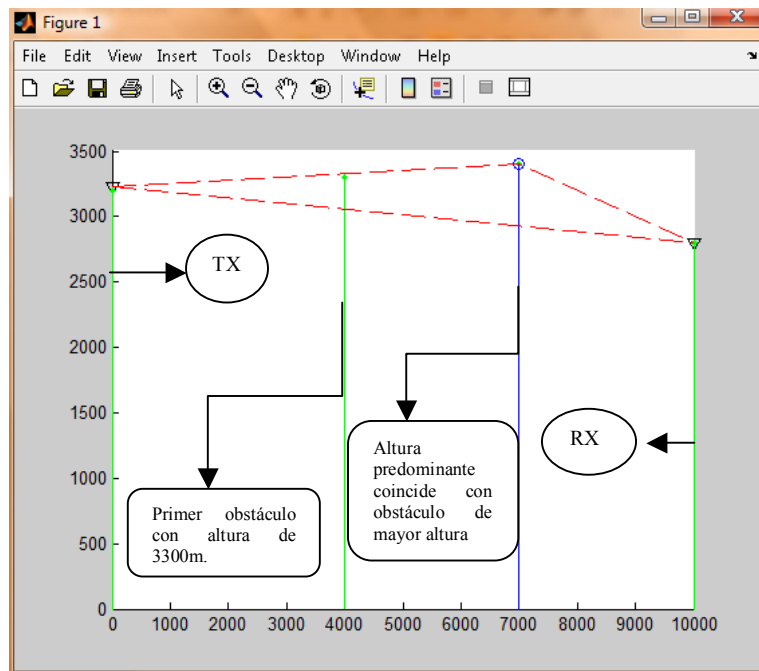
The screenshot shows a software window titled "tierra_plana" with the following sections:

- Datos Enlace:**
 - Altura de la antena transmisora [m]: 25
 - Altura de la antena receptora [m]: 2
 - Frecuencia de operación [Mhz]: 850
 - Distancia entre las antenas [Km]: 10
 - Potencia de la antena transmisora [kW]: 1
 - Ganancia de la antena transmisora [dB]: 22
 - Ganancia de la antena receptora [dB]: 18
- Datos Orografía:**
 - Altura de la base de la antena transmisora [m]: 3200
 - Altura de la base de la antena receptora [m]: 2800
 - Altura de los obstáculos [m]: [3300 3400]
 - Distancia de los obstáculos a la antena transmisora [Km]: [4 7]
- Calcular:** A button to perform the calculation.
- Resultados:**
 - Pérdias por Difraccion: -40.7224
 - Perdidas Totales [dB]: -35.6734
 - Potencia Rx [dB]: 45.6734
- Reset:** A button to clear the topographic data.

A demás de los cálculos, este modelo arroja como complemento de los datos ingresados una simulación de enlace, como se puede observar en la Figura 6.5.

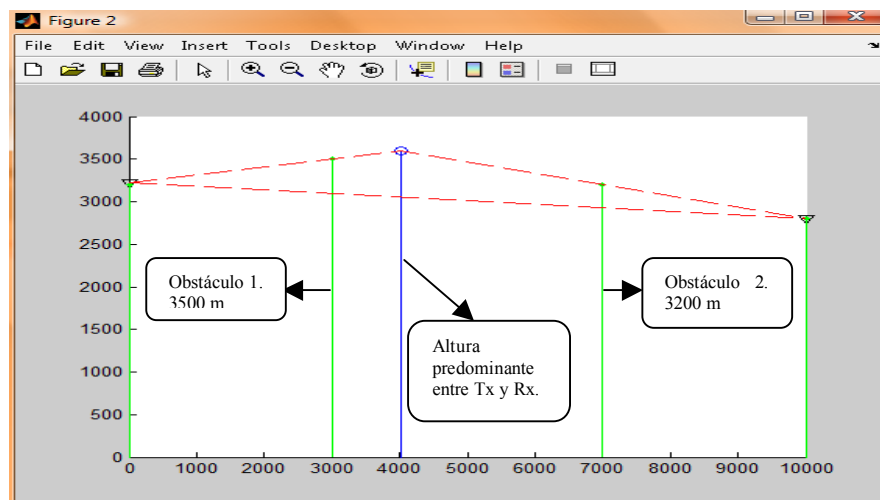
Con el botón de *Reset* se borrarán los datos de altura de obstáculos y distancia de estos.

Figura. 6.5. Gráficos Modelo Tierra Plana(a).



En este modelo, se usa el principio de Bullington para el cálculo de la altura promedio de los obstáculos. Como se observa en la figura 6.4, se ingresaron dos obstáculos, uno de 3300 metros de altura con una distancia de 4 Km con respecto a Tx y el otro obstáculo con una altura de 3400 metros ubicado a 7 Km de Tx. Entre estos dos, se calcula según criterio de Bullington la altura promedio que causarí­a el mismo efecto que los dos obstáculos, y esta es representada en el grafico con el vector de color azul. En este caso, el obstáculo de 3400 metros coincide con la altura predominante y es por eso que se pinta de azul. Ya veremos e la siguiente figura que no siempre sucede esto.

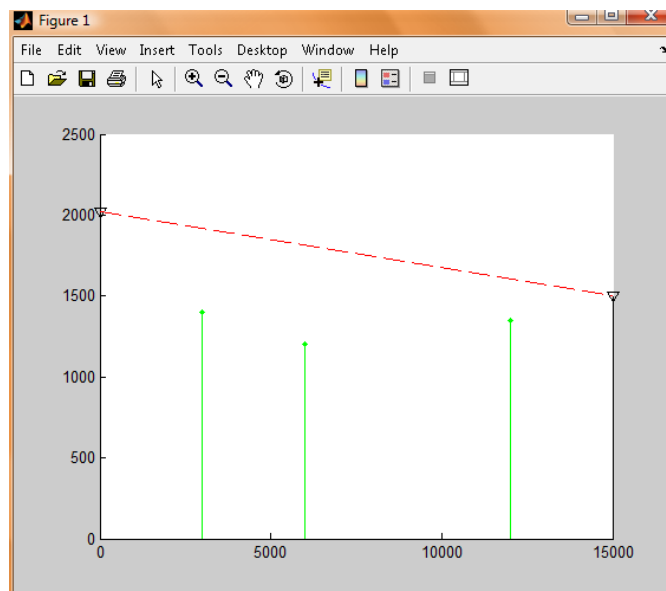
Figura. 6.6. Gráficos Modelo Tierra Plana(b).



En la figura anterior, se puede observar que existen dos obstáculos (vectores de color verde), sin embargo, existe un vector azul que representa la altura promedio que afecta al enlace, y en este caso dicha altura no pertenece a ninguno de los dos obstáculos.

Otro caso es cuando se ingresa alturas de obstáculos menores a las alturas totales del Tx y Rx o simplemente no se ingresan datos de alturas de obstáculos ni sus distancias. Aquí el software calculara la perdida de propagación con el modelo de perdidas por trayectoria, y el enlace de Tx a Rx aparecerá en línea de vista; la grafica del enlace total aparecerá como sigue.

