

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CALCULO DE COBERTURAS RADIOELÉCTRICAS PARA SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES ORIENTADA A UN ENTORNO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE

Autor

Lorenzo Ortega Espluga

Director

Paloma García Dúcar

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CALCULO DE COBERTURAS RADIOELÉCTRICAS PARA SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES ORIENTADA A UN ENTORNO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE

RESUMEN

En la actualidad, se requiere de herramientas de planificación y de cálculo de cobertura para la validación de emplazamientos en los distintos sistemas de radiocomunicación existentes. Por ello surge la necesidad que en el estudio y aprendizaje de dichos servicios, se requieran de entornos donde los alumnos puedan transferir los conocimientos teóricos a procedimientos y conocimientos prácticos. Por tanto, el presente proyecto tiene como finalidad, la implementación y el desarrollo de una herramienta software mediante la cual, los alumnos puedan ejercitar todas las competencias aprendidas en los cursos básicos de sistemas de radiocomunicación.

La herramienta diseñada consiste en un sistema de cálculo de cobertura, que a la vez de fácil manejo, sea lo suficientemente potente como para realizar los cálculos necesarios sobre distintos sistemas de radiocomunicación y en diferentes escenarios. En concreto, el software desarrollado contiene la posibilidad de trabajar con tres sistemas distintos: Radioenlaces, sistemas móviles y sistemas de radiodifusión. Para la implementación de los tres sistemas se consultaron distintas recomendaciones, donde se exponen públicamente diferentes métodos para realizar los cálculos pertinentes para obtener la cobertura en cada uno de los tres servicios.

La herramienta informática diseñada, al igual que las actuales herramientas de planificación profesional, utiliza mapas digitales del terreno para poder realizar los cálculos de la cobertura. Dichos mapas se puede obtener del Instituto Geográfico Nacional, pudiendo seleccionar diferentes áreas del territorio español.

Además, se ha desarrollado una interfaz gráfica de usuario con la única finalidad de facilitar la interacción con la herramienta de cálculo, eliminando la necesidad del aprendizaje de comandos para el uso o ejecución de la aplicación. Dicha interfaz permitirá un control sencillo e intuitivo de la herramienta y guiará al usuario en su objetivo de calcular la cobertura en cualquiera de los sistemas desarrollados.

En resumen, en este proyecto se han desarrollado, implementado y testado las herramientas necesarias para poder realizar cálculos de cobertura en diferentes sistemas de radiocomunicación. Junto al motor computacional se ha desarrollado una interfaz con la finalidad de facilitar el uso de la herramienta.

La herramienta desarrollada permite plantear distintas líneas de futuras, con el fin de actualizar, mejorar e incrementar la potencialidad del software y que de esta manera los alumnos puedan seguir aumentando sus conocimientos en el área de sistemas de radiocomunicación de una manera práctica.

Índice

1	Introducción	6
2	Herramienta de cálculo de coberturas	10
2.1	Introducción	10
2.2	Interfaz Gráfica	10
2.3	Obtención de datos	12
2.3.1	Introducción	12
2.3.2	Formato de los planos	13
3	Sistemas de radiocomunicaciones	16
3.1	Introducción	16
3.2	Radioenlace	17
3.2.1	Introducción	17
3.2.2	Difracción	18
3.2.3	Atenuaciones	19
3.2.4	Interfaz y resultados del servicio de radioenlace	21
3.3	Sistemas de Comunicaciones móviles	23
3.3.1	Introducción	23
3.3.2	Pérdidas en espacio libre	24
3.3.3	Método de Okumura-Hata	25
3.3.4	Método COST-231-Hata	26
3.3.5	Modelo de la tierra plana	26
3.3.6	Modelo de Egli	27
3.3.7	Cálculo de coberturas	27
3.3.8	Calculo de la interferencia	28
3.3.9	Interfaz y resultados del servicio de comunicaciones móviles	29
3.4	Sistemas de radiodifusión	34
3.4.1	Introducción	34
3.4.2	Cálculo de la intensidad de campo eléctrico	35
3.4.3	Cálculo de la cobertura	38
3.4.4	Interfaz y resultado del servicio de radiodifusión	39
4	Conclusiones y líneas futuras de trabajo	44
4.1	Grado de consecución de los objetivos	44
4.2	Líneas futuras de trabajo	45
4.3	Seguimiento del trabajo	45
4.3.1	Introducción	45
4.3.2	Pasos	46
5	Referencias	48

Anexo I. Cartografía	54
1 Introducción	54
2 Sistemas de referencia	54
3 Proyección	56
4 Series cartográficas.	58
Anexo II. Radioenlaces	61
1 Difracción	61
1.1 Principio de Huygens. Elipsoides de Fresnel	61
1.2 Método de Bullington.	63
2 Atenuaciones	64
2.1 Atenuación por lluvia	64
2.2 Atenuación por nubes y niebla	67
2.3 Atenuación de los gases atmosféricos	69
Anexo III. Sistemas de Comunicaciones móviles	72
1 Introducción	72
2 Modelos de propagación	72
2.1 Perdidas en espacio libre	72
2.3 Método de Okumura-Hata	73
2.4 Método COST-231-HATA	74
3 Desvanecimientos de señal	74
3.1 Desvanecimientos lentos	74
3.2 Desvanecimientos rápidos	77
Anexo IV. Sistemas de radiodifusión	80
1 Introducción	80
2 Procedimiento de aplicación de la recomendación UIT-1546	80

Figuras.

Figura 2-1 Pantalla principal del programa.....	11
Figura 2-2 Ventana de ayuda	11
Figura 2-3 Huso UTM en España	13
Figura 2-4 Representación tridimensional mapa IGN.....	14
Figura 3-1 Representación radioenlace.....	17
Figura 3-2 Atenuación específica de los gases.	20
Figura 3-3 Interfaz radioenlace.	21
Figura 3-4 Selección de emplazamiento en mapa tridimensional.	22
Figura 3-5 Interfaz de las atenuaciones.	22
Figura 3-6 Interfaz de los resultados del radioenlace.....	22
Figura 3-7 Localización de antenas en el mapa / Perfil del terreno.	23
Figura 3-8 Pérdidas en espacio libre para dos frecuencias distintas.	25
Figura 3-9 Curvas modelo Okumura –Hata.	25
Figura 3-10 Curvas modelo Okumura-Hata.....	25
Figura 3-11 Entorno de propagación urbano	26
Figura 3-12 Interfaz principal de sistemas móviles.	30
Figura 3-13 Parámetros de los emplazamientos móviles antena sectorizada 120º.....	30
Figura 3-14 Parámetros de los emplazamientos móviles antena omnidireccional.	30
Figura 3-15 Interfaz método de pérdidas en espacio libre	31
Figura 3-16 Porcentaje de cobertura.....	31
Figura 3-17 Atenuación, Potencia de recepción, Campo recibido/ Densidad de campo recibida en cada punto del terreno. Antena 2.	31
Figura 3-18 Atenuación, Potencia de recepción, Campo recibido/ Densidad de campo recibida en cada punto del terreno. Antena1.	31
Figura 3-19 Cobertura segunda antena.	32
Figura 3-20 Cobertura primera antena.	32
Figura 3-21 Cobertura total.....	32
Figura 3-22 Porcentaje interferencias	33
Figura 3-23 Resultado del cálculo de interferencias.....	33
Figura 3-24 Interfaz modelo Okumura-Hata.	33
Figura 3-25 Interfaz modelo COST-231.....	34
Figura 3-26 Curvas recomendación UIT-R-1546.	36
Figura 3-27 Curvas recomendación UIT-R-1546.	36
Figura 3-28 Corrección por ángulo de despejamiento.....	37
Figura 3-29 Cálculo de la altura efectiva.....	38
Figura 3-30 Interfaz sistema de radiodifusión.	40
Figura 3-31 Interfaz servicio radio.....	40
Figura 3-32 Interfaz selección de parámetros de antena.	40
Figura 3-33 Interfaz cálculo del porcentaje de cobertura servicio radio	41
Figura 3-34 Campo eléctrico recibido y porcentaje de cobertura del sistema de radiodifusión.....	41
Figura 3-35 Porcentaje de cobertura simulación servicio radiodifusión.....	41
Figura 3-36 Angulo de despejamiento y atenuación propiciada por el ángulo de despejamiento.....	42
Figura 3-37 Angulo de despejamiento y atenuación propiciada por el ángulo de despejamiento.....	42
Figura 3-38 Interfaz cálculo del porcentaje de cobertura servicio radio.	42
Figura 4-1 Diagrama de Gantt.....	46

Tablas.

Tabla 3-1 Tabla de intensidades mínimas de campo. Recomendación UIT-412. _____ 39

Tabla 3-2 Intensidades de campo mínimas para el servicio de televisión en las bandas de frecuencia IV y V. _____ 39

Acrónimos

B

BR Oficina de Radiocomunicaciones.
BS servicios de radiodifusión.

D

dB decibelio.

F

FM frecuencia modulada.

G

GSM Global system for movil communication.
GUI interfaz gráfica de usuario.
GUIDE entorno de desarrollo GUI.

I

IGN Instituto Geográfico Nacional.

L

LOS Line of Sight- Línea de visión.

M

MDT mapas digitales del terreno.
MTN50 mapa topográfico nacional a escala 1:50.000.

P

P.R.A potencia radiada aparente.
PNOA Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

S

SIG sistemas de información geográfica.

U

UTM Universal Transverse Mercator.

1 Introducción

En la actualidad, los diversos sistemas de radiocomunicación requieren de herramientas de planificación y de cálculo de coberturas, debido a que facilitan mediante la reducción de tiempo y la optimización de los cálculos, la validación de emplazamientos y de estaciones base. A estas herramientas software, se le añade la abundante disponibilidad de datos cartográficos con altos niveles de resolución.

De esta realidad, nace la necesidad de que en el aprendizaje de los sistemas de radiocomunicaciones, se requieran entornos y herramientas con los cuales los alumnos puedan transferir los conceptos teóricos a procedimientos y conocimientos prácticos, a la vez de que se les va introduciendo en el manejo de este tipo de herramientas de planificación.

De aquí nace la motivación de implementar una herramienta con el fin de facilitar a los alumnos, un entorno práctico donde poder analizar y estudiar el fenómeno de la propagación de las señales radioeléctricas, en entornos variados y con diferentes sistemas de radiocomunicación (radiodifusión, radioenlaces, sistemas móviles).

Así, podríamos definir el enfoque del proyecto como meramente práctico, consistiendo en la implementación de una herramienta de cálculo de coberturas, que a la vez de fácil manejo, sea lo suficientemente potente como para poder realizar los cálculos pertinentes sobre diferentes sistemas de radiocomunicación y en diferentes escenarios.

A la hora de plantear este proyecto, se podrían destacar dos partes claramente diferenciadas y a la vez estrechamente relacionadas. En primer lugar, destacar la parte de implementación de una interfaz gráfica de usuario, con el fin de facilitar el uso de la herramienta y que esta sea lo más intuitiva e interactiva posible. Por otro lado la implementación de los distintos modelos de propagación para los sistemas de radiocomunicación que se incluirán en la herramienta, y mediante los cuales, podemos obtener los resultados necesarios para consolidar, de una manera gráfica y visual, los conocimientos adquiridos teóricamente.

Con el fin de que la herramienta sea lo más sencilla e interactiva posible, se implementará una interfaz gráfica de usuario (GUI) sobre un entorno de programación MATLAB, la cual, nos permitirá un control sencillo de la aplicación software, eliminando la necesidad de aprender un lenguaje o la escritura de comandos para el uso o ejecución de la aplicación.

Para ello se utilizará un entorno de desarrollo GUI (GUIDE), el cual, nos proporciona una herramienta de diseño de interfaces de usuario, con la posibilidad de diseñar esta gráficamente. A fin de ejercer un mayor control sobre el diseño, también se puede crear código de MATLAB que defina las propiedades y los comportamientos de todos los componentes de la interfaz.

Actualmente, la mayoría de las herramientas informáticas para el cálculo de coberturas radioeléctrica suelen estar basados en sistemas de información geográfica (SIG), y utilizan mapas digitales del terreno (MDT). En la aplicación a implementar, también se utilizarán este tipo de mapas digitales de terreno, los cuales se pueden obtener del IGN (Instituto Geográfico Nacional), pudiendo seleccionar un área de terreno del territorio español. El entorno de

trabajo MATLAB, el cual utilizaremos como herramienta y entorno de implementación de la aplicación, está preparado para la lectura de este tipo de archivo, y sus consiguiente transformación a mapa de bits, pudiendo de esta manera realizar las distintas operaciones necesarias para realizar los diferentes cálculos para cada punto del terreno.

Se ha implementado tres servicios distintos donde el alumno pueda realizar simulaciones. En primer lugar se ha desarrollado un sistema de radioenlace. Los modos de propagación utilizados se basan en la recomendación UIT-530. Para la herramienta se han seleccionado dos métodos distintos para el cálculo de las pérdidas de propagación, el primero de ellos es el modelo de las pérdidas en espacio libre, basado en la recomendación UIT-R-525. El segundo método tiene en cuenta el fenómeno de la difracción, provocada por obstáculos en el trayecto de la onda electromagnética. La recomendación seguida en este caso fue la UIT-R-526. Además de la selección del método de cálculo de las pérdidas de propagación, en este servicio se ha añadido la posibilidad de incorporar pérdidas adicionales debidas a condiciones meteorológicas adversas. En concreto, se permite añadir al modelo atenuaciones provocadas por gases atmosféricos y por meteoros.

El segundo sistema desarrollado es para realizar cálculos de cobertura sobre células móviles. Dentro de la herramienta se han implementado tres métodos posibles. El primer método es un método analítico ya utilizado en el apartado de radioenlaces, el modelo de las pérdidas en espacio libre, este modelo no es muy adecuado para entornos móviles, pero da una primera aproximación en el cálculo de la cobertura. Los otros dos métodos implementados son el modelo de Okumura-Hata y el modelo COST-231, ambos son modelos empíricos que tienen en cuenta el entorno de propagación de las ondas. Ambos modelos son más adecuados para el cálculo de la cobertura en una célula móvil que el modelo de pérdidas en espacio libre. Dentro de este modelo se permite realizar el cálculo de la cobertura de cada uno de los emplazamientos y las posibles interferencias que pudieran sufrir cada una de las antenas dentro de la misma zona territorial.

El último servicio desarrollado nos realiza el cálculo de la cobertura en sistemas de radiodifusión. En especial se ha desarrollado para los servicios de radio FM y televisión en el rango de frecuencias de la banda IV y V. El modelo usado para este sistema se basa en la recomendación UIT-1546 (predicción punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3000 MHz). Para realizar el cálculo de la cobertura se tuvo en cuenta las intensidades de campo eléctrico mínimas marcadas por las recomendaciones de cada uno de los servicios de radiodifusión. El campo eléctrico calculado en cada punto del terreno se basa en unas curvas marcadas por la recomendación, además se tuvo en cuenta una serie de correcciones relacionadas con la forma geodésica del terreno.

Una vez desarrollado los distintos servicios se diseñó una interfaz gráfica donde poder controlar los distintos simuladores de coberturas y donde apareciesen los resultados. Dentro de dicha interfaz se guía al usuario mediante métodos de control de errores y sucesivas ayudas con el fin de facilitar el uso de la herramienta. El hecho de que sea un interfaz de fácil uso y guiada, facilita al alumno centrarse en afianzar los conceptos teóricos, al no tener dificultad en el uso de la herramienta.

El testeo del software tuvo la finalidad de encontrar fallos en la programación. Este paso se realizó a lo largo de todo el proyecto con el fin de poder solventar todos los problemas y no introducir nuevos en la plataforma. Una vez finalizada la aplicación se iteró el proceso de testeo, comprobando y modificando todo aquello que no fuese correcto. Por último la aplicación fue testeada por una persona ajena al programador, con el fin de poder encontrar nuevos fallos y poder resolverlos.

La memoria se divide en tres capítulos principales. En el primero de ellos se explica cómo se ha desarrollado la interfaz gráfica de usuario mediante la herramienta GUIDE de MATLAB, además de cómo se han obtenido y utilizado los modelos digitales de terreno usados por la herramienta para el cálculo de la cobertura.

En el segundo capítulo encontramos las características principales de los tres sistemas realizados, las explicaciones físicas de las perturbaciones que afectan a cada uno de los servicios, así como los modelos o métodos utilizados por cada uno de estos sistemas para realizar el cálculo de la cobertura.

En el último capítulo se muestran las conclusiones del proyecto, las posibles líneas futuras de la aplicación y por último la división temporal y cronológica del proyecto.

2 Herramienta de cálculo de coberturas

2.1 Introducción

El objetivo del proyecto, ha sido realizar una herramienta de cálculo de coberturas con la que los alumnos puedan realizar simulaciones sobre mapas digitales de terreno y poder afianzar los conceptos teóricos aprendidos en diversos cursos de radiocomunicaciones. Con el fin de que la interacción con la herramienta sea lo más fácil e intuitiva posible se ha desarrollado un interfaz gráfica de usuario. Gracias a ella, el usuario podrá controlar la herramienta y obtener los resultados de las simulaciones de una manera más clara y precisa. En este capítulo también se matiza la manera de obtención de los mapas utilizados por la herramienta, describiendo su formato y sus características principales.

2.2 Interfaz Gráfica

Desde hace ya un tiempo y con la idea de simplificar el uso de programas informáticos para todo tipo de usuarios, se ha convertido en una práctica habitual el uso de metáforas visuales por medio de lo denominado interfaz gráfica de usuario (GUI), la cual, tiene como finalidad que el usuario interactúe y establezca un contacto mucho más intuitivo con el ordenador.

Una interfaz tienen como finalidad y objetivo, la comunicación de dos sistemas, los cuales de por sí, no podrían comunicarse. De esta definición, extrapolamos el concepto de interfaz gráfica de usuario, la cual tiene como finalidad, la comunicación y la interacción entre el humano y la máquina [1].

De los anteriores párrafos queda remarcada la importancia de la implementación de una interfaz gráfica de usuario, ya que gracias a ella, la utilización del presente software será simplificada, transformando la herramienta de cálculo de coberturas, en un programa de uso fácil e intuitivo. Estas características son muy deseadas, ya que se trata de un software enfocado para el aprendizaje de los sistemas de radiocomunicación, donde la sencillez de la herramienta, acelera el proceso de aprendizaje de dichos sistemas a los alumnos.

Como se introdujo con anterioridad, para el desarrollo de la interfaz gráfica se utilizará la herramienta GUIDE en el entorno de desarrollo MATLAB, con la cual, se puede crear interfaces gráficas de usuario de una manera rápida y sencilla, ya que dispone de todas las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o C++ [2].

En el programa desarrollado, se encontrarán distintas interfaces, cada una de ellas corresponderá a una subsección del programa y será en ellas donde se seleccionarán y añadirán los datos necesarios para realizar los cálculos y obtener los datos o resultados buscados.

La pantalla principal del programa consiste en una interfaz, en la cual se pueden seleccionar los distintos mapas obtenidos del IGN [3], una vez cargado el mapa, este se mostrará por pantalla. Además de la selección de mapa, en esta interfaz se encuentra la selección de los distintos sistemas de radiocomunicaciones tratados en el software y la posibilidad de obtener una representación tridimensional del mapa seleccionado con anterioridad. Dicha interfaz se describe en la figura 2-1.

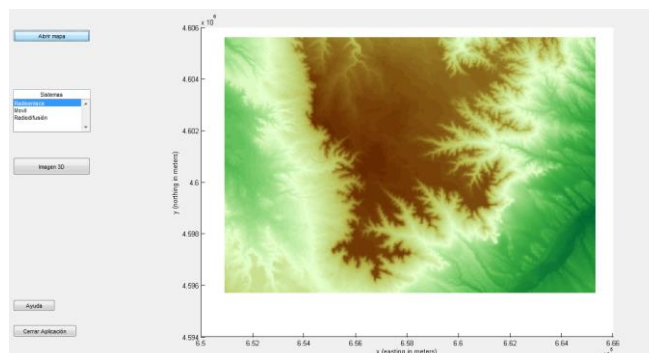


Figura 2-1 Pantalla principal del programa

Una vez elegido el mapa, podemos seleccionar entre tres tipos de sistemas diferentes: Radioenlace, Sistemas móviles y Sistemas de radiodifusión.

A lo largo de la explicación de cada uno de los servicios que dispone la herramienta, se desarrollará un apartado donde se explique las posibles opciones que dispone la herramienta y donde se mostrarán las interfaces que dispone cada sistema. Se visualizará las variables que se pueden introducir al sistema, así como, los distintos resultados que se pueden obtener.

En cada una de estas ventanas se ha añadido un botón de ayuda. Una vez pulsado la ayuda aparecerá una nueva interfaz, en la cual se explique paso por paso cada una de las funcionalidades de la ventana actual. En la figura 2-2 se muestra como es la ayuda proporcionada.

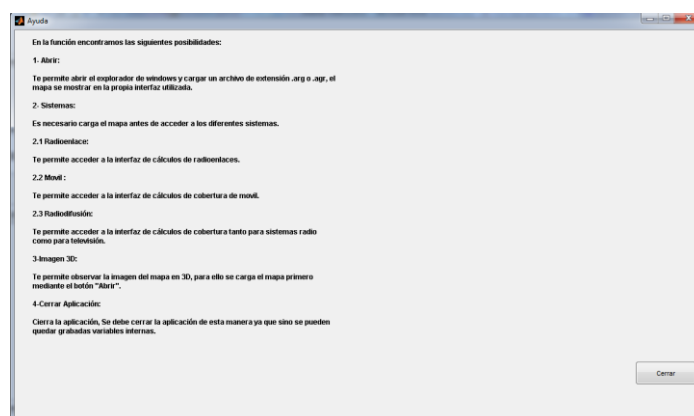


Figura 2-2 Ventana de ayuda

Cada una de las interfaces gráficas de usuario que se han diseñado, están pensadas para que el usuario pueda manejar el programa de una manera fácil e intuitiva, facilitando de esta manera, la asimilación de conceptos más complejos de una manera visual. De esta manera, los alumnos de cursos de sistemas de radiocomunicaciones podrán afianzar los contenidos teóricos de una manera mucho más eficiente, a la vez de que comienzan a tener toma de contacto con las herramientas de simulación de cálculo de coberturas.

2.3 Obtención de datos

2.3.1 Introducción

En la actualidad, la mayoría de las herramientas informáticas para el cálculo de coberturas radioeléctrica suelen estar basadas en sistemas de información geográfica (SIG) [4].

Un sistema de información geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés *Geographic Information System*) es una integración organizada de *hardware*, *software* y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

La tecnología de los sistemas de información geográfica puede ser utilizada para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, planificación de sistemas de radiocomunicaciones... .

Este tipo de sistemas, utilizan mapas digitales de terreno (MDT), lo cuales son una estructura numérica de datos que representan una distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. En concreto en este proyecto se han seleccionado mapas obtenidos en el IGN (Instituto Geográfico Nacional), donde se puede seleccionar distintos mapas de diversas zonas del territorio español [5] [6].

2.3.2 Formato de los planos

Las características de los modelos digitales de terreno que se han utilizado en la herramienta de cálculo de coberturas se describen a continuación:

El modelo digital del terreno utilizado es con paso de malla de 5 m, con la misma distribución de hojas que el MTN50. El MTN50 o mapa topográfico nacional a escala 1:50.000 se trata de la serie básica de la cartografía oficial de España [7]. Para mayor información consultar el Anexo I.

El modelo usa un formato de archivo ASCII matriz ESRI (asc). Sistema geodésico de referencia ETRS89 (en las Islas Canarias REGCAN95 compatible con WGS84) y proyección UTM en el huso correspondiente a cada hoja. En Canarias el huso UTM es el 28 mientras que los husos de la península ibérica corresponden son el 29,30 y 31. Según la hoja de que se trate, el MDT05 se ha obtenido de una de las dos siguientes formas: por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 a 50cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura donde fuera viable, o bien por interpolación a partir la clase terreno de vuelos LIDAR del PNOA.

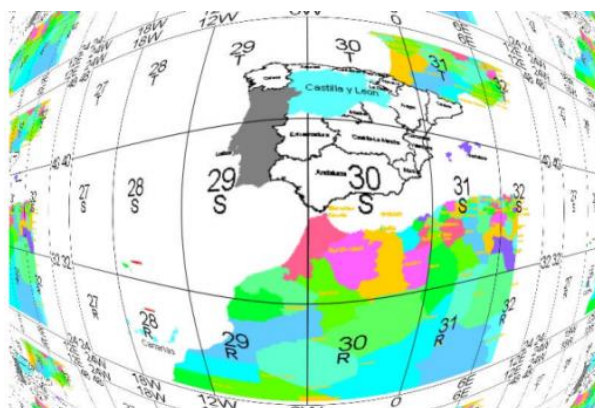


Figura 2-3 Huso UTM en España

Para una mayor información sobre los sistemas geográficos referenciados y sobre la cartografía utilizada consulte el Anexo I.

Como ya adelantamos en la introducción, para poder realizar las operaciones pertinentes sobre esta estructura de datos, utilizaremos la plataforma de trabajo de MATLAB, la cual tiene funciones específicas para poder leer este tipo de formatos.

En especial, podemos utilizar la función "arcgridread" para transformar la información de los archivos con formato .agr y .asc en dos matrices distintas:

La primera de ellas, se trata de una matriz donde se localiza la altura correspondiente a cada uno de los puntos del terreno.

En la segunda matriz se encuentra información relacionada a la localización geográfica del mapa utilizado.

El formato de los archivos ASCII descargado del IGN son los siguientes:

```
NCOLS ncols
NROWS nrows
XLLCENTER xmin
YLLCENTER ymin
CELLSIZE size
NODATA_VALUE nodata
z11 z12 z13 z14.....z1ncols
...
...
znrows1 znrows2 znrows3...znrowsncols
```

Dónde:

- NCOLS es el número de nodos por fila
- NROWS es el número total de filas,
- XLLCENTER y YLLCENTER son las coordenadas suroeste de la malla.
- CELLSIZE es el paso de malla
- NODATA VALUE es el valor asignado a los nodos para los que no se dispone de cota conocida.

Las cotas de la malla están expresadas en metros, con un espacio en blanco entre valor y valor, y describen el terreno de norte a sur y de oeste a este.

Es importante remarcar que el sufijo CENTER indica que las coordenadas describen la posición del centro del pixel. Cuando el sufijo es CORNER indica la posición de la esquina inferior izquierda del mismo.

Para poder realizar una representación gráfica del mapa, sobre la plataforma de trabajo MATLAB, podemos utilizar la función “mapshow”, a la cual se le debe pasar la matriz de alturas y la matriz con la información geográfica, además añadiendo la instrucción “view(3)”, podemos realizar una representación 3D, del mapa seleccionado [8].

En la figura 2-4 se muestra una representación 3D de uno de los mapas obtenidos del IGN:

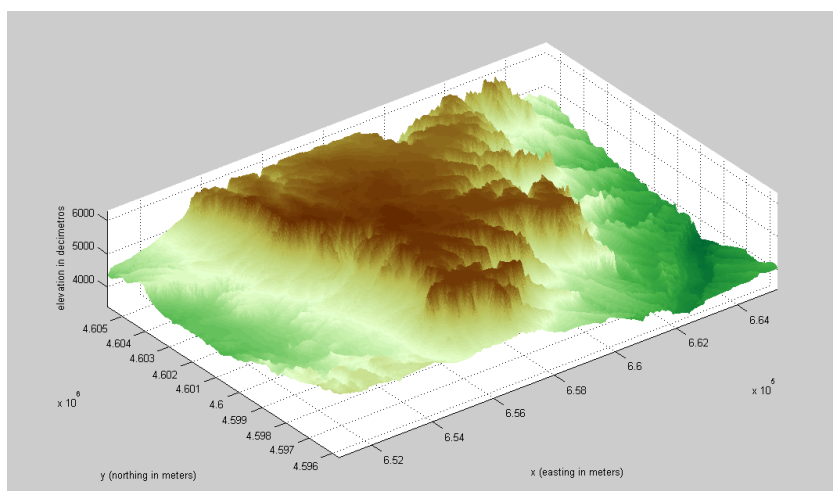


Figura 2-4 Representación tridimensional mapa IGN

Por último y para finalizar este apartado, es importante comentar que los mapas adquiridos en el IGN, tienen una precisión muy superior a la necesaria para mostrar a los alumnos los distintos fenómenos que se producen en los diversos sistemas de radiocomunicaciones elaborados en la herramienta implementada. Por ello, con la finalidad de que el número de operaciones se reduzca y por consiguiente, el tiempo de las simulaciones, se realizará un diezmado de los distintos mapas. De esta manera en vez de tener mapas con un paso de malla de 5m, tras el diezmado, se obtendrán mapas de un paso de malla de 25 m [9].

3 Sistemas de radiocomunicaciones

3.1 Introducción

Los sistemas de radiocomunicaciones se diferencian del resto debido principalmente a que el canal de transmisión es radio, es decir la atmosfera, la cual tiene unas características propias que la diferencian del resto de medios de propagación. Se trata de un medio hostil en donde se producen diversas perturbaciones a la señal y por tanto se debe describir lo mejor posible, con el objetivo de poder propagar las ondas electromagnéticas de una manera eficiente y segura.

La propagación de ondas electromagnéticas en medios reales se podría estudiar mediante las ecuaciones de Maxwell, con las condiciones de contorno necesarias. En la práctica, la mayoría de estos estudios son inviables debido a la gran complejidad que suponen, lo que propicia la utilización de modelos simplificados para la predicción de las pérdidas de propagación, así como de modelos empíricos o tablas obtenidas a partir de mediciones.

A la hora de caracterizar una onda electromagnética se ha de tener en cuenta diversos factores, desde la situación del trayecto de propagación respecto a los obstáculos, las propiedades físicas del medio, hasta la frecuencia y polarización de la propia onda.

Como se comentó en el apartado anterior, en la herramienta implementada se ha desarrollado tres tipos distintos de sistemas de radiocomunicaciones, con el fin de poder realizar simulaciones y diversos cálculos, para que los alumnos puedan mediante una herramienta visual, afianzar los conceptos estudiados de forma teórica en asignaturas y cursos de sistemas de radiocomunicaciones. Estos sistemas eran los siguientes: Radioenlaces, Sistemas Móviles y Sistemas de radiodifusión.

A continuación, se realizará una descripción tanto del sistema, como de que parámetros y características que se han tenido en cuenta a la hora de realizar la implementación de los sistemas. Además, también se mostrará diversos resultados obtenidos con la herramienta desarrollada. Para ello basaré mis explicaciones en diversas recomendaciones de la UIT-R, ya que son en estas, donde se explica paso por paso como realizar las distintas operaciones, como para conseguir los resultados en los simuladores de cálculo de coberturas actuales.

3.2 Radioenlace

3.2.1 Introducción

Se denomina radioenlace a la conexión de terminales de telecomunicaciones mediante ondas electromagnéticas. Estos terminales están fijos y situados sobre la superficie terrestre. Los radioenlaces transportan señales multiplexadas, proporcionando la posibilidad de transmitir una gran cantidad de información, con características de calidad y disponibilidad determinadas. Típicamente estos enlaces se explotan para frecuencias mayores a 1 GHz, por lo que podemos considerarlos como radioenlaces de microondas.

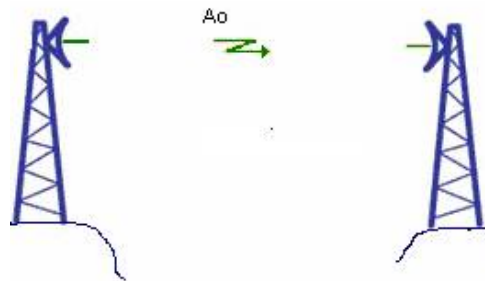


Figura 3-1 Representación radioenlace

En los sistemas de radioenlaces se suele utilizar lo denominado planes de frecuencia, gracias a los cuales, se pueden optimizar el espectro, reducir las interferencias y facilitar la compatibilidad de los equipos. La localización de los radioenlaces se hace básicamente en altos puntos de la orografía del terreno, ya que estos sistemas solo se realizan en el caso de que exista LOS (Line of Sight- Línea de visión), lo cual implica que entre los dos puntos del radioenlace exista visión directa [10].

Para realizar el correcto diseño de un radioenlace, es necesario que en el recorrido entre enlaces se produzca una adecuada propagación durante cualquier época del año, así pues, se deberá tener en cuenta las posibles condiciones atmosféricas de la región, así como la altura y ubicación de los distintos obstáculos que puedan existir en el trayecto.

De aquí concluimos que el problema se reduce al cálculo de las pérdidas básicas: Espacio libre, difracción, desvanecimiento, ángulos, precipitaciones, gases.

La metodología en el diseño de un radioenlace podríamos resumirla en los siguientes pasos [11]:

1. Análisis de la geometría del perfil: determinar la altura de las antenas para que no haya difracción (condiciones de Espacio Libre).

2. Evaluar Pérdidas Adicionales debidas a la atmósfera:
 - Desvanecimiento factor k
 - Atenuación debida a gases atmosféricos

3. Cálculo atenuación por lluvia

4. Estudio de la despolarización

En el sistema planteado, no se han tenido en cuenta las perdidas por la despolarización de las ondas, si teniendo en cuenta la geometría del perfil, las perdidas atmosféricas y las perdidas por hidrometeoros.

En la herramienta se han añadidos dos tipos distintos de recomendaciones, la primera realiza los cálculos correspondientes a las perdidas en espacio libre, para esto se ha seguido los pasos descritos en la recomendación UIT-525 [12]. La segunda recomendación, sirve para realizar los cálculos teniendo en cuenta la difracción, para ello se ha seguido la recomendación UIT-526, en concreto se ha implementado el método de Bullington, el cual tiene en cuenta la orográfica del terreno. La descripción de los pasos realizados se localiza en el Anexo II [13].

Como se explica en el párrafo anterior, una de las recomendaciones tiene como objetivo, plasmar las pérdidas provocadas por la difracción así que a continuación se realizará una pequeña descripción sobre el concepto y las causas de este fenómeno.

3.2.2 Difracción

El fenómeno de la difracción consiste en la desviación de una onda electromagnética cuando incide sobre un obstáculo. La presencia del obstáculo no impedirá que la onda siga su trayecto, pero el nivel de señal será reducido en mayor o menor medida y será inferior al recibido si no hubiera existido dicho obstáculo.

Así, las perdidas debidas a la difracción deberán añadirse a las pérdidas de propagación en espacio libre.

$$L_{EL} = (4\pi \frac{d}{\lambda})^2 \quad (1)$$

$$L_{EL}(dB) = 20\log(4\pi \frac{d}{\lambda}) \quad (2)$$

Para entender el fenómeno de la difracción podemos recurrir al principio de Huygens, el cual dice que cada punto de frente de ondas se convierte en un nuevo foco emisor individual. Para un estudio detallado de la difracción se recurren a las elipsoides y zonas de fresnel, las cuales se encuentran claramente detalladas en el Anexo II. En concreto a la hora de diseñar sistemas de radioenlaces, nos interesa que estos, estén en condiciones de visión directa (LOS). Según la recomendación de pérdidas por difracción se considera que la propagación se efectúa con visibilidad directa, es decir, que los fenómenos de difracción son despreciables, en el caso de que no exista ningún obstáculo dentro de la primera elipsoide de fresnel, ya que es en esta donde se concentra la mayor parte de la energía de la onda. En el caso de sistema de

radioenlaces se puede llegar despreciable las pérdidas por difracción si estos obstáculos no perturban el 60% de la primera elipsoide [14].

Como se introdujo con anterioridad, se ha implementado el método de Bullington con la finalidad de mostrar las pérdidas por difracción.

Este método debería utilizarse cuando no hay información a priori en lo que respecta a la naturaleza del trayecto de propagación o de las posibles obstrucciones del terreno. Este caso es típico cuando se utiliza un programa de ordenador para obtener los perfiles a partir de una base de datos de alturas del terreno de forma totalmente automática, sin una inspección individual de las características del trayecto. El método ofrece resultados fiables para todo tipo de trayectos, visión directa o transhorizonte, rugoso o liso, o sobre el mar o grandes extensiones de agua [13].

3.2.3 Atenuaciones

Las posibles atenuaciones que se pueden encontrar a la hora de realizar la planificación de un radioenlace dentro de nuestra herramienta son de tres tipos: atenuación por los gases atmosféricos, atenuación por lluvia y atenuación por nubes o niebla.

Atenuación por gases

La atenuación para los gases atmosféricos se presenta para frecuencias superiores a los 10 GHz, debido principalmente a los fenómenos de absorción del oxígeno y del vapor de agua, por lo que deberá incluirse al cálculo de las pérdidas totales de propagación.

El cálculo de la atenuación viene dado por el producto de una atenuación específica y la distancia del trayecto que recorre la onda. Para el cálculo de esta atenuación específica se puede recurrir a la recomendación UIT-R-P 676 [15], donde se explican dos métodos distintos para realizar este cálculo. Estos dos métodos tienen la finalidad de obtener la atenuación específica causada por el oxígeno y por el vapor de agua, la suma de ellas supondrá la atenuación específica total:

- El método raya por raya, que permite calcular la atenuación debida a los gases en frecuencias hasta 1000 GHz con gran exactitud.
- El segundo método consiste en una aproximación de la atenuación causada por los gases en la gama de frecuencias de 1 a 350 GHz, utilizando algoritmos más simplificados con el fin de realizar una estimación rápida y con una variedad limitada de configuraciones geométricas.

Para la herramienta se ha implementado el segundo método. La selección de este método es debida a que en el programa solo tratamos la topología de trayectos terrenales y que la frecuencia de los trayectos terrenales no superará nunca los 54 GHz.

En la figura 3-2 se muestra una gráfica de la atenuación específica de los gases.

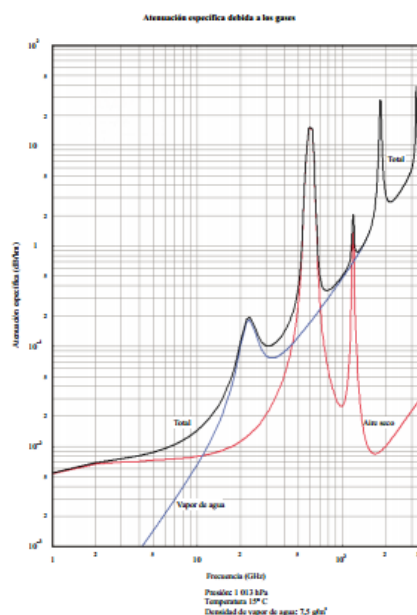


Figura 3-2 Atenuación específica de los gases.

Los pasos y operaciones referentes al método del cálculo de las atenuaciones por gases, implementadas en la herramienta software, se describen en el Anexo II.

Atenuación por meteoros

El principal motivo de la atenuación por meteoros sobre las ondas electromagnéticas, es la dispersión de la energía, propiciada por las gotas de agua presentes en el camino de la propagación de la onda. Estas pérdidas pueden ser relevantes para frecuencias mayores a 10 GHz en caso de la lluvia, frecuencias para las cuales las longitudes de ondas correspondientes son comparables a las dimensiones de las gotas.

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se pueden seguir los pasos de recomendación UIT-530 [16]. En primer lugar se ha de calcular la intensidad de precipitaciones R superada durante el 0.01% del tiempo. Si no se dispone de información de este tipo se puede obtener una estimación utilizando la información que aparece en la recomendación UIT-R 837 [17]. Esta información no está contenida en la herramienta software.

Una vez obtenida la intensidad de precipitación, junto con la frecuencia y la polarización se calculará la atenuación específica de la lluvia, estos cálculos se encuentran en la recomendación UIT-R-P 838 [18]. La atenuación por lluvia será el producto de la atenuación especificada calculada por una distancia efectiva. La distancia efectiva se define en la recomendación UIT- 530, su uso se debe a que la intensidad de lluvia no será constante a lo largo del trayecto de la onda electromagnética. Una vez calculada la atenuación, se debe calcular la atenuación excedida para otros porcentajes de tiempo p entre el margen de 0.001 % y el 1 %.