Figura. 6.7. Gráficos Modelo Tierra Plana con obstáculos menores a Tx y Rx



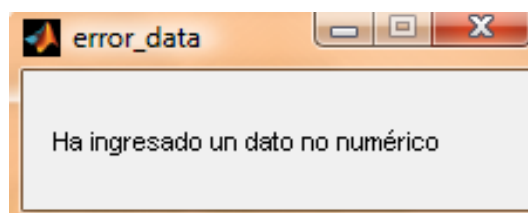
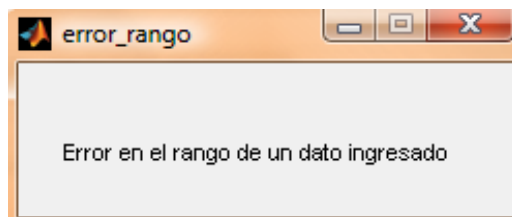
6.3 Utilizando el Modelo Okumura Hata-Cost231

El modelo de Okumura Hata-Cost231 contempla una extensa gama de frecuencias. En este proceso se ha condensado la formula de Hata que nos permite trabajar con frecuencias de 150MHz hasta 1000 MHz y el modelo de Okumura-Hata o Cost231, el cual nos permitirá incrementar los rangos de frecuencia hasta los 2000 MHz.

Con esta opción, a demás de obtener el cálculo de las perdidas y la potencia de Rx para cada tipo de ciudad, se obtendrá un grafico de Perdidas Vs Distancia para cada tipo de región.

Figura. 6.7. Interfaz Modelo Okumra-Hata.

En cada uno de los ítem a completar, se encuentra especificado el rango de valores aceptados, en el caso de que algún valor se ingrese de manera incorrecta, como por ejemplo el ingreso de caracteres, valores mayores o menores a los validados, aparecerá alertas de error como las que se indican en las Figuras 6.8 y 6.9

Figura. 6.8. Alerta Error por ingreso de Dato no numérico.**Figura. 6.9. Alerta Error por ingreso de Dato fuera de rango especificado.**

Una vez llenado todos los inputs requeridos, es necesario hacer un clic en el botón de calcular. Con esto a demás de obtener los valores de las perdidas por cada tipo de entorno, las potencias recibidas en cada uno de estos, se obtiene también la grafica que abarca los datos de distancia y pérdidas. Para poder ejemplificar un caso se realiza el siguiente ejemplo de uso del modelo.

Figura. 6.10. Ejemplo modelo Okumura-Hata.

The screenshot shows a software window titled "okumura_hata" with the main heading "Okumura-Hata-Cost231". It is divided into three main sections: "Datos Enlace", "Resultados", and "Potencias de Recepción".

Datos Enlace

Altura de la antena transmisora [m]:	35
Altura de la antena receptora [m]:	3
Distancia entre las antenas [km]:	15
Frecuencia de operación [Mhz]:	850
Potencia de transmisión [dBw]:	100
Ganancia de la antena transmisora [dB]:	3
Ganancia de la antena receptora [dB]:	3

Buttons: **Calcular** (highlighted), **Reset**

Resultados

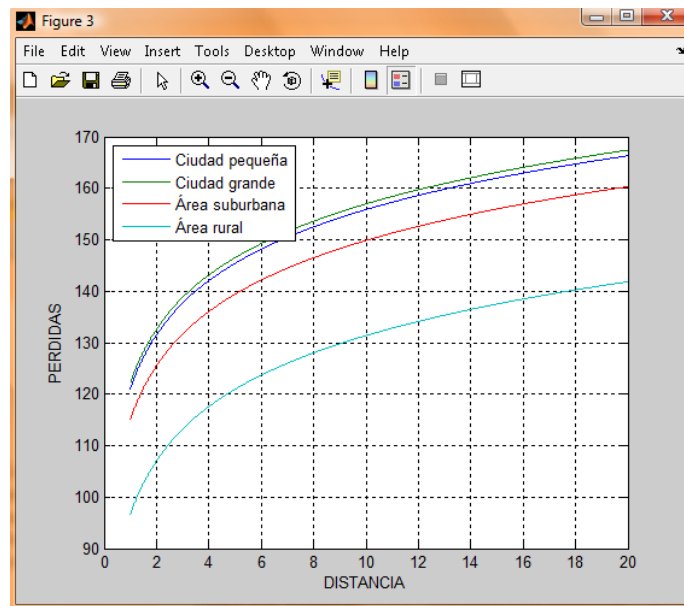
Pérdidas

Área urbana ciudad pequeña [dB]:	161.9593
Área urbana ciudad grande [dB]:	163.0667
Área suburbana [dB]:	155.9623
Área rural [dB]:	137.4932

Potencias de Recepción

Área urbana ciudad pequeña [dBW]:	-25.9593
Área urbana ciudad grande [dBW]:	-27.0667
Área suburbana [dBW]:	-19.9623
Área rural [dBW]:	-1.4932

El botón *Reset* borrara todos los datos ingresados, y se conservaran los datos calculados.

Figura. 6.11. Grafica Modelo Okumura-Hata.

Cada una de las curvas representa la función Perdidas Vs Distancia en cada uno de los diferentes tipos de entorno.

6.4 Utilizando el Modelo Walfish-Ikegami

Este modelo se lo utiliza para calcular la potencia de Rx en zonas muy específicas, dígame una avenida, una calle, una plaza, etc. Se lo considera muy útil en el momento de comprobar la calidad de una red celular.

El modelo requiere como inputs, a demás de la potencia de Tx, ganancias de Tx y Rx, distancias, la altura de los edificios, el ángulo de llegada de Tx a Rx, y el ancho de las calles.

Figura. 6.12. Modelo Walfish-Ikegami.

Cost231, Walfish-Ikegami

Datos del enlace

Altura de los edificios [m]:	20
Altura antena transmisora [m]:	25
Altura antena receptora [m]:	2
Frecuencia de operación [Mhz]:	800
Distancia entre las antenas [Km]:	2
Separación de edificios [m]:	10
Ancho de la calle [m]:	12
Ángulo de llegada a la calle [°]:	90
Potencia de transmisión [dBW]:	100
Ganancia antena transmisora [dB]	2
Ganancia antena receptora [dB]:	2