Todos los cálculos realizados para el cálculo de la atenuación por lluvia vienen indicados en el Anexo II.

Para el cálculo de la atenuación por nubes y niebla, al igual que para el de la atenuación por lluvia, se debe calcular una atenuación específica, las operaciones y pasos que se han de seguir para obtener su valor se indican en la recomendación UIT-840 [19]. Tras el correspondiente cálculo, la atenuación total será el producto de la atenuación específica y la distancia del trayecto del radioenlace.

Las operaciones necesarias para realizar el cálculo de la atenuación por niebla y nubes se encuentran en el Anexo II.

3.2.4 Interfaz y resultados del servicio de radioenlace

Dentro de la herramienta de cálculo de cobertura desarrollada, podemos elegir entre tres sistemas distintos. En el caso de seleccionar el radioenlace se nos mostrará la ventana de la figura 3-3, donde se pueden introducir los datos técnicos y geográficos de los dos emplazamientos que van a formar el radioenlace.

Figura 3-3 Interfaz radioenlace.

La localización geográfica de cada uno de las antenas se seleccionara de manera interactiva, clicando sobre la representación tridimensional del terreno, como se muestra en la figura 3-4.

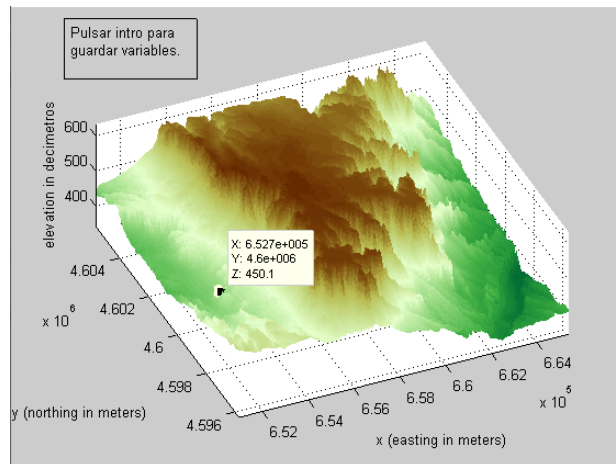


Figura 3-4 Selección de emplazamiento en mapa tridimensional.

Una vez adquiridos los datos referentes a las dos antenas se pueden incluir atenuaciones por lluvia, por gases o por nubes y niebla. Estas se presentan en una nueva ventana mostrada en la figura 3-5.

Figura 3-5 Interfaz de las atenuaciones.

Se pueden seleccionar las recomendaciones UIT-525 [12] o UIT-526 [13], para realizar los cálculos. Los resultados de la simulación se presentan en una ventana distinta. Esta ventana se muestra en la figura 3-6, que se presenta a continuación.

Figura 3-6 Interfaz de los resultados del radioenlace.

En la ventana de resultado, se incluye una posible representación del perfil del trayecto entre las dos antenas y su situación geográfica sobre el mapa seleccionado. En la figura 3-7 se muestra dicha representación para un enlace con visión directa.

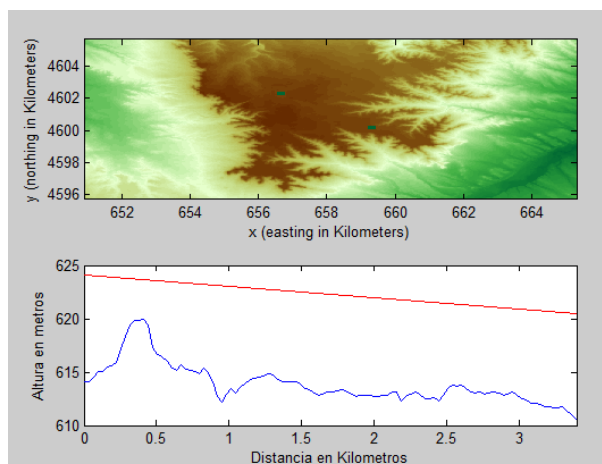


Figura 3-7 Localización de antenas en el mapa / Perfil del terreno.

3.3 Sistemas de Comunicaciones móviles

3.3.1 Introducción

Un sistema de comunicaciones móviles se define como aquel enlace entre dos terminales, de los cuales al menos uno, debe estar en una localización indeterminada, pudiendo ser el otro un terminal fijo (estación base).

En los sistemas de comunicaciones móviles, el canal radio introduce limitaciones mucho más importantes que en los radioenlaces, el principal motivo de este hecho es que en la mayoría de los casos no se puede garantizar la visibilidad directa entre los equipos. Las causas de esto son la movilidad de los terminales y la altura de las antenas, las cuales suelen estar situada muy cerca del suelo y rodeada de entornos abruptos (edificios, montañas...).

Esta carencia de visibilidad directa afecta directamente a la señal recibida provocando fuertes atenuaciones durante su propagación, debido a fenómenos como la difracción y la reflexión. Además debido a las diversas reflexiones, el terminal receptor puede recibir múltiples contribución de la señal por diferentes caminos, propiciando un comportamiento aleatorio del canal radio y por consiguiente aumentado la complejidad de su análisis.

La atenuación de las ondas radioeléctricas en entornos móviles, es completamente dependiente del entorno geográfico. No se presentará las mismas pérdidas de propagación en un entorno rural que en un entorno urbano. Así pues, se podría considerar que las pérdidas de propagación serán proporcionales a un factor d^n donde $2 < n < 4$ aproximadamente.

Para la evaluación de dichas atenuaciones existen una serie de métodos, teóricos e empíricos que aproximan las pérdidas de propagación en función de una serie de parámetros como

podieran ser la frecuencia, la altura de las antenas, tanto emisoras como receptoras, la distancia o el tipo de terreno.

A la hora de implementar la herramienta de cálculos de cobertura se ha desarrollado tres métodos distintos, el primer de ellos se trata del modelo de pérdidas en espacio libre detallado en la recomendación UIT-525, se trata de un modelo teórico en el cual, no se tiene en cuenta la variabilidad del entorno geográfico, ni la altura de las antenas, ni la mayoría de los fenómenos que aparecen en la propagación por el canal radio.

El segundo modelo desarrollado es el modelo de Okumura-Hata, el cual, se trata de un modelo empírico basado en una serie de curvas normalizadas, de las cuales se desarrollaron expresiones numéricas, incluyendo una serie de correcciones habituales en entornos de comunicaciones móviles. El modelo tiene en cuenta el tipo de entorno donde se produce la emisión de las ondas radioeléctricas y la altura de las antenas, tanto como la de emisor como de recepción.

Por último, el tercer modelo que se ha programado es el COST-231, el cual, se trata de una adaptación del modelo de Okumura-Hata, propiciado por la necesidad de incluir el rango de frecuencias de 1500-2000 MHz, necesario desde la implantación de los sistemas 3G.

Las implementaciones de los distintos modelos están explicadas en el Anexo III. Ahora se desarrollará una pequeña explicación de distintos modelos utilizados en la planificación de sistemas de comunicaciones móviles, explicando sus principales características y limitaciones y dando mayor importancia a los tres métodos implementados en nuestra herramienta.

3.3.2 Pérdidas en espacio libre

Como se introdujo con anterioridad el primer método implementado en la herramienta software, se trata del método del cálculo de atenuación en espacio libre.

Las pérdidas en espacio libre se definen en las ecuaciones (1) y (2).

Como se observa por la definición, en este método se tiene en cuenta la distancia entre el emisor y el receptor y la frecuencia a la que el sistema trabaja, no teniendo en cuenta parámetros como la altura de las antenas o el entorno donde se emite la onda electromagnética. En la figura 3-8 se muestra una representación de la atenuación en función de la distancia y para dos frecuencias distintas.

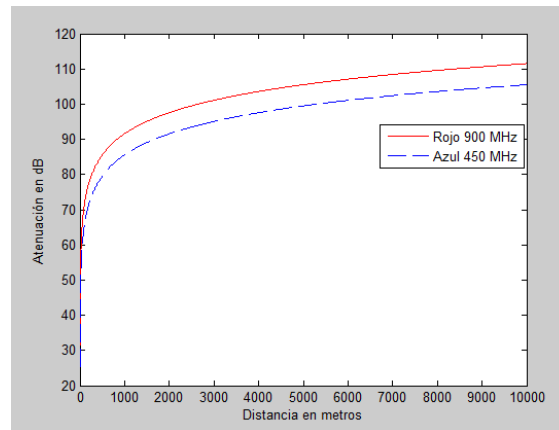


Figura 3-8 Pérdidas en espacio libre para dos frecuencias distintas.

Así, podríamos considerar este método como una mala aproximación para realizar el cálculo de la cobertura en un sistema de comunicaciones móviles, pero podríamos utilizarlo para realizar una primera aproximación de la planificación de sistema.

Para mayor información de cómo se ha implementado el método consultar el Anexo III.

3.3.3 Método de Okumura-Hata

El segundo modelo correspondía al modelo de Okumura-Hata, el cual, con el fin de poder informatizar el método, desarrolló una serie de expresiones numéricas a partir de las curvas normalizadas, incluyendo correcciones típicas en entornos móviles.

En las figuras 3-9 y 3-10 se muestran curvas típicas del modelo de Okumura-Hata, las cuales han sido obtenida de la recomendación UIT-529 [20].

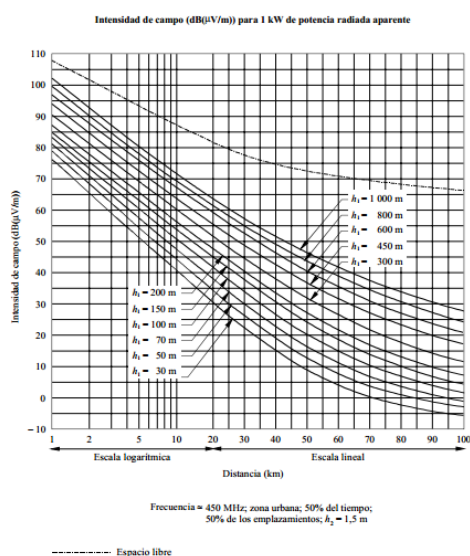


Figura 3-10 Curvas modelo Okumura-Hata.

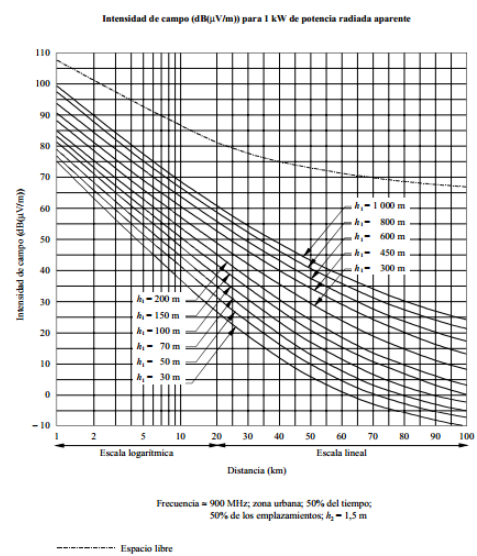


Figura 3-9 Curvas modelo Okumura-Hata.

Tras observar las curvas podemos observar que tanto la altura de las antenas, como la frecuencia y como la distancia son factores influyente en los cálculos.

Además, a la hora de realizar las expresiones numéricas, se tuvo en cuenta los distintos entornos donde se puede emitir la onda radioeléctrica. El modelado del entorno se realiza por medio de correcciones. Dichas correcciones se incluyen en el Anexo III.

3.3.4 Método COST-231-Hata

El tercer método implementado, se basa en unas correcciones del modelo de Okumura-Hata, que tienen como finalidad adaptar el método, para poder trabajar con rangos de frecuencias de hasta 2 GHz, necesarios en los sistemas 3G de comunicaciones móviles.

En la figura 3-11 se muestra una imagen donde se muestra un entorno urbano típico, en donde se podría aplicar la aproximación del método COST-231 [11] para el cálculo de la atenuación:

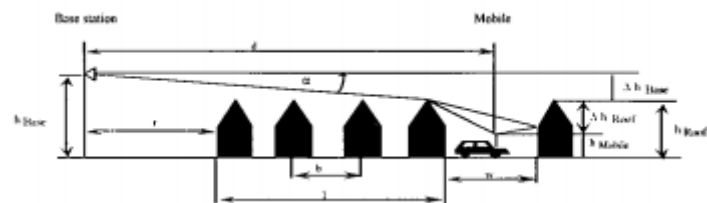


Figura 3-11 Entorno de propagación urbano

El método COST-231, es adecuado para extensas células de sistemas móviles, no siendo adecuado por ejemplo para el sistema de comunicación personal (PCS) utilizado en los países de América del Norte, ya que el radio de las células son del orden a 1km.

3.3.5 Modelo de la tierra plana

El modelo de la tierra plana consiste en un método teórico aplicable para distancias cortas:

Su ecuación de transmisión es la siguiente:

$$P_R = P_T G_T G_R (h_1 h_2)^2 \frac{1}{d^4} \quad (3)$$

De la ecuación, podemos sonsacar diversas propiedades, la primera de ellas es que el modelo es completamente independiente de la frecuencia utilizada, la siguiente propiedad es que es

un modelo dependiente de la altura de las antenas y que la atenuación aumenta con la distancia a la cuarta.

El principal inconveniente de este método es que además de ser independiente de la frecuencia de la señal, es independiente del entorno donde se realiza la emisión de la onda radioeléctrica.

3.3.6 Modelo de Egli

El modelo de Egli es una continuación del modelo de la tierra plana, en el cual se tiene en cuenta la frecuencia.

Su ecuación de transmisión es la siguiente:

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{h_1 h_2}{d^4} \right)^2 \left(\frac{40}{f^2} \right)^2 \quad (4)$$

Al igual que el modelo de la tierra plana se trata de un método con el inconveniente de ser completamente independiente del entorno donde se emite la onda.

Una vez comentado los distintos métodos desarrollados en la aplicación software, se llevará a cabo la explicación de las partes de cálculo de la cobertura y del cálculo de la interferencia que se desarrolló en el programa.

3.3.7 Cálculo de coberturas

Una vez seleccionado el sistema móvil dentro de la herramienta software, se nos da la posibilidad de seleccionar los distintos parámetros característicos de cada uno de los emplazamientos, estos parámetros son:

- Altura de la antena transmisora.
- Potencia transmitida
- Localización del emplazamiento.
- Tipo de sectorización:
 - Antenas omnidireccionales.
 - Antenas sectorizadas 120°.
- Frecuencia (en caso de antena omnidireccional) o las 3 frecuencias (en caso de la antena sectorizada 120°).

Una vez elegidos los parámetros de las antenas se seleccionará uno de los 3 métodos especificados con anterioridad. Para cada uno de los métodos se podrán realizar los cálculos de cobertura para cada una de las frecuencias seleccionadas en la sección de parámetros de antenas. Con la finalidad de calcular un porcentaje de cobertura, se deberá añadir dos parámetros específicos del terminal receptor:

- Altura del terminal en recepción.
- Sensibilidad del terminal en recepción.

Para estos parámetros se llevara a cabo el conjunto de operaciones necesarias para realizar el cálculo de la cobertura. Determinaremos que una zona del terreno tiene cobertura si la potencia de la onda radioeléctrica en ese punto es mayor a la sensibilidad mínima del terminal en recepción.

$$Potencia_{recepción} > Sensibilidad \quad (5)$$

Como se especificó en la introducción, la señal transmitida va ser fuertemente atenuada por diversos fenómenos como la difracción y la reflexión, estos desvanecimientos de señal pueden caracterizarse en dos tipos distintos: desvanecimientos lentos y desvanecimientos rápidos, los cuales se definen en el Anexo III [21].

Para intentar de alguna manera tener en cuenta estos desvanecimientos lentos y poder fijar una zona de cobertura, se suele añadir un margen de protección estadístico, el cual tiene en cuenta el porcentaje de emplazamientos y el porcentaje en tiempo donde exista recepción correcta de la señal. De no añadirse este margen de protección se tiene una intensidad de campo media para el 50% de los emplazamientos y para el 50% del tiempo.

$$\Delta E = \sqrt{(K_L \theta_L)^2 + (K_T \theta_T)^2} \quad \text{en dB.} \quad (6)$$

- θ_L : desviación estándar de la distribución log-normal para la localización.
- θ_T : desviación estándar de la distribución log-normal para el tiempo.
- K_L : coeficiente de normalización para el porcentaje de ubicaciones.
- K_T : coeficiente de normalización para el porcentaje de tiempo.

Así pues, a la hora de realizar el cálculo de coberturas y determinar la zona de coberturas hay que tener en cuenta el margen estadístico que tenga en cuenta tanto el porcentaje de ubicaciones como el porcentaje de tiempo [21].

3.3.8 Cálculo de la interferencia

El último apartado que se ha de especificar en el desarrollo del sistema de comunicaciones móviles implementado en la herramienta, consiste en el cálculo de las interferencias.

Para este cálculo es necesario haber realizado con anterioridad el cálculo de la cobertura de cada una de las antenas. Una vez realizado este cálculo se han de especificar dos parámetros para comenzar a realizar la simulación. El primero de estos parámetros se trata del número de emplazamiento para el cual se quiere calcular las interferencias. El segundo parámetros se trata del margen de protección especificado. Este margen de protección variará dependiendo del tipo de tecnología empleada, por ejemplo para GSM es de unos 9 dB [11].

Una vez introducidos esos parámetros, se llevara a cabo la simulación, en la cual, dependiendo de si se trata de una emplazamiento cuya antena es omnidireccional o sectorizada se mostrarán distintos resultados. En caso de tratarse de una antena omnidireccional se muestra el porcentaje de interferencia para la frecuencia de esa antena. En caso de tratarse de un emplazamiento con sectorización de 120°, se muestra el porcentaje de interferencia para cada una de las tres frecuencias de la sectorización.

Para realizar el cálculo del porcentaje de la interferencia se realizara los siguientes pasos:

En primer lugar se encontrará todos los puntos del terreno donde la relación señal interferencia sea mayor a la especificada por el usuario.

$$\frac{C}{I} > \frac{C}{I_{min}} \quad (7)$$

Tras ello se buscará cuáles de esos puntos se corresponde con la zona de cobertura del emplazamiento.

$$\frac{C}{I} > \frac{C}{I_{min}} \in \text{Zona de cobertura} \quad (8)$$

El porcentaje será el número de puntos que cumplan con el requisito anterior dividido por el número de puntos totales dentro de la zona de cobertura.

3.3.9 Interfaz y resultados del servicio de comunicaciones móviles

En la herramienta implementada, se permite realizar simulaciones para el cálculo de la intensidad del campo eléctrico y de la cobertura para sistema de comunicaciones móviles. El cálculo de la cobertura se va realizar con tres métodos distintos, los cuales fueron explicados en el apartado 3.2.

La ventana principal del servicio móvil en la herramienta, permite seleccionar el número de antenas transmisora que se quiere utilizar para realizar la planificación de la cobertura sobre el terreno, acceder a la selección de sus parámetros técnicos y su posición geográfica. Además te permite elegir el tipo de método para realizar las operaciones necesarias para el cálculo de la cobertura. En la figura 3-12 se muestra la interfaz descrita.

Figura 3-12 Interfaz principal de sistemas móviles.

La interfaz correspondiente a la selección de los parámetros de las antenas se muestra en las figuras 3-13 y 3-14. En ellas se puede seleccionar desde parámetros como la potencia de emisión hasta la sectorización de la antena, seleccionado en cada caso las frecuencias necesarias.

Figura 3-14 Parámetros de los emplazamientos móviles antena omnidireccional.

Figura 3-13 Parámetros de los emplazamientos móviles antena sectorizada 120°

Dependiendo del método de cálculo seleccionado, nos encontraremos con una interfaz u otra. En el caso de elegir el método de pérdidas en espacio libre, deberemos seleccionar una serie de parámetros genéricos relacionados con los terminales móviles. En la figura 3-15 se muestra una representación de la ventana. En la figura se distinguen dos apartados los cuales van a ser compartidos por las ventanas de los métodos Okumura-Hata y COST-231. Esto es el cálculo de la cobertura y el cálculo de las interferencias.

Figura 3-15 Interfaz método de pérdidas en espacio libre

A continuación se muestra un ejemplo para el cálculo de la cobertura. En primer lugar hemos seleccionado dos antenas con parámetros de potencia y ganancia distintos. En segundo lugar se introducen los parámetros característicos a los terminales móviles. Los resultados obtenidos tras el cálculo se mostrarán en la aplicación de la siguiente manera:

- Se mostrará el porcentaje total cobertura sobre el mapa de forma numérica. En caso de seleccionar una antena, también se mostrará el porcentaje individual de esa antena. En la figura 3-16 se muestra los resultados para el caso dado.
- Se mostrará una serie de imágenes con la información de la intensidad de campo eléctrico, atenuación, potencia recibida y cobertura suministrada por cada una de las antenas en cada punto del terreno. También se mostrará la cobertura total. En las figuras 3-17,3-18,3-19 3-20 y 3-21 se muestran estos resultados del ejemplo descrito.

Figura 3-16 Porcentaje de cobertura.

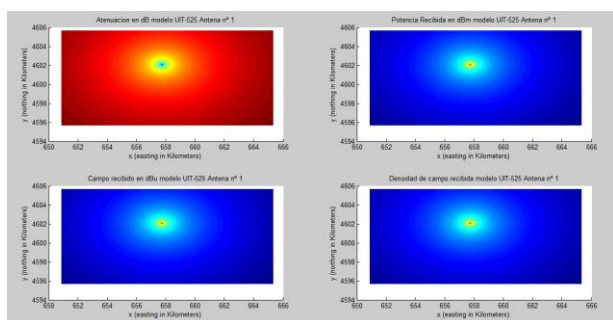


Figura 3-18 Atenuación, Potencia de recepción, Campo recibido/ Densidad de campo recibida en cada punto del terreno. Antena1.

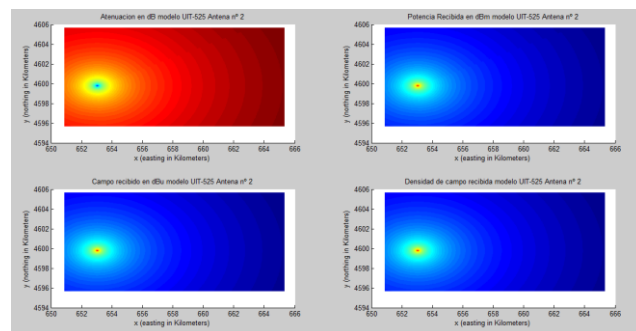


Figura 3-17 Atenuación, Potencia de recepción, Campo recibido/ Densidad de campo recibida en cada punto del terreno. Antena 2.

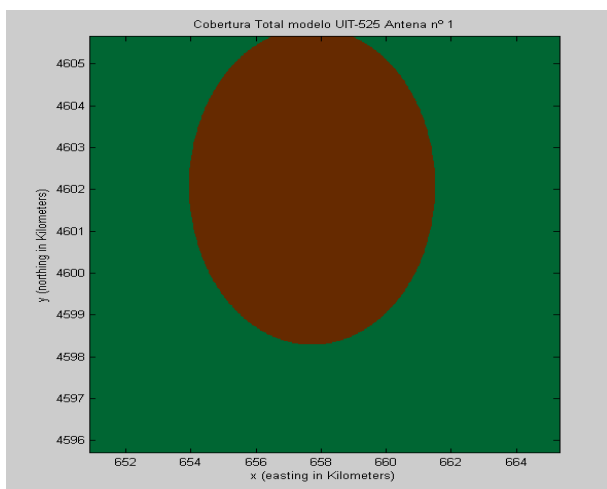


Figura 3-20 Cobertura primera antena.

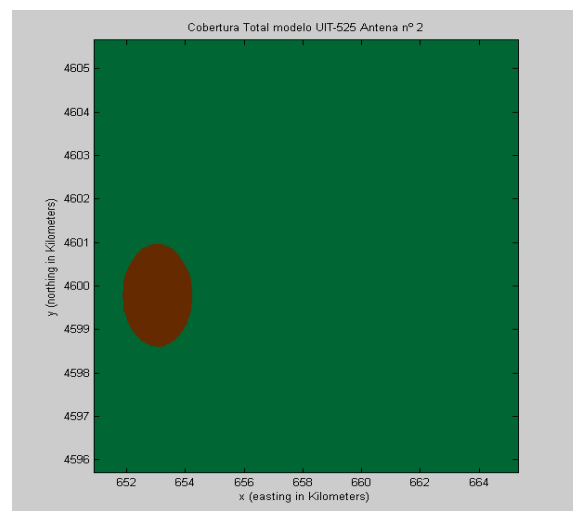


Figura 3-19 Cobertura segunda antena.

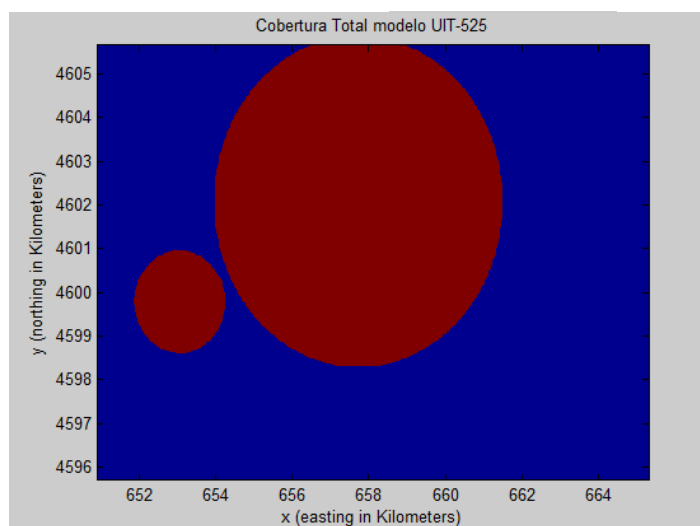


Figura 3-21 Cobertura total

Tras el cálculo de la cobertura de cada uno de los emplazamientos, se ha desarrollado una opción de calcular la interferencia provocada a cada una de las antenas por el resto de los emplazamientos del mapa. Para calcular la interferencia sobre una antena, se ha de seleccionar el número de antena y la relación de protección en dB.

Una vez realizado el cálculo se mostrará el porcentaje de interferencia. En el caso de que la antena sea sectorizada 120º se mostrará la interferencia para cada una de las frecuencias seleccionadas en los parámetros de la antena. En la figura 3-22 se muestra un ejemplo y en la figura 3-23 se muestra una representación gráfica de la posible interferencia. En este caso se mide la interferencia que provoca la antena sectorizada sobre la antena omnidireccional.

Interferencias

Nº Antena

Relacion de Protección (dB)

Antena omnidireccional

% Interferencia

Antena Sectorizada

% Interferencia frec1

% Interferencia frec2

% Interferencia frec3

Figura 3-22 Porcentaje interferencias

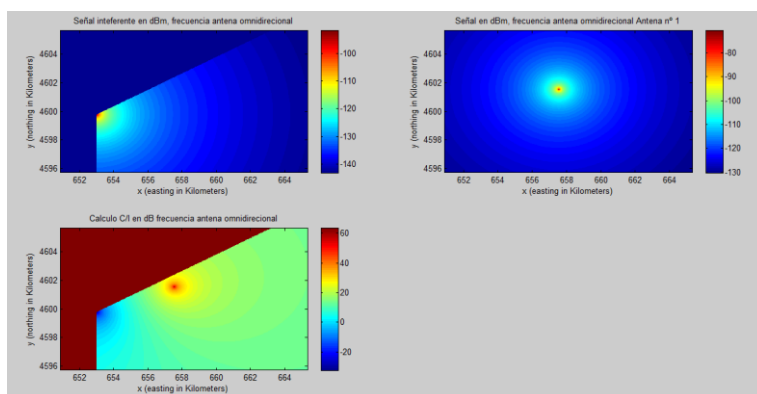


Figura 3-23 Resultado del cálculo de interferencias.

Además de poder realizar los cálculos con el método de las perdidas en espacio libre, se describieron dos métodos más que han sido implementados en la herramienta. El primero de ellos es el método de Okumura-Hata. Una vez seleccionado este método se puede seleccionar una serie de parámetros que son dependientes del entorno. En la figura 3-24 se muestra la interfaz correspondiente a la selección de parámetros de este modelo.

Modelo de Okumura-Hata

Ciudad

☒ Pequeña ☐ Suburbana ☒ Metropolitana ☐ Rural Abierta

Receptor

Altura (m)

Sensibilidad (dBm)

Ganancia (dB)

Cobertura

% Cobertura

Nº de Antena

% Cobertura de la Antena

Interferencias

Nº Antena

Relacion de Protección (dB)

Antena omnidireccional

% Interferencia

Antena Sectorizada

% Interferencia frec1

% Interferencia frec2

% Interferencia frec3

Figura 3-24 Interfaz modelo Okumura-Hata.

Al igual que en modelo Okumura-Hata, la interfaz del modelo COST-231, tiene una sección donde se puede elegir el tipo de entorno donde se va a producir la emisión de las ondas electromagnéticas. En la figura 3-25 se muestra la interfaz correspondiente a este modelo.

Figura 3-25 Interfaz modelo COST-231.

3.4 Sistemas de radiodifusión

3.4.1 Introducción

Los primeros sistemas de radiodifusión consistían en la difusión de señales sonoras y de señales de TV, siendo el origen de la palabra radiodifusión el término inglés broadcast (cast: emisión, broad: extensa, general).

El concepto fue acuñado por los primeros ingenieros en las primeras emisiones de radio comercial en E.E.U.U. pues el objetivo consistía en la transmisión de información sonora (voz y música), a multitud de personas en zonas normalmente extensas.

Posteriormente apareció la TV, la cual, de un modo más o menos parecido a la radio acabó difundiéndose a mayor porcentaje de la población. El medio de transmisión utilizado al igual que las comunicaciones móviles se trata del canal radio, que como se comentó en el apartado anterior, se trata de un medio hostil, ya que provoca atenuaciones a la señal propagada debido a diversos fenómenos físicos como la difracción o la reflexión de las ondas.

Por tanto podríamos concluir que la finalidad de los sistemas de radiodifusión consiste en la emisión de servicios de radiocomunicaciones, cuyas emisiones se destinan para la recepción del público en general. Los servicios más conocidos son la televisión y la radio. Al tratarse de medios que afectan a millones de usuarios conllevan una serie de problemáticas que no afectan a otros sistemas:

- El primero de ellos sería que al tratarse de un sistema que afecta a millones de usuarios, la migración o modificación de estos tipos de sistemas no se puede realizar en periodos breves de tiempo.

- El segundo consiste en que también afecta a distintos sectores como fabricantes, productoras, proveedores de servicios, incluso al propio gobierno del país. Por lo que lo que el cambio de estos sistemas se hace aún más costoso.

Destacar que en la difusión de ondas radio hay que diferenciar entre las emisiones terrestres y las emisiones por satélite. En el proyecto planteado solo se han tenido en cuenta la emisión de ondas terrestres, siendo las emisiones por satélite una posible línea de futuro para proseguir y mejorar el software implementado.

Los diversos sistemas de radiodifusión existen tanto para tecnología analógica como para tecnología digital. A la hora de implementar el sistema radio, se decidió desarrollar el sistema de emisión sonoro de radio FM, debido a que en la actualidad el modelo analógico sigue siendo el más utilizado. Respecto al sistema de emisión de señal de televisión, la inmensa mayoría de las bandas de frecuencia fueron heredadas del sistema analógico al digital y por tanto la diferencia del sistemas analógico al digital no afecta a los cálculos realizados por nuestra herramienta, solo a los umbrales de decisión sobre si existe cobertura o no, que aparecen en la normativa correspondiente.

3.4.2 Cálculo de la intensidad de campo eléctrico

Con respecto al desarrollo de los sistemas de radiodifusión en nuestra herramienta, se ha seguido la recomendación UIT – 1546 [22], la cual integra el método de predicción de punto a zona para servicios terrenales en el rango de frecuencias de 30 a 3000 MHz. Esta recomendación utiliza distintas curvas de propagación, o en su defecto, tablas de valores tabulados para una potencia radiada específica. Una vez seleccionado las intensidades campo específicas se realizan distintas interpolaciones o extrapolaciones a los datos seleccionados, con el fin de obtener la intensidad de campo para cualquier frecuencia requerida.

Las curvas de propagación se encuentran en los primeros anexo de la recomendación y representan los valores de intensidad del campo para una potencia radiada aparente (P.R.A) de 1 kW a las frecuencias nominales de 100, 600 y 2 000 MHz, respectivamente, en función de diversos parámetros; algunas curvas se refieren a trayectos terrestres y otras a trayectos marítimos. En el proyecto, solo se tienen en cuenta los trayectos terrestres.

Las curvas se basan en datos obtenidos mediante mediciones y se refieren principalmente a las condiciones climáticas habituales en zonas templadas. En concreto, las curvas de los trayectos terrestres se prepararon con datos obtenidos sobre todo en zonas de clima templado, como es el caso en Europa y América del Norte.

En las figuras 3-26 y 3-27 se muestra un ejemplo de las curvas de propagación:

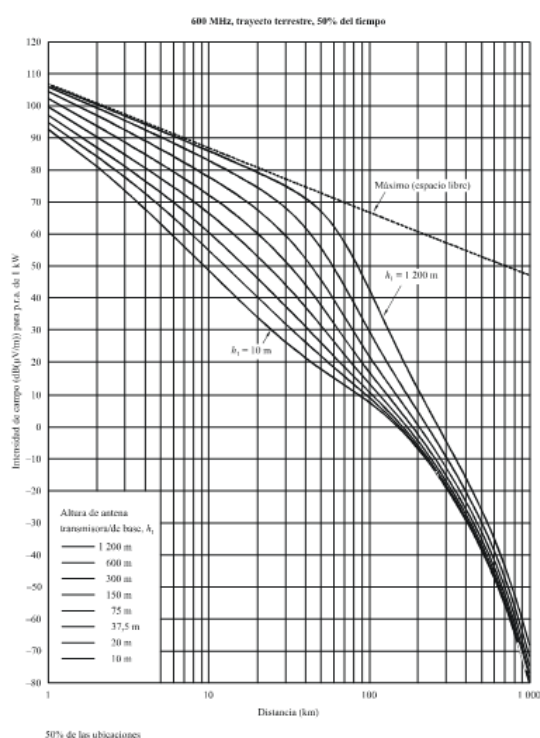


Figura 3-26 Curvas recomendación UIT-R-1546.

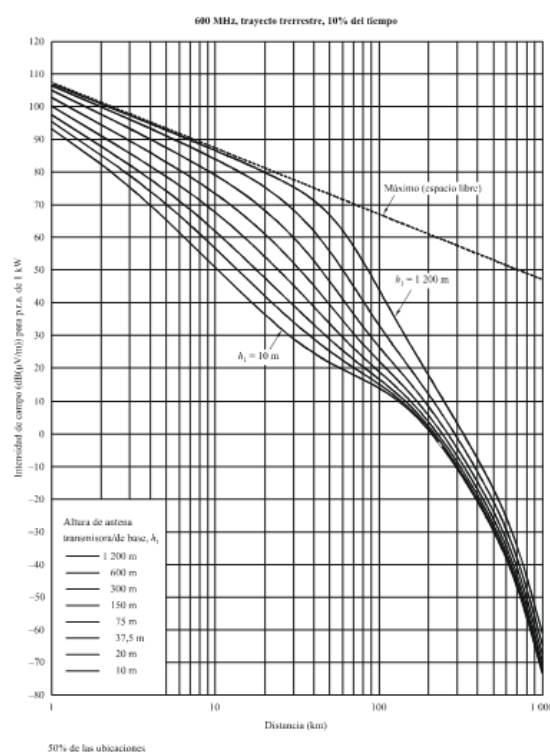


Figura 3-27 Curvas recomendación UIT-R-1546.

Aunque las intensidades de campo se pueden leer directamente en las curvas presentadas en las figuras de los Anexos de la presente Recomendación, lo que se pretende es que las aplicaciones informáticas del método utilicen las intensidades de campo tabuladas disponibles en la Oficina de Radiocomunicaciones (BR) [23]. Así pues, en la aplicación desarrollada se utilizan estas intensidades tabuladas. El programa leerá cada una de estas intensidades de un archivo “.txt” previamente diseñado con un formato concreto.

Una vez seleccionada las intensidades para la distancia, altura de antena y frecuencia se procederá a realizar una sucesión de pasos definidos por la recomendación, los cuales tienen como finalidad obtener la intensidad de campo para todos los parámetros existentes y todos los puntos del mapa seleccionado. Entre estos pasos se encuentran, la interpolación de frecuencia, de altura de la antena transmisora, la interpolación por distancia, el cálculo de las pérdidas por despejamiento, la interpolación para el porcentaje de emplazamiento, entre otros métodos.

El principal motivo de la implementación de cada una de estas interpolaciones es que como se introdujo con anterioridad, las intensidades de campo eléctrico utilizadas en el programa vienen tabuladas y por tanto no se pueden seleccionar todos los datos que quisiéramos. De esta manera podemos calcular el campo para una distancia dada realizando la interpolación entre los campos obtenidos de las dos distancias más cercanas al que se quiera calcular. De la misma manera se realizarán las interpolaciones de la frecuencia, de la antena transmisora, y del porcentaje de emplazamientos.

Además de las diversas interpolaciones desarrolladas cabe destacar que esta recomendación tiene unos límites de distancia, para ser exacto, la recomendación sirve para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico para distancias mayores a 1 Km. Como consecuencia de ello, para el cálculo del campo eléctrico en distancias menores al kilómetro se desarrollará una serie de operaciones distintas, las cuales viene determinadas por la misma recomendación y que se detallarán en el Anexo IV.

La recomendación también especifica que se ha de realizar una serie de correcciones que tengan en cuenta el tipo de entorno en el cual se está realizando la emisión de las ondas radioeléctricas. Estas correcciones son la atenuación por ángulo de despejamiento o el cálculo de la altura efectiva de la antena transmisora.

Hay que destacar que a la hora de implementar este sistema, la simulación realizada para el cálculo del campo es mucho más costosa que en los anteriores sistemas. Esto hecho es debido a que el número de pasos y operación necesarias para un cálculo es muchísimo mayor que los otros dos sistemas desarrollados y que se debe acceder a archivos con formato “.txt” para obtener los valores de la intensidad de campo.

En la recomendación se especifica que en el caso de disponer información sobre el ángulo de despejamiento del terreno se ha de calcular la atenuación correspondiente a cada punto. El principal problema de este método es que para realizarlo se ha de calcular todos los perfiles de terreno entre la antena transmisora y cada punto del mapa y a partir de este perfil el ángulo de despejamiento y la atenuación asociada, lo cual se trata de una tarea muy costosa y que provoca un cuello de botella en cuanto a tiempo de simulación se refiere.

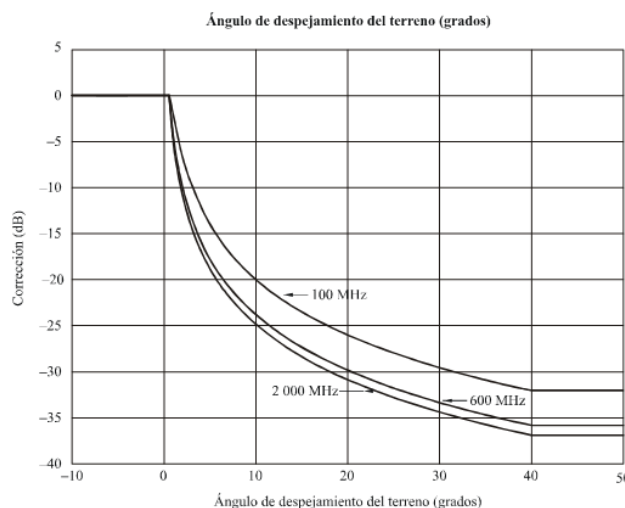


Figura 3-28 Corrección por ángulo de despejamiento

Por ello, con la finalidad de que la herramienta sea más eficiente, se permitirá deshabilitar la opción del cálculo del ángulo de despejamiento, de esta manera los alumnos podrán realizar simulaciones del campo eléctrico recibido de manera más rápida y eficiente, pudiendo obtener información relevante sobre la intensidad del campo eléctrico.