Calcular Reset

Resultados

Pérdidas

Ciudad pequeña [dB]:	163.9933
Ciudad grande [dB]:	163.6794

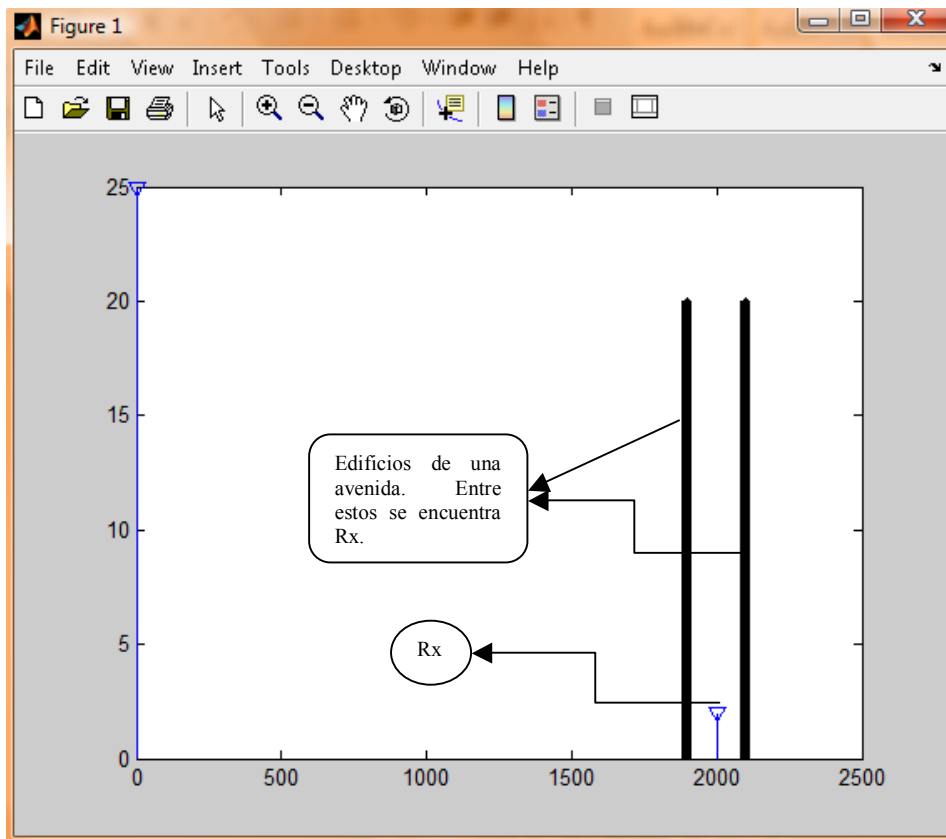
Potencias de recepción

Ciudad pequeña [dBmV]:	-29.9933
Ciudad grande [dBmV]:	-29.6794

Al igual que los anteriores modelos, una vez ingresados todos los datos, deberemos presionar el botón de calcular para poder obtener los datos de pérdidas y la potencia recibida por el Rx. Del mismo modo que en el modelo de Okumura-Hata, si los valores ingresados son no numéricos, o se encuentran fuera del rango, aparecerán las alertas de error.

Es importante que el valor de la separación de los edificios sea mayor al valor del ancho de la calle, caso contrario el mensaje de fuera de rango aparecerá al presionar el botón de calcular.

El botón de *Reset* borrara todos los datos del enlace ingresados, mostrando en cada una de las celdas os rangos de valores permitidos.

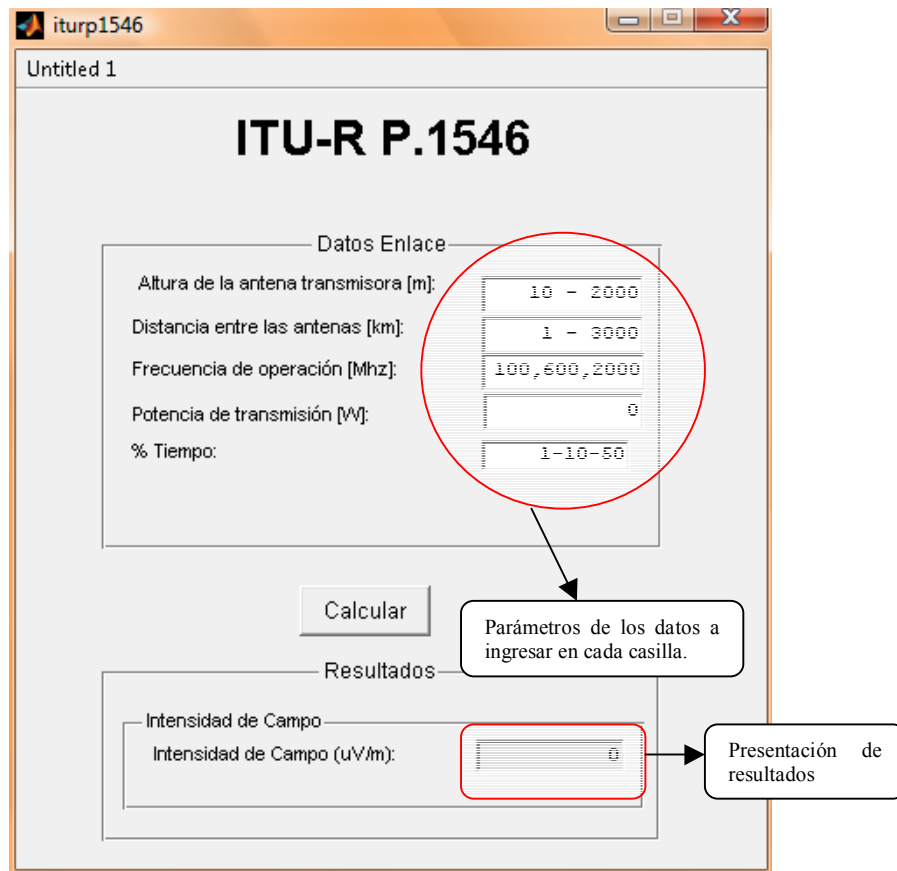
Figura. 6.13. Grafica Modelo Walfish-Ikegami.

La grafica que este modelo arroja como resultado no indicara en qué situación se encuentra el Tx y el Rx, esta grafica no indica ningún parámetro de enlace como lo hace la grafica del Modelo de Tierra Plana.

Como se explica en el grafico, los vectores de color negro representan los edificios, y entre estos se encuentra el Rx.

6.5 Utilizando el Modelo ITU-R P.1546

El modelo ITU-R P.1546 presenta una pantalla en donde se deberá ingresar los datos bajo los parámetros que se indica en cada casilla, tal como se indica en la figura 6.14

Figura 6.14. Interfaz Modelo ITU-R P.1546. Ingreso de datos

Los valores para la *Altura de la antena transmisora* se encuentran en el rango de 10 a 2000 metros, el rango para la *Distancia entre las antenas* es de 1 hasta 3000 Km. En el caso de la *frecuencia de operación* y del valor de *% Tiempo* los valores indicados en cada casilla son los únicos valores posibles de ingresar. Si en cualquiera de las casillas no se obedece al rango de valores, aparecerá el recuadro anteriormente indicado de Valor fuera de Rango que se indica en la figura 6.9.

Una vez ingresados los datos se debe presionar el botón de calcular y la herramienta arrojará el valor de la intensidad de campo en el recuadro que se puede observar en la figura 6.14. Además del dato de la intensidad de campo, el software produce la gráfica del comportamiento de las variables ingresadas según la recomendación ITU-R P.1546 tal como se indica en la figura 6.16.