El otro cuello de botella, en cuanto a tiempo de simulación se refiere, es el cálculo de la altura efectiva de la antena transmisora o de base para cada punto del terreno. La altura efectiva de la antena transmisora/de base es la altura de la antena sobre el nivel medio del terreno para distancias comprendidas entre 3 y 15 km en la dirección de la antena receptora. En el caso de trayectos terrestres de menos de 15 km de los que se dispone información, el método tiene también en cuenta la altura de la antena transmisora/de base por encima del nivel representativo de los obstáculos (es decir, la ocupación del suelo) en el lugar en que se halle la estación transmisora/de base.

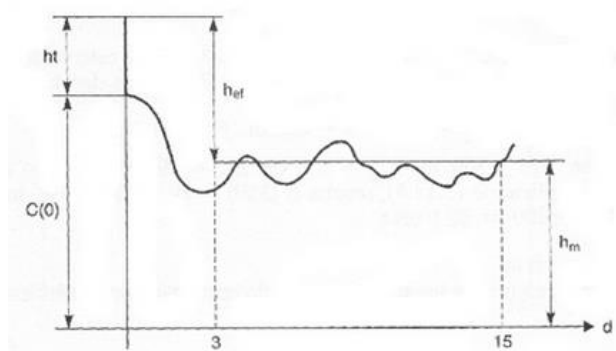


Figura 3-29 Cálculo de la altura efectiva.

Este método calculado para cada punto del terreno es muy costoso, por lo que la solución que se ha desarrollado es realizar el cálculo de esta altura efectiva para un menor número de puntos y que los puntos no seleccionados escojan el valor de la altura efectiva del punto más cercano calculado.

Uno de los posibles casos que se puede dar en el cálculo de la altura efectiva de la antena transmisora es que ésta sea negativa. Este caso podría darse ya que la altura efectiva de antena se basa en la altura media del terreno para distancias comprendidas entre los 3 y los 15 Km. En este caso, se debe tener en cuenta el efecto de la difracción provocado por los obstáculos en las inmediaciones.

3.4.3 Cálculo de la cobertura

Dentro de la aplicación, en el sistema de radiodifusión se tiene como objetivo el cálculo de la intensidad de campo recibida en cada punto, tras ello, la herramienta calculará el porcentaje de terreno para el cual el campo recibido es mayor al de umbral especificado.

$$E_r > E_{min} \quad (9)$$

Dependiendo del sistema que seleccionemos en la aplicación, y para el entorno en el que lo seleccionemos la intensidad de campo mínima será diferente. Así por ejemplo, para encontrar los campos mínimos recomendados podemos acudir a la recomendación UIT-412 [24] de la serie BS (servicios de radiodifusión). Esta recomendación especifica la intensidad de campo mínimo para servicios de radiodifusión sonora para distintos entornos o zonas y dependiendo de si se trata de un servicio monofónico o estereofónico.

La tabla 3-1, que se muestra a continuación, corresponde a los servicios de radiodifusión sonora, los cuales son especificados en la recomendación UIT- 412 de la serie BS. Las intensidades de campo mínima utilizables son las siguientes:

<i>Zonas</i>	<i>Servicios</i>	
	<i>Monofónico (dB(μV/m)</i>	<i>Estereofónico (dB(μV/m)</i>
<i>Rural</i>	48	54
<i>Urbana</i>	60	66
<i>Grandes ciudades</i>	70	74

Tabla 3-1 Tabla de intensidades mínimas de campo. Recomendación UIT-412.

Al igual que para el sistema de radiodifusión sonora, para los sistemas de radiodifusión de TV encontramos una tabla donde encontramos distintas intensidades de campo dependiendo del entorno de recepción, además la intensidad de campo mínima también variara dependiendo del rango de frecuencia en la cual se emita, diferenciando dos posibles opciones: el banda de frecuencias IV y la banda de frecuencia V [11].

La tabla 3-2 corresponde a las intensidades de campo mínimas para servicios de radiodifusión de televisión.

<i>Tipo de recepción</i>	<i>Entorno</i>	<i>Altura de antena hr (m)</i>	<i>Tipo de antena</i>	<i>Intensidad de campo (dBu)</i>	
				<i>Banda IV</i>	<i>Banda V</i>
<i>Fija</i>	<i>Azoteas</i>	10	<i>Directiva</i>	35-59	39-63
<i>Portátil A</i>	<i>Exteriores</i>	1.5	<i>Omnidir.</i>	54-78	58-82
<i>Portátil B</i>	<i>Interiores</i>	1.5	<i>Omnidir.</i>	66-90	70-94

Tabla 3-2 Intensidades de campo mínimas para el servicio de televisión en las bandas de frecuencia IV y V.

En este caso, el campo mínimo presenta un margen de 24 dB con el fin de cubrir todas las posibles combinaciones de modulación y codificación [11].

3.4.4 Interfaz y resultado del servicio de radiodifusión

En la herramienta implementada, se permite realizar simulaciones para el cálculo de la intensidad del campo eléctrico y de la cobertura para sistema de radiodifusión. En concreto, se permite realizar dichas operaciones para el servicio de radio FM, y para el servicio de Televisión para las bandas de frecuencias IV y V.

Para la selección de alguno de los dos servicios, disponemos de una ventana como se muestra en la figura 3-30.

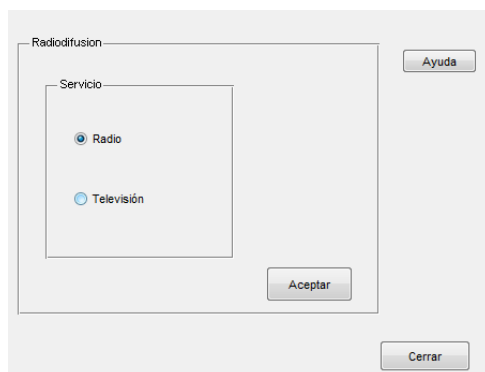


Figura 3-30 Interfaz sistema de radiodifusión.

Una vez seleccionado, el servicio en el cual se quiere realizar el cálculo de la cobertura. Se mostrará una ventana en la que podamos seleccionar el número de emplazamientos que queremos simular dentro de una misma región. En esta ventana mostrada en la figura 3-31, se podrá acceder a la interfaz de selección de parámetros técnicos y localización geográfica de las antenas. Esta nueva interfaz está representada en la figura 3-32.

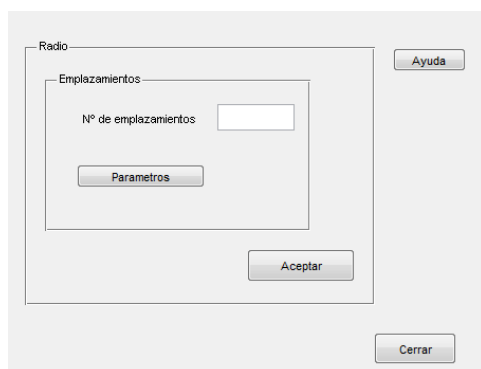


Figura 3-31 Interfaz servicio radio.

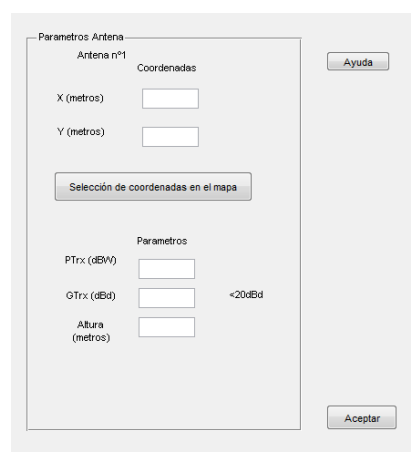


Figura 3-32 Interfaz selección de parámetros de antena.

Para la selección de la localización de los emplazamientos se sigue el mismo procedimiento que en los sistemas explicados con anterioridad.

Una vez seleccionado los parámetros de las antenas, se mostrará una ventana dependiendo del sistema elegido. En el caso de acceder al servicio de radio FM, se mostrará una interfaz donde se puedan seleccionar una serie de propiedades que se tendrán en cuenta para realizar la simulación. La ventana de selección de parámetros se muestra en la figura 3-33 representada a continuación.

Figura 3-33 Interfaz cálculo del porcentaje de cobertura servicio radio

En este caso concreto se ha seleccionado, que la simulación se realice en un entorno de gran ciudad, en modo FM estéreo, y sin tener en cuenta el ángulo de despejamiento, para una única antena situada en el centro del mapa. Una vez realizada la simulación se obtendrá el porcentaje de cobertura, de manera numérica y una serie de imágenes con información del campo eléctrico en cada punto del terreno, junto con la cobertura. Esto se presenta en las figura 3-35 y 3-34 respectivamente.

Cobertura Total:15.4643%

simulacion completada

Figura 3-35 Porcentaje de cobertura simulación servicio radiodifusión

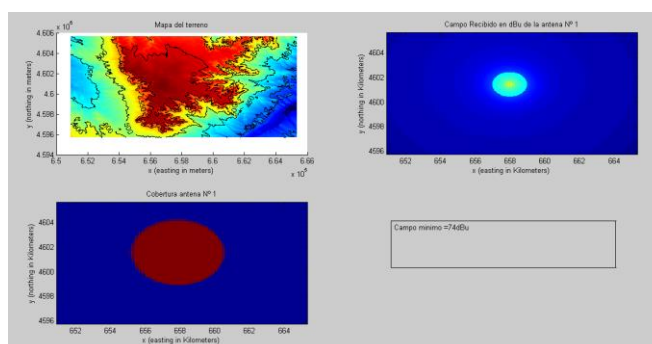


Figura 3-34 Campo eléctrico recibido y porcentaje de cobertura del sistema de radiodifusión.

En el caso de seleccionar, la opción del cálculo de la intensidad del campo eléctrico teniendo en cuenta el ángulo de despejamiento, además de la representación de anterior se mostrará la figura de dicho ángulo, junto con la atenuación propiciada para cada pixel del terreno. En la figura 3-36 se muestra la figura descrita anteriormente. En el caso concreto representado, la atenuación es prácticamente cero en cada punto, debido a que la posición de la antena se situaba en una zona poco abrupta. En caso de seleccionar una zona más abrupta encontraríamos atenuaciones debido a que el fenómeno de la difracción que se explicó con anterioridad está actuando de una manera mucho más directa. En la figura 3-37 se representa el ángulo de despejamiento y la atenuación para un terreno más abrupto.

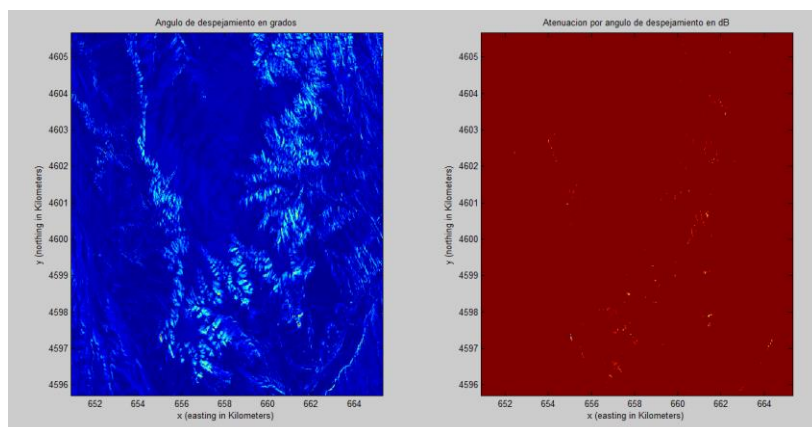


Figura 3-36 Angulo de despejamiento y atenuación propiciada por el ángulo de despejamiento

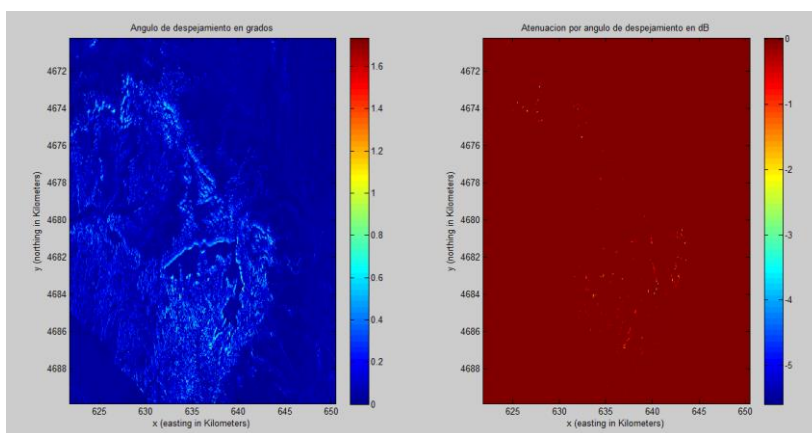


Figura 3-37 Angulo de despejamiento y atenuación propiciada por el ángulo de despejamiento

En caso de seleccionar el servicio de televisión, la ventana de selección de propiedades difiere ligeramente de la interfaz radio. La diferencia está en el entorno de recepción de la señal, lo que se reduce a una variación en el campo eléctrico mínimo necesario. En la figura 3-38 mostrada a continuación se muestra dicha ventana.

Figura 3-38 Interfaz cálculo del porcentaje de cobertura servicio radio.

4 Conclusiones y líneas futuras de trabajo

4.1 Grado de consecución de los objetivos

Para la implementación y desarrollo de la herramienta software de cálculo de coberturas de los sistemas de radioenlace, comunicaciones móviles y radiodifusión para un entorno de aprendizaje se han seguido una serie de pasos que se muestran a continuación:

- En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva sobre la documentación necesaria sobre los distintos servicios y sistemas que se iban a desarrollar. Para ello se recurrió a las recomendaciones de la UIT y se seleccionó las adecuadas para cada uno de los sistemas. Al tratarse de una herramienta software para un entorno de educación no se implementaron todos los posibles métodos de cálculo, si no que se centró en los métodos estudiado en los cursos básicos de sistemas de radiocomunicaciones.
- En segundo lugar, se aprendió a manejar el entorno de desarrollo de la interfaz gráfica del software, con el fin de realizar un programa de fácil uso, pero con la suficiente potencia como para que los alumnos puedan consolidar los conceptos teóricos aprendidos durante los distintos cursos.
- Se obtuvieron múltiples mapas del instituto geográfico nacional y se aprendió a realizar distintas operaciones sobre ellos, con el fin de usarlos como modelos digitales del terreno y realizar los cálculos pertinentes sobre ellos. De esta manera, se puede obtener las coberturas y resultados necesarios en el programa.
- Se desarrolló la programación de cada uno de los sistemas, con distintas opciones y modos. Se diseñó la interfaz gráfica y se unió los distintos sistemas implementados a ella.
- Se elaboró un sistema de control y detección de errores, con el fin de controlar y guiar la actividad del usuario, alertándole en cada momento de las posibles opciones y de los datos olvidados, marcándole los distintos pasos que se debe realizar en cada momento.
- Se incorporó una opción de ayuda en cada pantalla del programa, con el fin de que el usuario pueda conocer en cada momento las distintas opciones y posibilidades que la herramienta de cálculo le ofrece.
- Se desarrolló un sistema de memoria de los datos introducidos, con la finalidad de que el usuario pueda realizar la introducción de los parámetros de antena con mayor eficiencia y de esa manera no hacer tediosa el uso de la herramienta software.
- A lo largo de todo el desarrollo del proyecto se ha ido realizando diversas evaluaciones de las distintas funciones implementadas. De esta manera, se detectaron distintos fallos de programación, principalmente propiciados por la incompatibilidad de las distintas funciones al unir distintas partes del código y solaparlo a la interfaz gráfica.
- Al finalizar el proyecto, se volvió a testearlo por personas ajenas al proyectista, con el fin de encontrar nuevos fallos, pero sobre todo para adecuarlo al uso fácil e intuitivo por parte del alumno, y de esa manera realizar las modificaciones necesarias.

En conclusión, se ha creado una herramienta capaz de realizar cálculos de coberturas en distintos sistemas de radiocomunicaciones para un entorno de enseñanza-aprendizaje. Los sistemas implementados son radioenlaces, sistemas móviles y sistemas de radiodifusión. En el diseño de la herramienta se ha dedicado estricta atención a que sea de fácil uso y que en todo momento se guíe al usuario.

4.2 Líneas futuras de trabajo

Tras el desarrollo y la implementación de la herramienta de cálculo de cobertura para los sistemas de radiocomunicaciones de radioenlace, comunicaciones móviles y radiodifusión se plantean una serie de líneas futuras de trabajo.

- En primer lugar, se plantea la posibilidad de testear de una manera más exhaustiva la herramienta diseñada, optimizando el código creado, con la finalidad de reducir el coste computacional y el tiempo de simulación del programa.
- Ampliar el número de métodos de cálculo de cobertura en cada uno de los sistemas implementados, de esta manera los alumnos podrán comprobar otros modelos teóricos o empíricos utilizados en simuladores profesionales.
- Anadir un mayor número de sistemas, como pudieran ser servicios de radiodifusión por satélite. Ampliar las funcionalidades de los sistemas implementados, como realizar una red de radioenlaces.
- A lo largo del trabajo se han realizado todas las simulaciones teniendo en cuenta que estábamos ante trayectos terrestres, se debería tener la posibilidad de realizar los cálculos en trayecto marítimos y mixtos.
- Se plantea la posibilidad de incluir usuarios a los que dar servicio dentro de la herramienta, al igual que ocurre en herramientas de planificación profesionales como el ICS Telecom.
- Realizar la plataforma para que el software mediante parches pueda añadir funcionalidades específicas dependiendo de las necesidades de cada usuario.

4.3 Seguimiento del trabajo

4.3.1 Introducción

La elaboración y desarrollo del proyecto se ha realizado a lo largo de un periodo de tiempo cercano a los 4 meses, que equivale a un cuatrimestre del curso académico. El proyecto son 12 créditos ETCS lo que equivale a unas 300 horas de trabajo. Dentro del periodo de tiempo especificado se ha desarrollado una serie de actividades que culminaron con la elaboración de esta memoria.

4.3.2 Pasos

El desarrollo de los distintos pasos seguido junto con su tiempo aproximado se presenta a continuación. Los pasos van en orden cronológico:

- Búsqueda de información sobre los distintos sistemas y servicios que se iban a implementar dentro de la herramienta, junto con los posibles fenómenos perturbadores. Dentro de este apartado no solo se incluye la búsqueda de tal información si no la selección de ella. La duración temporal de este paso habrá sido alrededor de unas 15 horas.
- Programación de los sistemas contenido en la aplicación. La elaboración de esta tarea ha sido sobre el entorno de programación MATLAB. Duración temporal de unas 120 horas
- Familiarización del entorno GUIDE y diseño de la interfaz gráfica donde poder introducir los datos necesarios para realizar los cálculos. En este apartado se incluye solapar el código de los simuladores junto con la interfaz, además de mostrar los resultados obtenidos. Duración temporal de unas 60 horas.
- Testeo de la herramienta, y corrección de los errores encontrados. Duración temporal de unas 60 horas.
- Elaboración de la memoria y preparación de la presentación del trabajo final de grado. Duración temporal 45 horas.