**Figura 6.15. Utilizando el modelo ITU-R P.1546
Ingreso de datos**

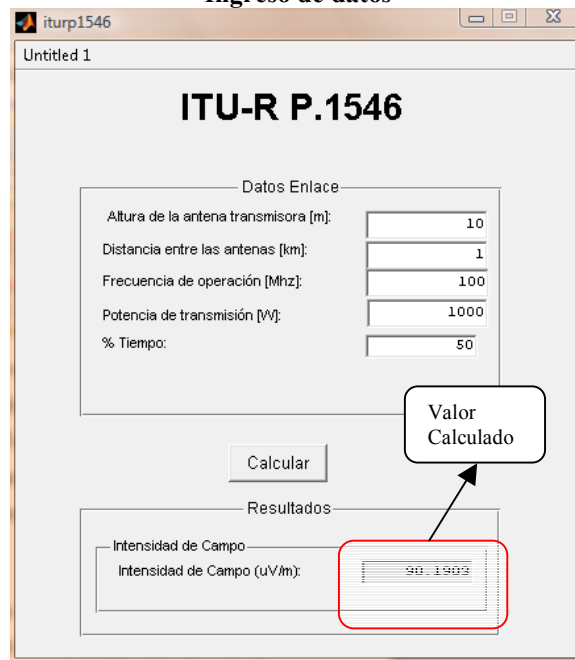
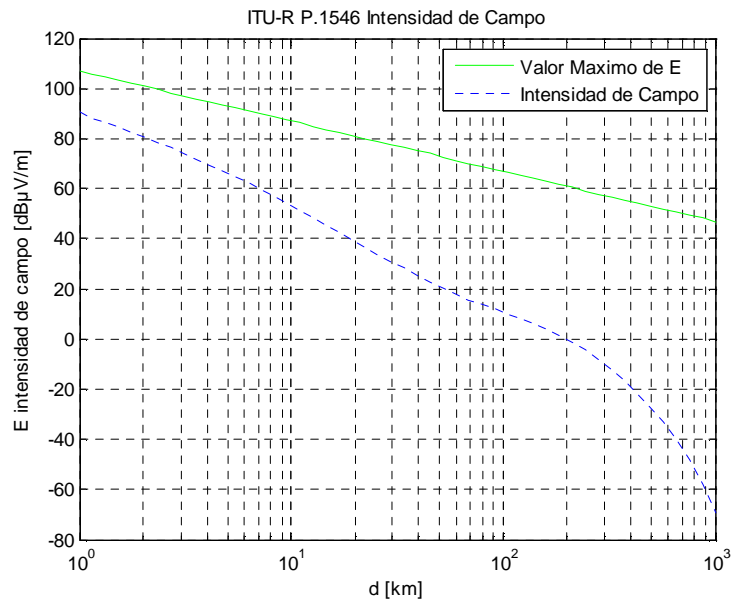


Figura 6.16. Grafica resultante Modelo ITU-R P.1546



El software brinda la opción de mantener la grafica para que el usuario pueda realizar otros ingresos y la nueva curva se grafique en el mismo cuadro, así se podrá realizar las comparaciones deseadas.

**Figura 6.17. Utilizando el modelo ITU-R P.1546
Cambio de datos**

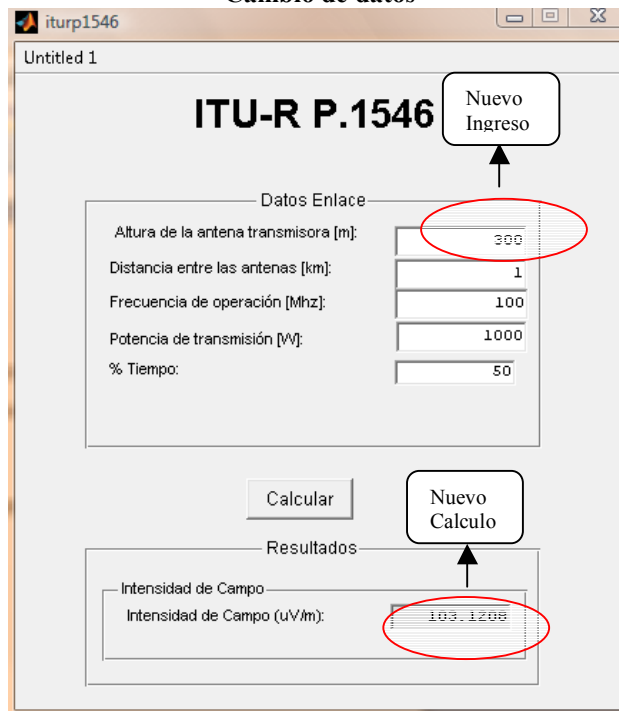
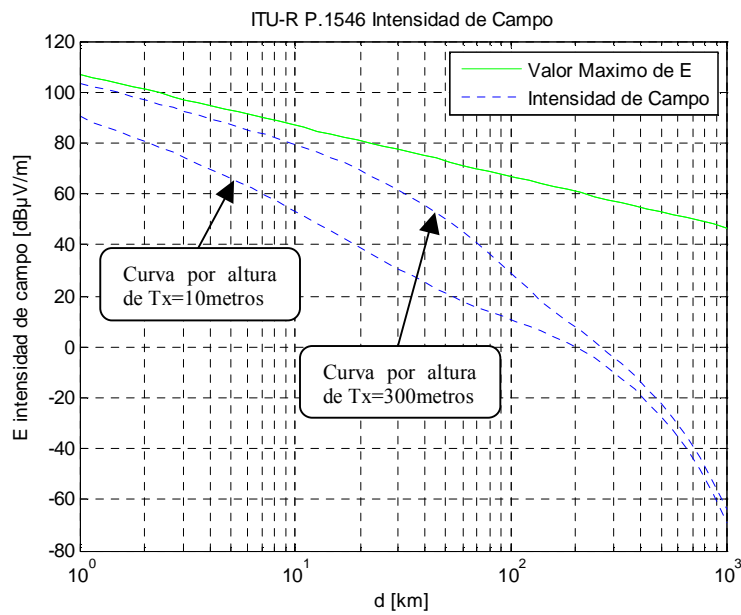


Figura 6.18. Grafica con la nueva curva.



Para el borrado de datos simplemente se deberá sobre escribir sobre las casillas ocupadas.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se ha diseñado una herramienta de software que permite el modelado de propagación de las ondas en enlaces con cuatro criterios diferentes, Okumura-Hata (que encierra también la fórmula de Hata), Modelo de Tierra Plana, Walfish-Ikegami y la recomendación ITU-R P.1546.
- Comprobamos que los resultados arrojados por la herramienta desarrollada poseen cierto margen de error comparado con las herramientas profesionales y costosas del mercado, aun así, los resultados son aceptables para las prácticas de cobertura y para planificar y desarrollar pequeños proyectos de cobertura.
- La herramienta fue desarrollada con modelos cuyos parámetros han sido establecidos para enlaces móviles y con características muy bien definidas para zonas específicas, por ejemplo Okumura-Hata para el Japón; por lo que si se desea utilizar esta herramienta para zonas de nuestro entorno, considerar que los resultados no serán 100% confiables.
- La simulación de terreno en el modelo de Tierra Plana es una herramienta sumamente útil para reflejar un posible perfil de enlace.
- El software que se ha desarrollado es de ayuda para los estudiantes en los cálculos con los distintos modelos de propagación y porque no decirlo para su propia actualización.
- Comparando la herramienta desarrollada con las existentes en el mercado, a esta primera únicamente le faltaría el ingreso automático de una base de datos con coordenadas geográficas (utilizando la herramienta de mapping de Matlab

ingresando un mapa digitalizado) para que dichos cálculos sean útiles para zonas reales, quedando esto como propuesta de continuidad en un futuro proyecto.

- En cada uno de los modelos programados, existe la posibilidad de modificar parámetros, ecuaciones y de mas con el fin de que el software pueda ser fácilmente actualizable con las nuevas recomendaciones que la ITU desarrolle.

7.2 Recomendaciones

- No alterar ningún condigo del programa sin primero haber comprendido la teoría y desarrollo de formulas que contiene este documento.
- Considerar que los modelos desarrollados en este software contemplan todos los parámetros y restricciones que se detallan en el documento, por lo que pudieren variar los datos con respecto a cálculos manuales o a otros programas desarrollados.
- La altura de la antena receptora en el modelo de Walfish-Ikegami no se encuentra en escala real, solamente se la hizo de ese tamaño para indicar su posición. Esto no afecta en nada de los cálculos, es simplemente para dar una idea de la situación planteada.
- Si existiera problemas de compatibilidad con algunos comandos, pudiese ser que la versión en la que se esté ejecutando la herramienta no es la apropiada. Tomar en cuenta que el software fue desarrollado en la versión de MATLAB V.7.4.0 R2007a, la cual ya es apta para Windows Vista.

CAPÍTULO VIII

ANEXOS

SECCION A

8.1 Comparación graficas ITU-R P.1546 con herramienta desarrollada.

Figura 8.1. Grafica ITU-R P.1546

100 MHz, land path, 10% time

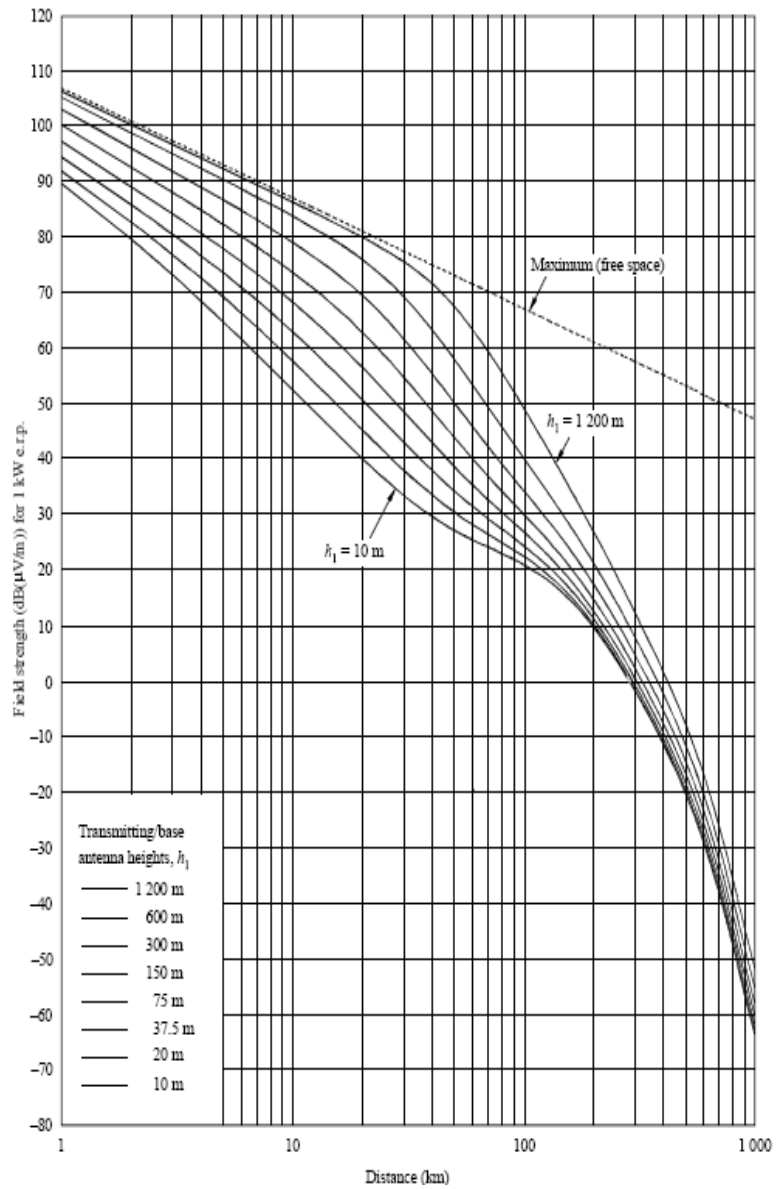


Figura 8.2. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 f=100MHz, %T=10%