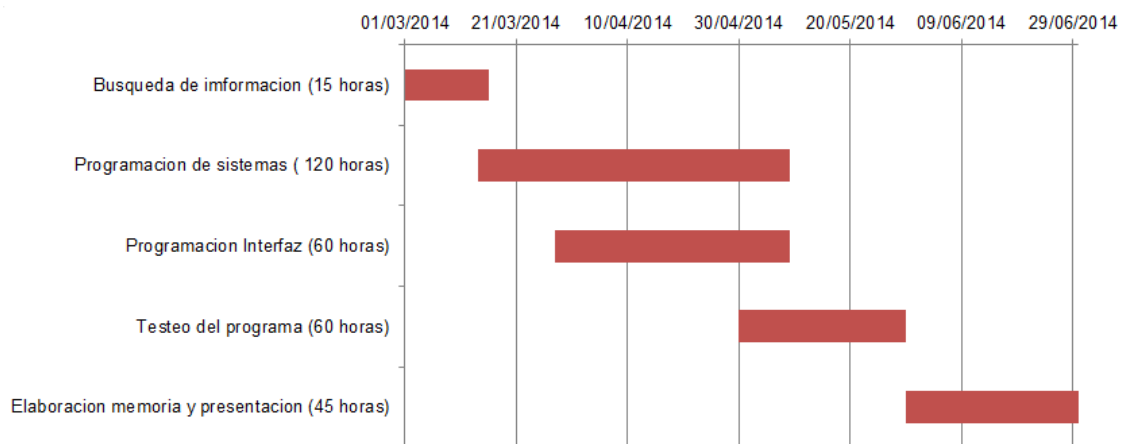


Figura 4-1 Diagrama de Gantt

5 Referencias

- [1] Apuntes, asignatura “Ingeniería Multimedia e interactividad” Grado en ingeniería en tecnologías y servicios de telecomunicación Universidad de Zaragoza
- [2] " Entorno GUIDE de MATLAB <http://www.mathworks.es/discovery/matlab-gui.html>"
- [3] " Instituto geográfico nacional <http://www.ign.es>"
- [4] "<http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>"
- [5] "<http://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>"
- [6] "Mapas IGN <http://www.ign.es/ign/layout/series.do>"
- [7] "<https://www.cnig.es/serieNacional50.jsp>"
- [8] "<http://www.mathworks.com>"
- [9] "https://www.cnig.es/includes/equipamiento/cuadricula_MTN50.png"
- [10] Apuntes, asignatura “Servicios y Sistemas de Radiocomunicaciones” Grado en ingeniería en tecnologías y servicios de telecomunicación Universidad de Zaragoza
- [11] Apuntes, asignatura “Sistemas de Radiocomunicación” Grado en ingeniería tecnologías y servicios de telecomunicación Universidad de Zaragoza
- [12] “UIT-R P.525-2 Calculo de la atenuación en espacio libre
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf"
- [13] "UIT-R P.526-13 Propagación con difracción
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-13-201311-I!!PDF-E.pdf"
- [14] Apuntes, asignatura "Propagación y medios de transmisión” Grado en ingeniería en tecnologías y servicios de telecomunicación Universidad de Zaragoza
- [15] "UIT-R P.676-13 Atenuación por gases atmosféricos
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-I!!PDF-E.pdf"
- [16] "UIT-R P.530-15 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-15-201309-I!!PDF-E.pdf"
- [17] "UIT-R P.837-6 Características de la precipitación para obtener modelos de propagación
http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-6-201202-I!!PDF-S.pdf"
- [18] "UIT-R P.838-3 Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción

http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-S.pdf

[19] "UIT-R P.840-6 Atenuación debida a las nubes y a la niebla
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-6-201309-I!!PDF-E.pdf

[20] "UIT-R P.529-3 Métodos de predicción requeridos para el servicio móvil terrestre terrenal en las bandas de ondas métricas y decimétricas

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.529-3-199910-W!!PDF-S.pdf

[21] "Principio de Comunicaciones móviles Oriol Sallent Roig José Luis Valenzuela González Ramón Agustí Comes UPC"

[22] "UIT-R P.1546-5 Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz

http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-5-201309-I!!PDF-E.pdf

[23] "Oficina de radiocomunicaciones

<http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=br&lang=es>

[24] "UIT-R BS.412-9 Normas para la planificación de la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en ondas métricas

http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.412-9-199812-I!!PDF-S.pdf

Anexos

Anexo I. Cartografía.	54
Anexo II. Radioenlaces	61
Anexo III. Sistemas de Comunicaciones móviles.	72
Anexo IV. Sistemas de radiodifusión.	80

Figuras.

Figura I-1 Coordenadas geodésicas en el elipsoide	54
Figura I-2 Proyección UTM	56
Figura I-3 Husos y bandas UTM.	57
Figura I-4 Zona UTM 31.	57
Figura I-5 Asignación numérica de las coordenadas.	57
Figura I-6 Mapas de distribución del MTN50.	58
Figura I-7 Hojas de la serie de distribución MTN50	59
Figura I-8 Modelo digital del terreno	59
Figura II-1 Generación de los elipsoides de Fresnel	61
Figura II-2 Zonas de Fresnel.	62
Figura III-1 Terminal móvil girando alrededor de una antena omnidireccional	75
Figura III-2 Nivel de potencia recibido y nivel de potencia predicho.	75
Figura III-3 Contribuciones constructivas y destructivas debido a la modificación de la fase	77
Figura III-4 Distribución Rayleigh y Rice	78
Figura IV-1 Angulo de despejamiento	84

Tablas.

Tabla II-1 Coeficientes para k_H	65
Tabla II-2 Coeficientes para k_v	65
Tabla II-3 Coeficientes para α_H	65
Tabla II-4 Coeficientes para α_v.	66
Tabla IV-1 Distancias nominales	81
Tabla VI-2 Desviación típica para distintos servicios de radiodifusión	87

Anexo I. Cartografía

A lo largo de la descripción del proyecto se han ido realizando una serie de comentarios sobre los distintos sistemas geodésicos, proyecciones y series cartográficas utilizados. Así pues, a continuación se va realizar una breve explicación sobre georreferenciación con el único fin de aclarar ciertos conceptos que no han sido matizados a lo largo de la memoria del proyecto.

1 Introducción

Para poder indicar la posición cuantitativa de un punto sobre la superficie de la tierra, se necesitan dos cosas: un sistema de coordenadas sobre el que se puedan sustentar las referencias y una expresión matemática que modele de una manera fácil la superficie de la tierra.

Además de definir un sistema de referencia y un sistema de coordenadas para referir una posición de manera absoluta, dentro de los distintos sistemas de coordenadas, han de existir relaciones biunívocas entre ellas para pasar de un sistema a otro.

2 Sistemas de referencia

La figura “natural” de la Tierra, excluyendo la topografía o forma externa, se asemeja a la definición de geoide, definida como la superficie equipotencial que es perpendicular en todos sus puntos a la dirección de la gravedad resultante de la atracción terrestre y la fuerza centrífuga originada por la rotación del terrestre.

Como la definición matemática del geoide presenta gran complejidad, la superficie de la Tierra puede representarse con mucha aproximación mediante un elipsoide de revolución, definiendo este sistema con:

- Superficie de referencia: dimensiones (semiejes a , b).
- Ejes o líneas de referencia en la superficie.
- Sentidos de medida.

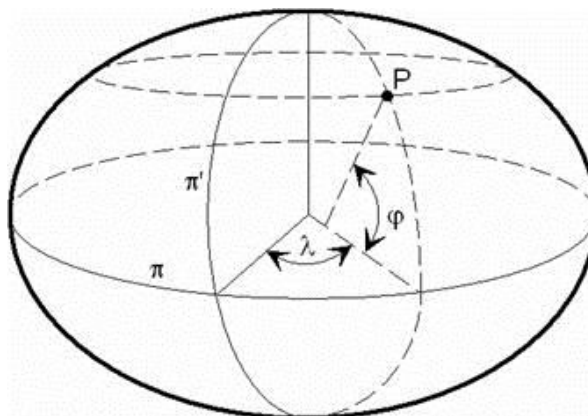


Figura I.1 Coordenadas geodésicas en el elipsoide.

Sobre esta superficie se definen las coordenadas geodésicas:

- Latitud geográfica (φ): ángulo medido sobre el plano meridiano que contiene al punto entre el plano ecuatorial y la normal al elipsoide en P.
- Longitud geográfica (λ): ángulo medido sobre el plano ecuatorial entre el meridiano origen y el plano meridiano que pasa por P.

El elipsoide de revolución que mejor se adapte al geoide en la zona con un punto donde ambos coinciden o bien la normal a ambos es la solución adoptada, constituyendo el concepto de Sistema Geodésico de Referencia. A lo largo de la historia diversos elipsoides se han utilizado para definir el Sistema de Referencia de cada país, de tal forma que se define aquel que mejor se ajuste al geoide.

Dentro de los sistemas geodésicos, podemos clasificarlos en dos distintos:

- Sistema geodésico global, el cual es un sistema de referencia universal, válido para cualquier punto del planeta. Como ejemplo se puede destacar el WGS84 (sistema de referencia utilizado por GPS).
- Sistema geodésico local, es un sistema de referencia cuyo alcance es un espacio geográfico o una región determinada. Como ejemplo destacar el ED50 (sistema de referencia local utilizando la elipsoide de Hayford)

Además de los elipsoides de revolución, dentro del concepto de los sistemas geodésicos de referencia o datums, se especifica un punto fundamental en el que el elipsoide y la tierra son tangentes. De él se especifica la latitud, longitud y el acimut de una dirección o punto establecido. En el punto fundamental las coordenadas astronómicas y geodésicas coinciden, así como lo hacen la vertical del lugar y la normal de la elipsoide.

Como se especificó en la memoria el actual sistema geodésico de referencia utilizado en la península ibérica es el ETRS89, mientras que el utilizado en las islas canarias era el REGCAN95:

El ETRS89 (siglas en inglés de *European Terrestrial Reference System 1989*, en español Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989), es un sistema de referencia geodésico ligado a la parte estable de la placa continental europea. Este datum geodésico espacial es consistente con los modernos sistemas de navegación por satélite GPS, GLONASS y el europeo GALILEO. Por otro lado las Islas Canarias adoptó el sistema REGCAN95, ya que como se comentó el ETRS89 sólo afecta a la parte estable de la placa eurasiática.

3 Proyección

Con total independencia del datum empleado en los cálculos geodésicos, existe el problema matemático de representar en una superficie plana, la superficie curva no rectificable del elipsoide utilizado por el datum. Son, por ejemplo, las proyecciones Lambert (antiguamente utilizadas en la cartografía española) y Universal Transverse Mercator (UTM).

La proyección utilizada en los mapas seleccionados en el proyecto es la UTM, a continuación se muestra las características de este tipo de proyección.

En primer lugar hay que destacar que se trata de un desarrollo cilíndrico transverso por lo que a medida que uno se aleja del meridiano de tangencia, las deformaciones se hacen cada vez mayores.

Los sistemas de referencia adoptados son:

En el elipsoide, el meridiano central del huso respectivo como origen de longitudes, y el ecuador como origen de latitudes.

En el plano, la transformada del meridiano central del huso como eje de ordenadas y la perpendicular a ésta en su punto de cruce con el ecuador, como eje de abscisas. Este eje es también la transformada del ecuador.



Figura I.2 Proyección UTM.

Las coordenadas UTM dividen la tierra en 60 husos de 6° cada uno de esos husos está dividido en 20 bandas de la C hasta la X. Las bandas correspondientes de la C a la M pertenecen al hemisferio sur, mientras que las de la N hasta la X al hemisferio norte.

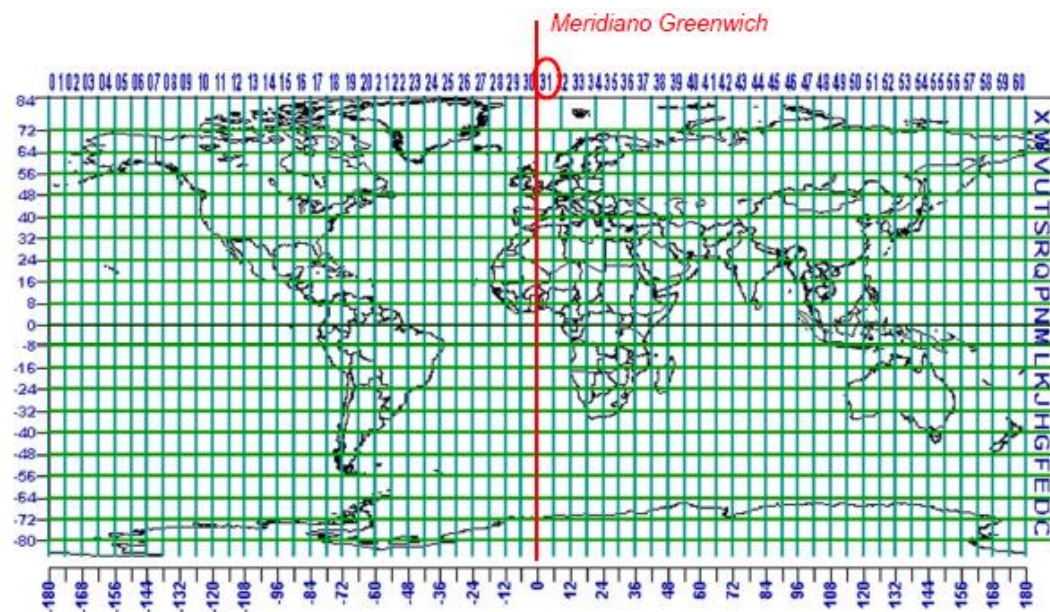


Figura I.3 Husos y bandas UTM.

Un huso comprende una zona cuya distancia horizontal (*Easting*) es siempre inferior a 1.000.000 metros. Se usa un valor de *Easting* de no más de 6 dígitos al expresarla en metros.

Un huso comprende una zona cuya distancia vertical (*Northing*) es inferior a 10.000.000 metros. Se usa un valor de *Northing* de no más de 7 dígitos, al expresarla en metros.

Una coordenada UTM siempre corresponde a un área cuadrada cuyo lado depende del grado de resolución de la coordenada.

Cualquier punto del cuadrado (a esa resolución en particular) tiene el mismo valor de coord. UTM.

El valor de referencia definido por la coordenada UTM no está localizado en el centro del cuadrado, sino en la esquina inferior izquierda del mismo.

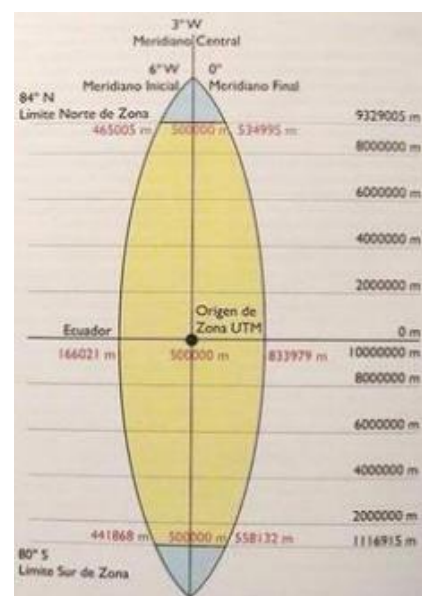


Figura I.4 Zona UTM 31

Usualmente se trabaja con un área de valor un metro cuadrado. En la figura I.5 se muestra la asignación numérica de las coordenadas.

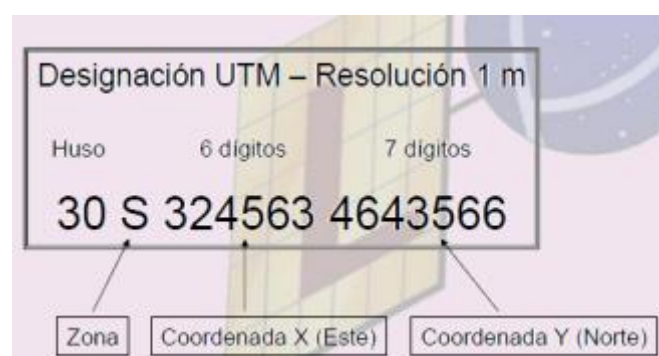


Figura I.5 Asignación numérica de las coordenadas.

4 Series cartográficas.

La serie cartográfica utilizada en los mapas obtenidos del IGN es la MTN50 (Mapa Topográfico Nacional con escala 1:50000). Una serie cartográfica responden a la necesidad de facilitar a la sociedad información geográfica espacial y temática válida para todo el territorio del Estado con garantía de calidad, homogeneidad y conservación.

En concreto la serie cartográfica MTN50 cuya formación y conservación está encomendada por ley al IGN. Consta de unas 1100 hojas, cuyas dimensiones son 10' de latitud por 20' de longitud, lo que corresponde a unas 50.000 ha de superficie.

Cada hoja del MTN50 se divide en cuatro hojas del MTN25 y se obtiene por generalización cartográfica a partir de ellas. La serie MTN50 incorpora un sombreado de relieve obtenido a partir del modelo digital del terreno MDT25. Este sombreado permite una interpretación intuitiva del relieve definido por las curvas de nivel.

En la siguiente figura I.6 se muestra una imagen donde se muestran todos los posibles mapas de distribución del MTN50 que se pueden descargar del instituto geográfico nacional.



Figura I.6 Mapas de distribución del MTN50.

Ampliando una zona en concreto se puede distinguir la numeración de cada una de las distintas hojas de la serie donde se dispone la información del terreno. En la figura I.7 se muestra un ejemplo.



Figura I.7 Hojas de la serie de distribución MTN50

Utilizando el programa desarrollado podemos representar cada uno de los mapas que nos descarguemos del IGN. En la figura I.8 se muestra un ejemplo de una representación 3D de uno de los modelos digitales de terreno, en concreto se representa el modelo perteneciente a la hoja 283.

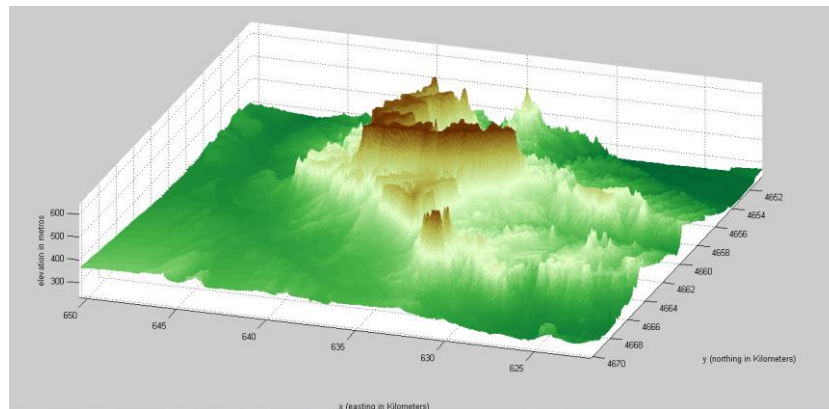


Figura I.8 Modelo digital del terreno.

Anexo II. Radioenlaces

1 Difracción

1.1 Principio de Huygens. Elipsoides de Fresnel

Para entender el fenómeno de difracción podemos recurrir al principio de Huygens, que nos dice que cada punto del frente de ondas se comporta como un radiador individual. El dibujo que se muestra en la figura II.1 muestra como a pesar de un obstáculo, el punto B es alcanzado por la onda emitida.

Para un estudio detallado de la difracción tenemos que recurrir al concepto de elipsoide de Fresnel, la cual se puede definir como aquella elipsoide revolución generada por aquellas trayectorias cuya diferencia con el trayecto principal es como mucho igual a $n \frac{\lambda}{2}$.

Consideremos un punto emisor E, un punto receptor R y un plano P perpendicular a la trayectoria ER en un punto A. Las ecuaciones de Maxwell nos dan que el campo en R puede calcularse a partir del conocimiento de campo creado por E en todos los puntos del plano P. Por otro lado, todos los puntos de una circunferencia del plano P centrada en A, aporta la misma contribución al campo recibido en R, debido a que todos estos puntos contribuyen en fase. Así pues, para calcular el campo recibido en R, debemos descomponer el plano P en anillos concéntricos y sumar las contribuciones de cada uno de ellos, siempre teniendo en cuenta las distintas variaciones de fase.