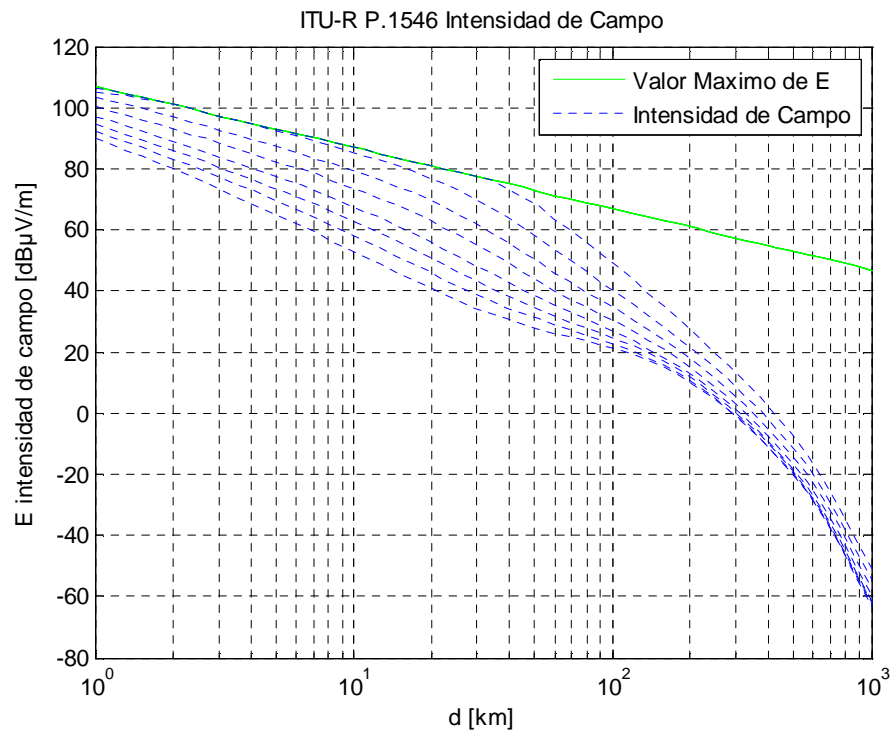


Figura 8.3. Grafica ITU-R P.1546

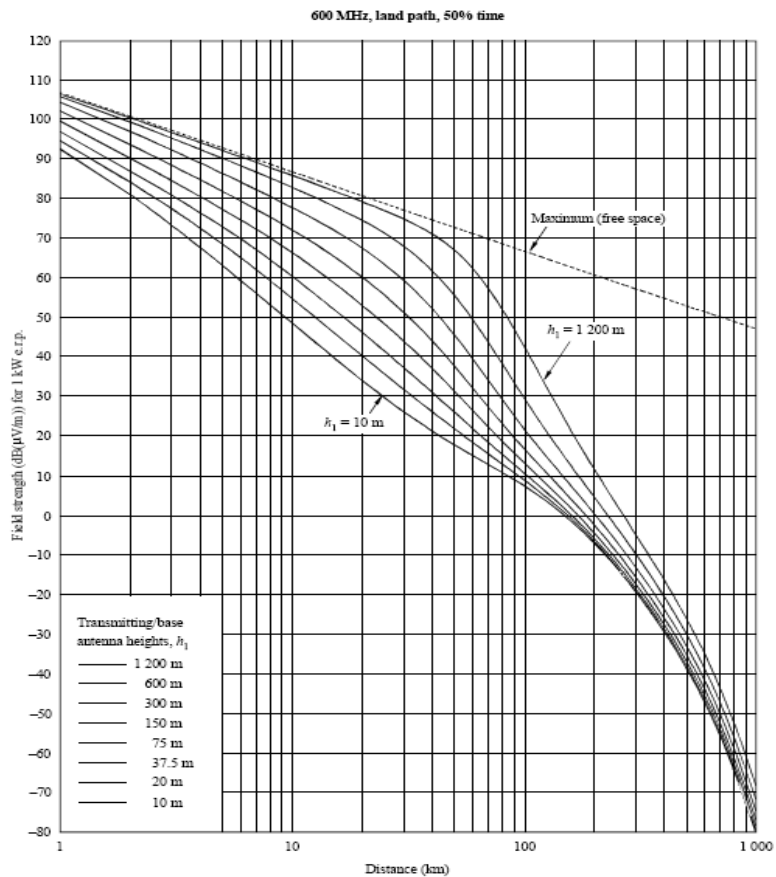


Figura 8.4. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 f=600MHz, %T=50%

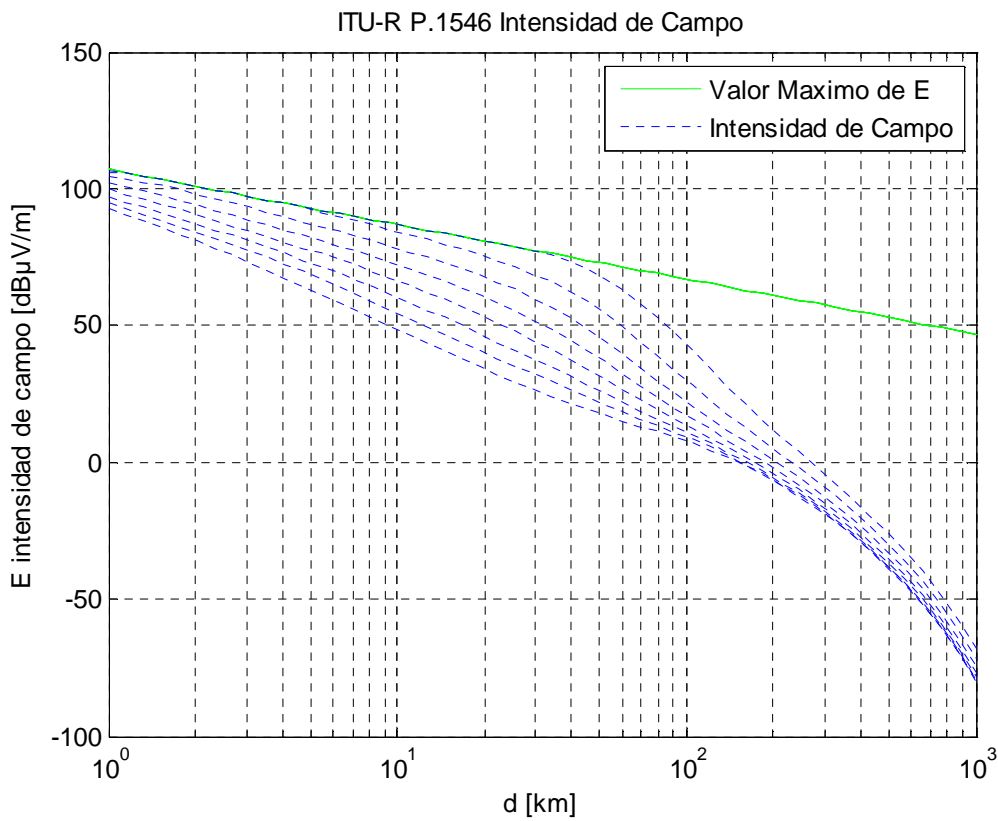


Figura 8.5. Grafica ITU-R P.1546

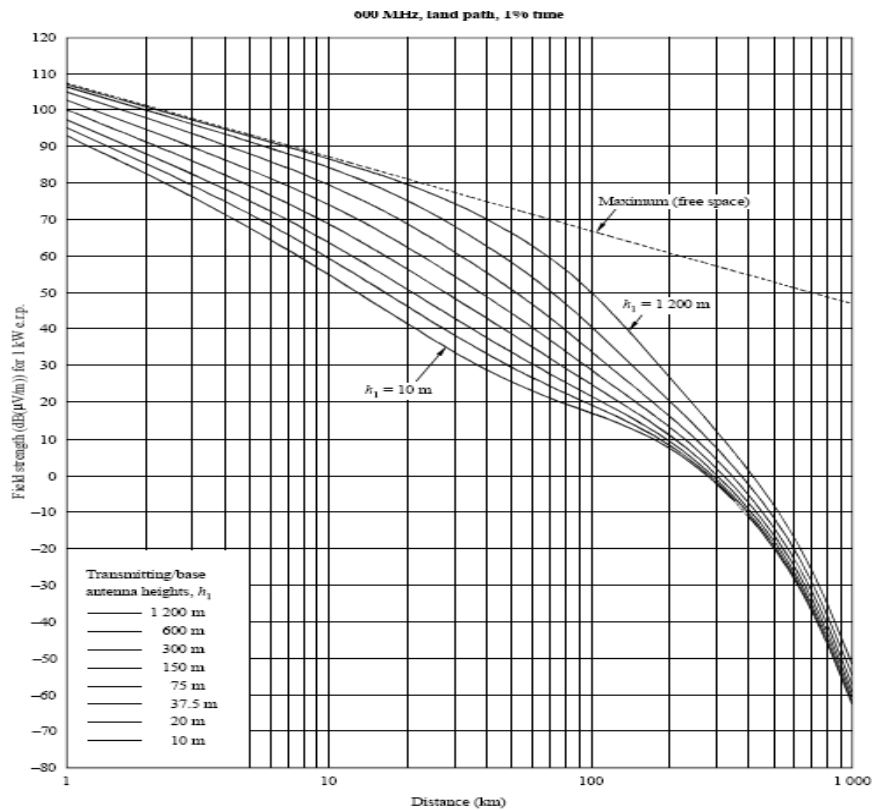


Figura 8.6. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=600\text{MHz}$, $\%T=1\%$