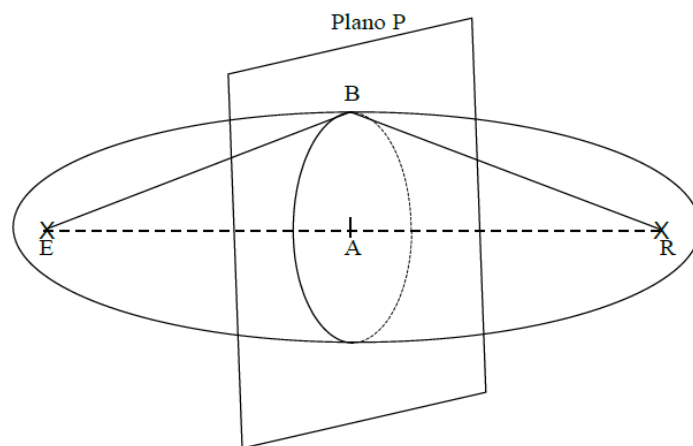


Figura II.1 Generación de los elipsoides de Fresnel.

Tomemos como origen de las fases el rayo donde el trayecto es más corto, es decir, la trayectoria EAR. El trayecto que pasa por B, EBR, es más largo que el ER en una cantidad ΔL que es fácilmente calculable. Todos los puntos que tienen la misma, proporcionan la misma contribución al campo recibido en R. Si desplazamos el plano P paralelamente a sí mismo y manteniendo el valor ΔL , el punto B engendra un elipsoide de revolución cuyos focos son E y R. A partir de esto, podemos considerar el espacio como un conjunto de elipsoides de revolución.

Por otra parte se puede ver intuitivamente y demostrar rigurosamente (teorema de la fase estacionaria) que la mayor parte de la energía que llega a R se propaga cerca de la recta ER. En efecto, mientras la diferencia $\Delta L = EBR - EAR$ sea inferior a $\lambda/2$, las contribuciones de todos los puntos interiores al círculo de radio AB son del mismo signo. Si $\Delta L > \lambda/2$, una parte de los puntos contribuyen negativamente y el campo en R (recepción) decrece. Cuando $\Delta L > \lambda$, el campo recibido volverá a crecer.

Así pues: $\Delta L = n\lambda/2$ donde los valores de n definen una familia de elipsoides denominados elipsoides de Fresnel o más comúnmente zonas de Fresnel.

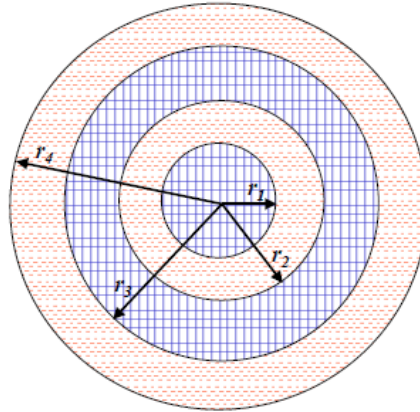


Figura II.2 Zonas de Fresnel.

El primer elipsoide de Fresnel ($n=1$) juega un papel fundamental pues delimita la región del espacio por donde pasa la mayor parte de la energía y por consiguiente la región del espacio donde es conveniente que no haya obstáculo para evitar pérdidas de energía apreciables.

Para el cálculo del radio de los elipsoides de Fresnel, podemos recurrir a la siguiente figura, que representa el perfil EBR.

De lo comentado anteriormente podemos escribir:

$$EB + BR - EAR = n\lambda/2 \quad (\text{II.1})$$

$$\text{O lo que es lo mismo } l_1 + l_2 - (d_1 + d_2) = n\lambda/2 \quad (\text{II.2})$$

La intersección de las zonas de Fresnel con el plano P se transforma en circunferencias cuyo radio se puede obtener en el caso de que este sea mucho menor que d_1 y d_2 .

$$l_1 = \sqrt{d_1^2 + r_n^2} = \sqrt{d_1^2 \left(1 + \frac{r_n^2}{d_1^2}\right)} = d_1 \sqrt{1 + \frac{r_n^2}{d_1^2}} \approx d_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_n}{d_1}\right)^2\right] \quad (\text{II.3})$$

Utilizando el siguiente desarrollo de Taylor: $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{2*4}x^2 + \frac{1*3}{2*4*6}x^3 - \dots$

$$\text{Procediendo de la misma manera con } l_2: l_2 \approx d_2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_n}{d_2}\right)^2\right] \quad (\text{II.4})$$

Así que, la ecuación nos queda en lo siguiente:

$$d_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_n}{d_1} \right)^n \right] + d_2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_n}{d_2} \right)^n \right] - (d_1 + d_2) = n \frac{\lambda}{2} \quad (\text{II.5})$$

Despejando el radio de la n-ésima zona de Fresnel obtenemos lo siguiente:

$$r_n = \sqrt{n \lambda \frac{d_1 * d_2}{d_1 + d_2}} \quad (\text{II.6})$$

Particularizando para la primera elipsoide de Fresnel. Se obtiene lo siguiente:

$$r_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 * d_2}{d_1 + d_2}} \quad (\text{II.7})$$

De la ecuación obtenida podemos deducir que a medida de que la frecuencia aumenta el radio de la zona de Fresnel disminuye. Y que el mayor radio se obtiene cuando d_1 y d_2 son iguales, es decir, cuando $d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$.

En el caso de querer analizar las pérdidas por difracción, tras la explicación, queda constante que la obstaculización de la primera zona de Fresnel propiciará atenuaciones notables en la onda.

1.2 Método de Bullington.

El método de Bullington es un modelo utilizado para el cálculo de las pérdidas por difracción en el caso de que se disponga información del perfil. Por tanto es un método muy utilizado en herramientas software, las cuales disponen de mapas digitales del terreno.

A continuación se describen cierta información relacionada con el método, esta información ha sido extraída de la recomendación UIT-526 para el cálculo de pérdidas por difracción.

En este modelo no es preciso que los puntos del perfil estén equiespaciados. Sin embargo, es importante que la separación máxima entre puntos no sea grande en comparación con la separación entre muestras de los datos topográficos de los que se extraen. Se desaconseja en particular representar una sección de un perfil de altura constante, como el agua, mediante un primer punto y un último punto separados por la longitud de la sección plana del trayecto. El modelo no realiza interpolaciones entre los puntos del perfil y debido a la curvatura de la tierra una gran distancia entre puntos del perfil, por muy llano que sea, puede llevar a errores importantes.

Cuando existan urbanizaciones o cubierta vegetal a lo largo del perfil, normalmente mejora la precisión al añadir una altura representativa a las cotas del terreno o vegetación. No se debería hacer esto para las ubicaciones de los terminales (primer y último puntos del perfil) y hay que tener cuidado cerca de los terminales para garantizar que la adición de alturas de la cobertura vegetal no produce un aumento irreal de los ángulos de elevación sobre el horizonte vistos desde cada antena.

Si un terminal se encuentra en una zona con cobertura vegetal y está por debajo de la altura representativa, puede ser preferible no añadir al terminal la altura de esa cobertura para la aplicación de este modelo y utilizar una corrección diferenciada altura-ganancia para la pérdida adicional que experimenta realmente el terminal en su posición real (de menor altura).

Las ecuaciones utilizadas para la implementación del método se pueden encontrar en la recomendación UIT-526 de la Serie P.

2 Atenuaciones

2.1 Atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se tiene que consultar dos recomendaciones distintas, en primer lugar se debe calcular la atenuación específica por lluvia, para ello se siguen los pasos de las recomendación UIT-838, tras ello se consulta la recomendación UIT-530, en donde se explica como calcular la longitud efectiva del recorrido. La longitud se calcula debido a que la lluvia no es constante en todo el trayecto de la onda radioeléctrica, así pues, gracias a la longitud efectiva podemos realizar una aproximación de la atenuación provocada por la lluvia.

A continuación se mostraran los pasos que se han de seguir para poder calcular la atenuación efectiva por lluvia:

En primer lugar, la atenuación específica $\gamma_R (dB/km)$ se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia mediante la ley exponencial:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (II.8)$$

Los valores de los coeficientes k y α se determinan en función de la frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1 000 GHz, a partir de las ecuaciones siguientes, que se han obtenido mediante el ajuste de curvas a los coeficientes de la ley potencial derivados de cálculos de dispersión:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (II.9)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_{\alpha} \log_{10} f + c_{\alpha} \quad (\text{II.10})$$

Dónde:

f : frecuencia (GHz)

K : puede ser K_V o K_H

α : puede ser α_H o α_V

En las siguientes tablas se va a mostrar las distintas constantes necesarias para el cálculo de los coeficientes de polarización.

En las tablas II.1, II.2, II.3, II.4 se muestran las distintas constantes necesarias para el cálculo de los coeficientes K_H K_V α_H α_V

Coeficientes para k_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Tabla II.1 Coeficientes para k_H

Coeficientes para k_V

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Tabla II.2 Coeficientes para k_V

Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_{α}	c_{α}
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Tabla II.3 Coeficientes para α_H

Coefficientes para α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Tabla II.4 Coeficientes para α_V

En el caso de que la polarización sea lineal, circular o para cualquier geometría de trayecto, los coeficientes se pueden obtener a partir de las ecuaciones utilizadas con anterioridad de la siguiente manera:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (\text{II.11})$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k \quad (\text{II.12})$$

Donde θ es el ángulo de elevación del trayecto y τ es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal ($\tau = 45^\circ$ para la polarización circular).

Para el cálculo de la distancia efectiva d podemos obtenerla como el producto $d_{eff} = rd$ donde d es la distancia del trayecto y r se define como:

$$r = \frac{1}{0.477d^{0.633}R_{0.01}^{0.073\alpha}f^{0.123}-10.579(1-\exp(-0.024d))} \quad (\text{II.13})$$

donde f (GHz) es la frecuencia, α es el exponente específico del modelo de atenuación obtenido en el cálculo de la atenuación específica. El máximo recomendado para el parámetro r es 2.5, así que cuando el denominador de la función sea menor a 0.4, se usará $r = 2.5$.

La atenuación del trayecto excedida durante el 0.01% del tiempo viene dada por:

$$A_{0.01} = \gamma_R d_{eff} \quad dB \quad (\text{II.14})$$

La atenuación excedida para otros porcentajes de tiempo p en el rango de 0.001% a 1% se puede deducir mediante la siguiente ley exponencial:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10}(p))} \quad (\text{II.15})$$

con:

$$C_1 = (0.07^{C_0})[0.12^{(1-C_0)}] \quad (\text{II.16})$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1 - C_0) \quad (\text{II.17})$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1 - C_0) \quad (\text{II.18})$$

y:

$$C_0 = 0.12 + 0.04[\log_{10}(f/10)^{0.8}] \quad f \geq 10 \text{ GHz} \quad (\text{II.19})$$

$$C_0 = 0.12 \quad f < 10 \text{ GHz} \quad (\text{II.20})$$

2.2 Atenuación por nubes y niebla

Para el cálculo de la atenuación por nubes y niebla, al igual que en el caso del cálculo de la atenuación por lluvia se ha de calcular una atenuación específica, la cual será multiplicada por la distancia del trayecto de la onda. Los pasos seguidos para el cálculo de la atenuación han sido obtenidos de la recomendación UIT-840.

Para las nubes y la niebla, compuestas totalmente de gotas minúsculas generalmente inferiores a 0,01 cm, la aproximación de Rayleigh es válida para frecuencias inferiores a 200 GHz y se puede expresar la atenuación en términos del contenido total de agua líquida por unidad de volumen. Así pues, la atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_c = K_l M \quad \text{dB/Km} \quad (\text{II.21})$$

siendo:

γ_c : atenuación específica (dB/km) en la nube

K_l : coeficiente de la atenuación específica ((dB/km)/(g/m³))

M : densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g/m³).

En frecuencias del orden de 100 GHz y superiores, la atenuación debida a la niebla puede ser significativa. La densidad de agua líquida en la niebla es típicamente de unos 0,05 g/m³ en la niebla moderada y de 0,5 g/m³ en niebla espesa, pero en la herramienta el usuario podrá elegir la densidad de agua.

Para el cálculo del coeficiente de atenuación específica se utiliza un modelo matemático válido hasta frecuencias de 1000 GHz basado en la dispersión Rayleigh, que utiliza un modelo el cual tiene en cuenta la permitividad dieléctrica del agua.

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1+\eta^2)} \quad (\text{dB/Km})/(\text{g/m}^3) \quad (\text{II.22})$$

donde f es la frecuencia (GHz), y:

$$\eta = \frac{2+\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (\text{II.23})$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (\text{II.24})$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \varepsilon_2 \quad (\text{II.25})$$

donde:

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (\text{II.26})$$

$$\varepsilon_1 = 5.48 \quad (\text{II.27})$$

$$\varepsilon_2 = 3.51 \quad (\text{II.28})$$

$$\theta = 300/T \quad (\text{II.29})$$

siendo T la temperatura (°K).

Las frecuencias de relajación principal y secundaria son:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad \text{GHz} \quad (\text{II.30})$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad \text{GHz} \quad (\text{II.31})$$

Una vez obtenida la atenuación específica solo hay que multiplicarla por la distancia del radioenlace.

2.3 Atenuación de los gases atmosféricos

Para el cálculo de la atenuación por gases, se obtiene una atenuación específica como suma de atenuaciones correspondientes a cada uno de los fenómenos que provocan la atenuación, tras ello se multiplica por la distancia del trayecto de la onda. Los pasos seguidos para obtener la atenuación han sido obtenidos de la recomendación UIT-676, la cual describe dos métodos distintos para el cálculo de las perturbaciones por gases. El primer método, el método de raya por raya, realizar un cálculo de las atenuaciones por gases hasta frecuencias de 1000 GHz. El segundo método consiste en una aproximación de la atenuación para frecuencias inferiores a los 350 GHz.

El segundo método es el que se va a explicar a continuación. Consiste en una serie de algoritmos para una estimación rápida y aproximada de la atenuación causada por los gases para un número limitado de condiciones meteorológicas y una variedad limitada de configuraciones geométricas. En general, la diferencia absoluta entre los resultados obtenidos con estos algoritmos y con el cálculo raya por raya es generalmente menor a 0.1 dB/Km, alcanzando un máximo cerca de los 60 GHz de unos 0.7 dB/Km.

En especial, en el proyecto se ha implementado el procedimiento para obtener la atenuación para un trayecto terrenal y para frecuencias inferiores a los 54 GHz.

En el caso de aire seco, la atenuación γ_0 (dB/Km) viene dada por las siguientes ecuaciones:

Para $f \leq 54$ GHz:

$$\gamma_o = \left[\frac{7.2 r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.62 \xi_3}{(54 - f)^{1.16 \xi_1} + 0.83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (\text{II.32})$$

con:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (\text{II.33})$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \quad (\text{II.32})$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \quad (\text{II.34})$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)] \quad (\text{II.35})$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

$rp = p / 1013$

$rt = 288 / (273 + t)$

p : presión (hPa)

t : temperatura (°C)

En el caso de vapor de agua, la atenuación γ_w (dB/Km) viene dada por:

$$\gamma_w = \left\{ \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \right. \\ + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \quad (II.36) \\ + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ \left. + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2.5} \rho \times 10^{-4}$$

con:

$$\eta_1 = 0.955r_p r_t^{0.68} + 0.006\rho \quad (II.37)$$

$$\eta_2 = 0.735r_p r_t^{0.5} + 0.0353r_t^4 \rho \quad (II.38)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f-f_i}{f+f_i} \right)^2 \quad (II.39)$$

donde ρ es la densidad del vapor de agua en (g/m³).

La atenuación específica en el caso de un trayecto terrestre se describe de la manera siguiente:

$$A = \gamma d = (\gamma_0 + \gamma_w)r_0 \quad (II.40)$$

donde d es la distancia del trayecto terrestre en Km.

Anexo III. Sistemas de Comunicaciones móviles

1 Introducción

En el siguiente anexo se muestra toda la información necesaria para poder llegar a comprender todos los sistemas y fenómenos que aparecen en el apartado de sistemas de comunicaciones móviles de la memoria.

En primer lugar se realizará una explicación sobre los diversos sistemas implementados, exponiendo las distintas fórmulas matemáticas de los modelos. Tras ello, se realizarán una breve explicación sobre los tipos de desvanecimientos provocados por los fenómenos de difracción y propagación multicamino, poniendo mayor énfasis en los desvanecimientos lentos, los cuales nos sirven para el cálculo de la zona de cobertura.

2 Modelos de propagación

2.1 Pérdidas en espacio libre

Las pérdidas en espacio libre se muestran en la recomendación UIT-525, sobre la base de la propagación en el espacio libre, se pueden utilizar las fórmulas de conversión siguientes:

Intensidad de campo para una onda dada transmitida isotrópicamente:

$$E = Pt - 20 \log d + 74,8 \quad (\text{III.1})$$

Potencia recibida isotrópicamente para una intensidad de campo dada:

$$Pr = E - 20 \log(f) - 167,2 \quad (\text{III.2})$$

Pérdida de transmisión básica en el espacio libre para una potencia e intensidad de campo dadas transmitidas isotrópicamente:

$$Lbf = Pt - E - 20 \log(f) - 167,2 \quad (\text{III.3})$$

Densidad de flujo de potencia para una intensidad de campo dada:

$$S = E - 145,8 \quad (\text{III.4})$$

Dónde:

Pt : Potencia transmitida isotrópicamente (dB(W))

Pr : Potencia recibida isotrópicamente (dB(W))

E : Intensidad de campo eléctrico (dB(μV/m))

f : Frecuencia (GHz)

d : Longitud del trayecto radioeléctrico (km)

L_{bf} : Pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)

S : Densidad del flujo de potencia (dB(W/m²)).

2.3 Método de Okumura-Hata

El método de Okumura-Hata consiste en un modelo empírico basado en una serie de curvas normalizadas. Con la finalidad de informatizar el método se desarrollaron una serie de expresiones numéricas, incluyendo una serie de correcciones habituales en entornos de propagación de comunicaciones móviles.

A continuación se muestran las expresiones numéricas con las distintas correcciones:

$$L_b = 69.55 + 20 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log d_m \quad (\text{III.5})$$

f : Frecuencia en MHz. $150 < f < 1500$ MHz

h_t : Altura efectiva de la antena transmisora (m). $30 < h_t < 200$ m.

h_m : Altura sobre el suelo de la antena receptora (m). $1 < h_m < 10$ m.

d : Distancia (km). $1 < d < 20$ km.

$a(h_m)$: Corrección por la altura de h_m . Si $h_m = 1.5$, $a(h_m) = 0$

El valor de $a(h_m)$ para $h_m \neq 1.5$ depende del tipo de ciudad:

- Ciudad media-pequeña: $a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8)$ (III.6)

- Ciudad grande: $a(h_m) = 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1 \quad f \leq 200 \text{ MHz}$ (III.7)

$$a(h_m) = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 \quad f \geq 200 \text{ MHz} \quad (\text{III.8})$$

Para zonas suburbanas: $L_{bs} = L_b - 2(\log(f/28))^2 - 5.4$ (III.9)

Para zonas rurales abiertas: $L_{br} = L_b - 4.78(\log(f))^2 + 18.33 \log(f) - 40.94$ (III.10)

2.4 Método COST-231-HATA

El método COST-231-HATA consiste en una modificación del método Okumura-Hata, esta modificación era necesaria para incluir el rango frecuencia de los 1500-2000 MHz utilizado en los sistemas 3G en comunicaciones móviles.

A continuación se muestran las ecuaciones del método:

$$L_{b1} = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_t) \quad (\text{III.11})$$

$$L_b = L_{b1} - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log(h_t)) \log d_m + C_m \quad (\text{III.12})$$

f : Frecuencia en MHz. $1500 < f < 2000$ MHz

h_t : Altura efectiva de la antena transmisora (m). $30 < h_t < 200$ m.

h_m : Altura sobre el suelo de la antena receptora (m). $1 < h_m < 10$ m.

d : Distancia (km). $1 < d < 20$ km.

$a(h_m)$: Corrección por la altura de h_m . Si $h_m = 1.5$, $a(h_m) = 0$

El valor de $a(h_m)$ para $h_m \neq 1.5$ depende del tipo de ciudad:

- Ciudad media-pequeña: $a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log(f) - 0.8)$ (III.11)

- Ciudad grande: $a(h_m) = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97$ $f \geq 200$ MHz (III.12)

$C_m = 0$ dB Para ciudades medias y áreas suburbanas con densidad de arbolado moderada.