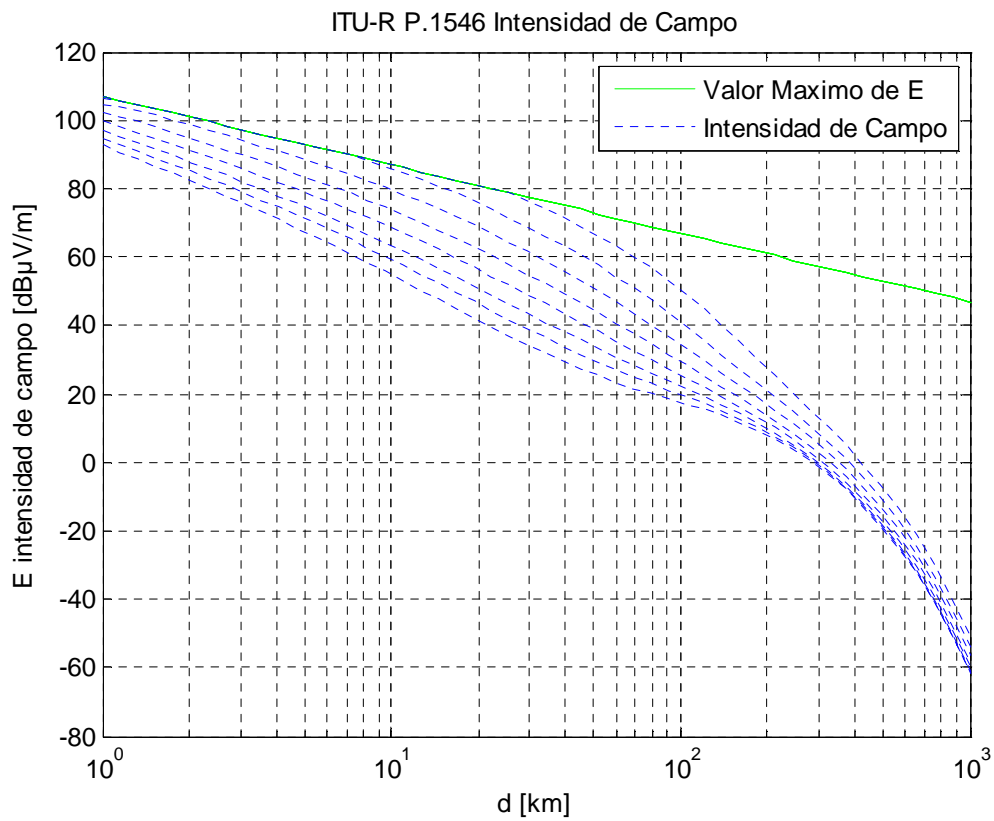


Figura 8.7. Grafica ITU-R P.1546

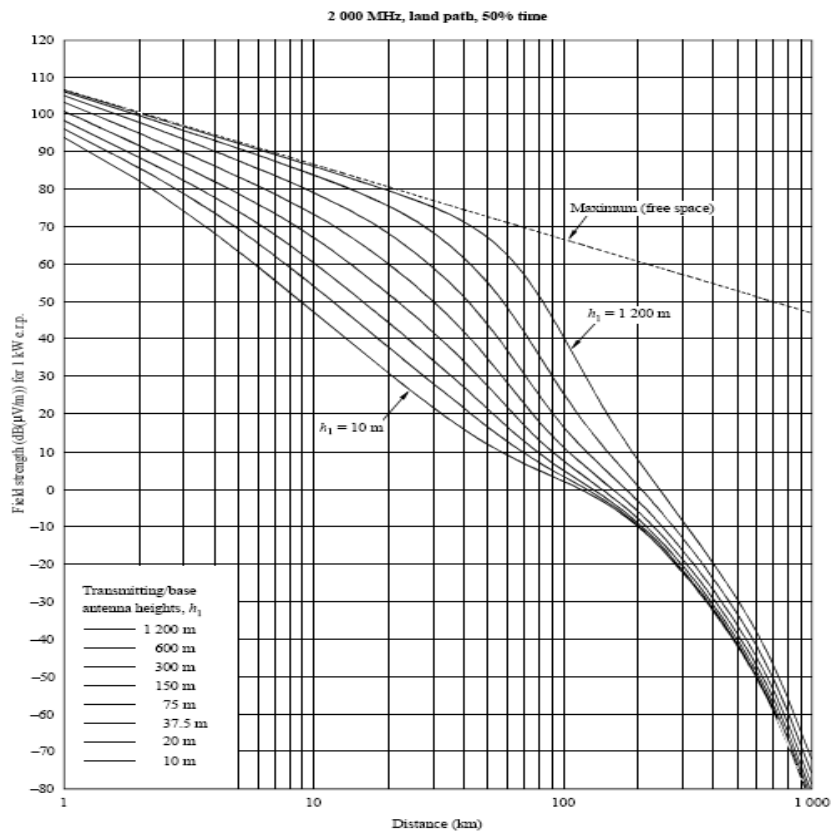


Figura 8.8. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=2000\text{MHz}$, $\%T=50\%$

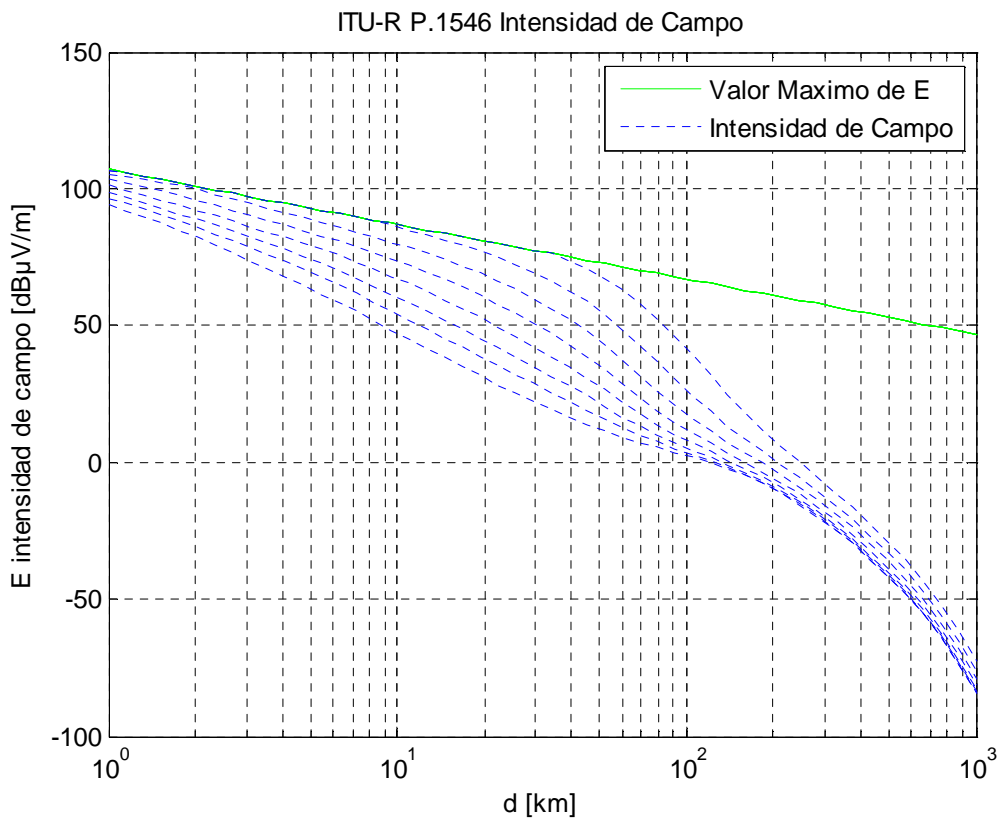


Figura 8.9. Grafica ITU-R P.1546

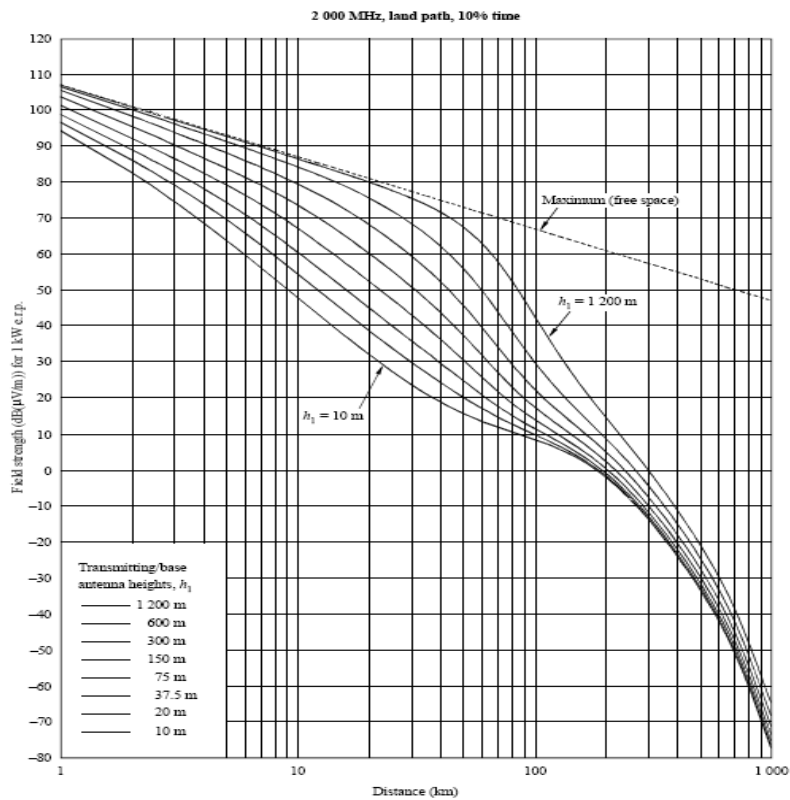
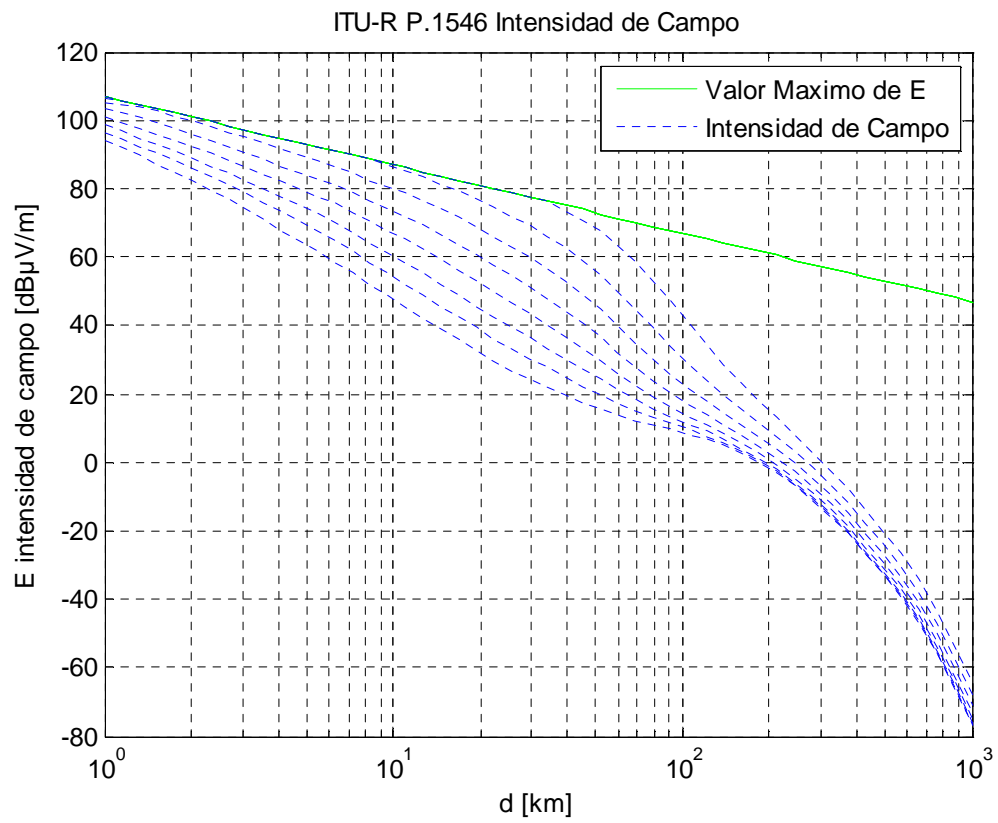


Figura 8.10. Grafica Herramienta desarrollada ITU-R P.1546 $f=2000\text{MHz}$, $\%T=10\%$ 

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Michael Daoud Yacoub , “*FOUNDATIONS OF MOBILE RADIO ENGINEERING*”, CRC Press LLC Estados Unidos, 1993
- [2] Cardama, Ll. Jofre, J. M. Rius, J. Romeu, S. Blach: “*Antenas*”. Ediciones UPC, 1993.
- [3] Balanis: “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, 2ª Ed., John Wiley and Sons, 1997.
- [4] J. M. Hernando Rábanos: “*Transmisión por Radio*”, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces S. A., Madrid, 1993.
- [5] Sandra P. López , Juan D. Osorio B. , Andrés N. Cadavid, “*Herramienta gráfica de modelado de redes inalámbricas basada en modelos de propagación de señales en interiores*” , 2004
http://www.icesi.edu.co/es/publicaciones/publicaciones/contenidos/sistemas_tematica/4/slopez-josorio-anavarro_senales.pdf
- [6] Modelos de Propagación, http://www.iie.fing.edu.uy/ense/assign/peu/material/Conceptos_propagacion.ppt
- [7] Bruno Maia Antonio Luiz, “*Elementos de Propagación*”,
http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/bruno_maia/wll_lmds/wll_lmds_03.html
- [8] Juan José Murillo Fuentes, “*Radio propagación*”,2006
<http://www.personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema7.pdf>
- [9] Bruno Maia Antonio Luiz, “*Desvanecimientos*”,
<http://www.zenite.eng.br/modelos.htm>
- [10] Universidad Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia, “*Uma Nova abordagem da recomendacao ITU-R P.1546*”,2005
- [11] Fuente de Consulta. “*A Ferramenta de Simulacao*”.
- [12] Fuente de Consulta. “*Pruebas y Resultados*”
- [13] Rec. ITU-R P.1546-1
- [14] W.C. Jakes, “*Microwave Mobile Communications*”, New York 1974