$C_m = 3$ dB Para grandes centros metropolitanos.

3 Desvanecimientos de señal

3.1 Desvanecimientos lentos

A partir de los modelos de propagación es posible determinar cuál es el valor esperado de la potencia de una onda emitida en función de la distancia, frecuencia, tipo de terreno.... Sin embargo si un terminal móvil describe una circunferencia alrededor de una antena omnidireccional, el valor medio de la potencia variará en función de los distintos perfiles de terrenos que se obtendrán al variar su posición. Esta variación se denomina desvanecimiento lento y se produce por la variabilidad del terreno y la interposición de distintos objetos entre los dos terminales.

Si representamos el nivel medio de señal de potencia recibida P , en el móvil mostrado en la figura III.1 girando alrededor de la antena, se puede observar que la señal sufre una variación del nivel de potencia en función del perfil del terreno existente para cada una de esas

posiciones, tal como se muestra la figure III.2. Esta variación de nivel de señal recibida oscila alrededor del nivel de potencia medio P , el cual ha sido proporcionado por los modelos de propagación. Cuando en su movimiento el terminal móvil se sitúa tras una montaña o entra en un valle, las condiciones de propagación son adversas y el nivel de potencia sufre una atenuación adicional, por el contrario si el terminal se sitúa en una zona donde la visibilidad es directa, esta situación corresponde a un mayor nivel de señal recibido.



Figura III.1 Terminal móvil girando alrededor de una antena omnidireccional.

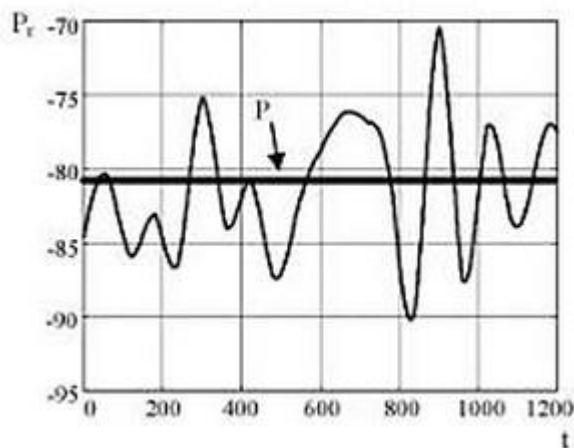


Figura III.2 Nivel de potencia recibido y nivel de potencia predicho.

A partir de las numerosas medidas se ha establecido un modelo estadístico de distribución que representa la función de densidad de probabilidad de potencia de los desvanecimientos lentos basada en la función log-normal.

Donde P es el valor medio de la potencia y σ_y es la desviación estándar. Ambos valores están expresados en unidades logarítmicas. El valor P será predicho por los modelos de propagación explicados en los puntos anteriores del anexo, mientras que el valor de σ_y estará determinado por el entorno de propagación donde nos encontremos. Los valores típicos de esta desviación estándar están entre los 6 y 12 dB. En entornos con multitud de obstáculos como en ciudades

con muchos edificios o sistemas montañosos, los valores de la desviación estándar serán grandes, mientras que en los terrenos de variación suave o prácticamente sin obstáculos estarán próximos a los 6 dB.

$$f(P_r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(P_r - \bar{P})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{III.13})$$

Por otro lado, es necesario caracterizar la velocidad de la variación del nivel de señal, la cual se modifica a lo largo de que el terminal se desplaza. Estas variaciones de señal no se producen de forma instantánea, puesto que un terminal no se oculta tras un obstáculo de manera inmediata, sino que existe una correlación temporal entre los distintos valores de potencia. Parece obvio que la velocidad de variación del nivel de señal dependerá de la velocidad de desplazamiento del móvil, pero en cualquier caso se tratarán de variación relativamente lentas en la medida de que están originadas por obstáculos de tamaño considerable. El valor de la correlación temporal depende nuevamente del tipo de entorno en los que el terminal móvil se esté desplazando y de la velocidad de desplazamiento del mismo. Normalmente se usa la siguiente función de correlación temporal:

$$R(\tau) = e^{-\alpha\tau} \quad (\text{III.14})$$

El valor de alfa modula la mayor o menor variabilidad de la señal y depende de la velocidad del terminal y del tipo de terreno. A mayor velocidad, la señal varía de forma más rápida y por tanto alfa también será mayor. De forma similar en entornos abruptos con variaciones rápidas del perfil del terreno las variaciones de señal serán más rápidas.

La caracterización de los desvanecimientos lentos explicados permite fijar la zona de cobertura. El siguiente objetivo es fijar una zona donde exista la recepción correcta para un elevado % de emplazamientos. Para ello se ha de fijar un % en el cual la señal recibida P este por encima de un umbral P_u .

$$p = \text{prob}(P \geq P_u) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{P_u - \bar{P}}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{P_u - \bar{P}}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (\text{III.15})$$

$$p(\%) = p \cdot 100 \quad (\text{III.16})$$

Esto refleja el porcentaje de emplazamientos donde $P \geq P_u$ y de aquí podemos deducir el radio de la zona de cobertura.

Se ha de enfatizar que la caracterización de los desvanecimientos lentos no solo es válida para determinar el % de emplazamientos, sino también el % de tiempo. Un móvil estático recibirá una señal instantánea con variación lentas respecto a la media, estas variación lentas en tiempo se pueden caracterizar con la misma función log-normal.

Como se explicaba en la memoria, se puede utilizar un margen o factor de protección estadístico que considera la naturaleza estadística de la señal recibida en función del tiempo y del espacio de esta manera se tendrá en cuenta el porcentaje de tiempo y ubicaciones deseado a la hora de calcular el radio de la zona de cobertura.

3.2 Desvanecimientos rápidos

En un entorno de comunicaciones móviles, la señal recibida en un determinado instante de tiempo es la suma de todas las trayectorias provocadas por todas las reflexiones del frente de onda en los obstáculos y objetos cercanos en la dirección del terminal móvil. Cada una de estas reflexiones incide con una amplitud y una fase distinta, que depende del coeficiente de reflexión y con un retardo distinto. En el caso de que los objetos estén muy próximo a la antena receptora, los distintos retardos van a ser despreciable comparados con la duración del símbolo de la señal digital. No obstante al emitir esa misma señal modulada, el efecto de los distintos retardos implicará que la señal incidente llegue con fases totalmente distintas.

Supongamos que transmitimos una señal que llega a una antena mediante distintas reflexiones, el campo total recibido sería el siguiente:

$$E_r = \sum_{i=1}^N E_i e^{j[w_0 t - \beta v t \cos(\Phi_i - \alpha)]} = e^{j w_0 t} \sum_{i=1}^N E_i e^{j[-\beta v t \cos(\Phi_i - \alpha)]} = e^{j w_0 t} \cdot H(w_0, t) \quad (\text{III.17})$$

$$H(w_0, t) = \sum_{i=1}^N E_i e^{j[-\beta v t \cos(\Phi_i - \alpha)]} \quad (\text{III.18})$$

Siendo $H(w_0, t)$: una función de transferencia de un sistema lineal e invariante en el tiempo.

Al aumentar la distancia recorrida por el terminal móvil, se modifica la fase recibida, es decir, para cada posición del móvil los N fasores (multicamino) puede sumarse constructiva o destructivamente.

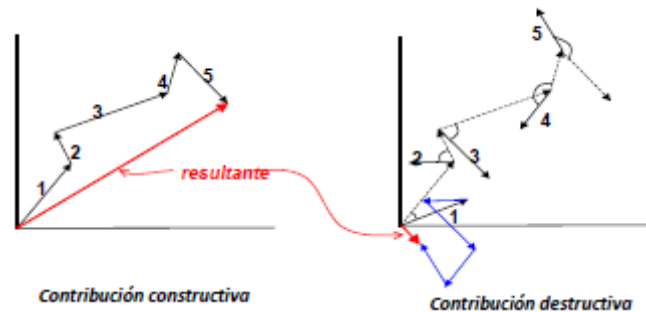


Figura III.3 Contribuciones constructivas y destructivas debido a la modificación de la fase.

Cuando no existes visibilidad directa entre las antenas podemos considerar que el número de reflexiones que inciden sobre la antena receptora es muy grande. Con esta consideración

podemos describir la función de densidad de probabilidad de la envolvente de señal será como una función Rayleigh.

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad r \geq 0 \quad (\text{III.19})$$

Donde la potencia media de la señal es $P = \sigma^2$

En el caso de que estemos ante un caso donde la visibilidad de los terminales sea directa la función de densidad de probabilidad de la envolvente de la señal será como una función Rice.

$$f_r(r) = \frac{r}{P} (1 + K) e^{-K - \frac{r^2}{2P}(1+K)} I_0 \left(r \sqrt{\frac{2K}{P} (1 + K)} \right) \quad r \geq 0 \quad (\text{III.20})$$

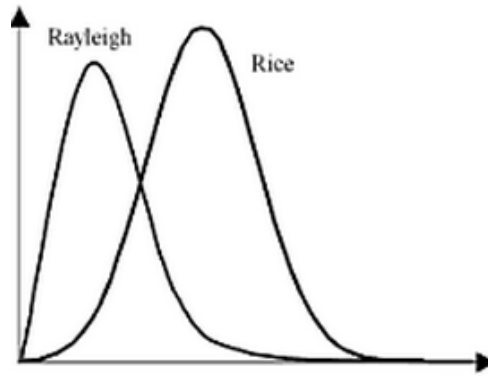


Figura III.4 Distribución Rayleigh y Rice.

Donde la potencia media de la señal en este caso hay que añadirle la componente del rayo directo: $P = \frac{A^2}{2} + \sigma^2$

Y la relación entre la componente multicamino y la componente directa es: $K = \frac{A^2}{2\sigma^2}$, de lo que deducimos que si no hay componente directa $A = 0 \rightarrow K = 0$ y por tanto la función de densidad de probabilidad de la envolvente será como una función Rayleigh.

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad r \geq 0 \quad (\text{III.21})$$

Anexo IV. Sistemas de radiodifusión

1 Introducción

La finalidad de este anexo es la explicación de los distintos pasos comentados a lo largo del apartado de sistemas de radiodifusión de la memoria, los cuales han sido soncados de la recomendación UIT-1546. Los siguientes procedimientos han sido implementados sobre herramienta de cálculo de coberturas.

2 Procedimiento de aplicación de la recomendación UIT-1546

El procedimiento que se indica a continuación se ha de aplicar a los valores obtenidos de los cuadros de intensidad en función de la distancia de que dispone la BR.

Paso 1: Se debería determinar el tipo de trayecto que la onda radioeléctrica va a recorrer, en nuestro caso como solo hemos tenido en cuenta trayectos terrestres, supondremos que todos los posibles recorridos son en un entorno terrestre.

Paso 2: Para cualquier porcentaje de tiempo, seleccionar dos porcentajes nominales, el porcentaje de tiempo va comprendido en la gama del 1% al 50%, así que tendremos las siguientes dos opciones:

- porcentaje de tiempo deseado > 1 y < 10 , siendo los porcentajes inferior y superior 1 y 10 respectivamente;
- porcentaje de tiempo deseado > 10 y < 50 , siendo los porcentajes inferior y superior 10 y 50, respectivamente.

Paso 3: Para cualquier frecuencia deseada, se calculará dos frecuencias nominales de la siguiente manera:

- cuando la frecuencia deseada < 600 MHz, las frecuencias inferior y superior son 100 y 600 MHz, respectivamente;
- cuando la frecuencia deseada > 600 MHz, las frecuencias nominales inferior y superior son 600 y 2 000 MHz, respectivamente.

Paso 4: Selección de las distancias nominales, para ello se debe consultar la siguiente tabla:

Valores de distancia (km) utilizados en los cuadros de intensidades de campo

1	14	55	140	375	700
2	15	60	150	400	725
3	16	65	160	425	750
4	17	70	170	450	775
5	18	75	180	475	800
6	19	80	190	500	825
7	20	85	200	525	850
8	25	90	225	550	875
9	30	95	250	575	900
10	35	100	275	600	925
11	40	110	300	625	950
12	45	120	325	650	975
13	50	130	350	675	1 000

Tabla IV-1 Distancias nominales.

Paso 5: Para el porcentaje de tiempo nominal inferior se han de realizar los distintos pasos.

Paso 6: Calcular h_1 de la antena transmisora para cada punto del terreno, este cálculo se realiza de la siguiente manera:

En caso de que la distancia del trayecto sea inferior a 15 Km:

$$h_1 = h_b (m) \quad (IV.1)$$

Donde h_b es la altura de la antena por encima del nivel del terreno promediado entre $0,2d$ y d km.

En caso de que la distancia del trayecto sea mayor a 15 km:

$$h_1 = h_{heff} (m) \quad (IV.2)$$

Donde h_{heff} es la altura por encima del nivel medio del terreno para distancias comprendidas entre 3 y 15 Km.

Paso 7: Para la frecuencia nominal inferior se ha de obtener la intensidad de campo rebasada en el 50 % de las ubicaciones para una antena receptora, para ello se ha de realizar lo siguiente:

Paso 7.1: En caso de que la altura h_1 sea mayor a 10 metros se ha de determinar la altura nominal inferior y superior de h_1 , en el caso de que la altura sea uno de los valores nominales 10, 20, 37.5, 75, 150, 300, 600, 1200 m, este valor no será necesario interpolarlo posteriormente.

Paso 7.2: Para el valor nominal inferior seguir los siguientes pasos.

Paso 7.2.1: Para el valor nominal inferior de la distancia se ha de obtener la intensidad de campo rebasada el 50 % de las ubicaciones para la antena receptora a la altura representativa de los obstáculos circundante, para los valores requeridos de distancia, d , y altura de la antena transmisora de base, h_1 .

Paso 7.2.2: En el caso de que la distancia requerida no coincida con la distancia nominal inferior se ha de realizar los pasos lo mismo para la distancia nominal superior y realizar la siguiente interpolación:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \log \left(\frac{d}{d_{inf}} \right) / \log \left(\frac{d_{sup}}{d_{inf}} \right) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.3)$$

donde:

- d : distancia para la que se requiere la predicción
- d_{inf} : distancia de la tabulación más cercana inferior a d
- d_{sup} : distancia de la tabulación más cercana superior a d
- E_{inf} : valor de la intensidad de campo para d_{inf} .
- E_{sup} : valor de la intensidad de campo para d_{inf} .

Paso 7.3: Si la altura requerida de la antena transmisora h_1 , no coincide con uno de los valores nominales, se realizarán los mismos pasos 7.2.1 y 7.2.2 para la altura nominal superior, y tras ello se realizará la interpolación en altura de la siguiente manera:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \log \left(\frac{h_1}{h_{inf}} \right) / \log \left(\frac{h_{sup}}{h_{inf}} \right) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.4)$$

dónde:

- h_{inf} : 600 m si $h_1 > 1\,200$ m, de no ser así, la altura efectiva nominal más cercana por debajo de h_1
- h_{sup} : 1 200 m si $h_1 > 1\,200$ m, de no ser así, la altura efectiva nominal más cercana por encima de h_1
- E_{inf} : valor de la intensidad de campo para h_{inf} a la distancia requerida
- E_{sup} : valor de la intensidad de campo para h_{sup} a la distancia requerida.

Paso 7.3.1: Limitar el resultado al máximo dado por las siguientes ecuaciones:

$$E_{max} = E_{fs} \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.5)$$

Donde E_{fs} es la intensidad de campo en espacio libre para una p.r.a. de 1 kW dada por:

$$E_{fs} = 106.9 - 20 \log(d) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.6)$$

Paso 7.4: En el caso de que la altura de la antena transmisora h_1 , sea inferior a 10 m, la intensidad de campo para la altura y la distancia requerida se deberá calcular de la siguiente manera:

En el caso de que la altura de la antena transmisora sea $0 \leq h_1 \leq 10 \text{ m}$.

$$E = E_{zero} + 0.1h_1(E_{10} - E_{zero}) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.7)$$

donde:

$$E = E_{zero} + 0.5(C_{1020} - C_{h1neg10}) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.8)$$

$$C_{1020} = E_{10} - E_{20} \quad dB \quad (IV.9)$$

$C_{h1neg10}$ = corrección C_{h1} en dB que se calcula mediante la ecuación IV.10 para la distancia requerida de $h_1 = -10 \text{ m}$

E_{10} y E_{20} = intensidades de campo en dB ($\mu\text{V/m}$) que se calculan con a la distancia requerida para $h_1 = 10 \text{ m}$ y $h_1 = 20 \text{ m}$, respectivamente.

Obsérvese que las correcciones C_{1020} y $C_{h1neg10}$ deben traducirse en cantidades negativas.

En el caso de que la altura de la antena transmisora sea negativa:

$$C_{h1} = 6.03 - J(v) \quad dB \quad (IV.10)$$

donde:

$$J(v) = \left[6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \right] \quad (IV.11)$$

$$v = K_v \Theta_{eff2} \quad (IV.12)$$

y,

$$\Theta_{eff2} = \arctg(-h_1/9000) \quad \text{grados} \quad (IV.13)$$

$$K_v = 1.35 \quad \text{para } 100 \text{ MHz} \quad (IV.14)$$

$$K_v = 3.31 \quad \text{para } 600 \text{ MHz} \quad (IV.15)$$

$$K_v = 6.00 \quad \text{para } 2000 \text{ MHz} \quad (IV.16)$$

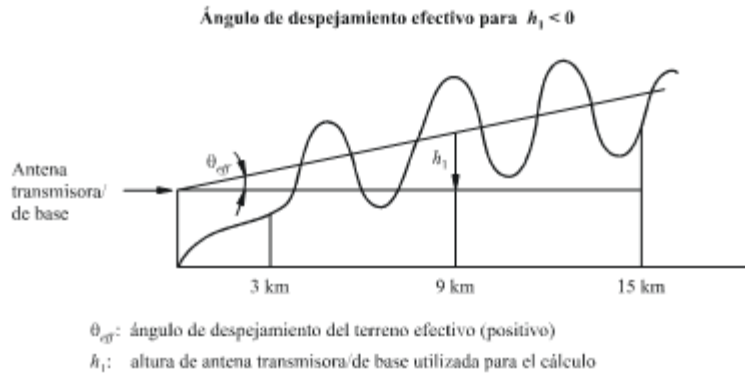


Figura IV-1 ángulo de despejamiento

Paso 8: Si la frecuencia requerida no coincide con la frecuencia nominal inferior, repetir todo el paso 7 para la frecuencia nominal superior. Una vez obtenido estos dos resultados se pasará a realizar la siguiente interpolación en frecuencia.

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \log \left(\frac{f}{f_{inf}} \right) / \log \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.17)$$

dónde:

- f : frecuencia para la que se requiere la predicción (MHz)
- f_{inf} : frecuencia nominal inferior (100 MHz si $f < 600$ MHz, si no 600 MHz)
- f_{sup} : frecuencia nominal superior (600 MHz si $f < 600$ MHz, si no 2 000 MHz)
- E_{inf} : valor de la intensidad de campo para f_{inf}
- E_{sup} : valor de la intensidad de campo para f_{sup}

Una vez realizado este proceso, se ha de realizar de nuevo la limitación de la intensidad de campo eléctrico como en el paso 7.3.1.

Paso 9: Comprobar si el porcentaje de tiempo coincide con el porcentaje de tiempo nominal inferior, en caso de que no coincida, repetir los paso 6 a 8, para el porcentaje de tiempo nominal superior.

Cuando se han obtenido los campos eléctricos correspondientes se realizará la interpolación correspondiente que viene definida por las siguientes ecuaciones:

$$E = E_{sup}(Q_{inf} - Q_t)/(Q_{inf} - Q_{sup}) + E_{inf}(Q_t - Q_{sup})/(Q_{inf} - Q_{sup}) \quad dB(\mu \frac{V}{m}) \quad (IV.18)$$

dónde:

- t : porcentaje de tiempo para el que se requiere la predicción
- t_{inf} : porcentaje de tiempo nominal inferior
- t_{sup} : porcentaje de tiempo nominal superior
- $Q_t = Q_t(t/100)$

$$Q_{inf} = Q_i(t_{inf}/100)$$

$$Q_{sup} = Q_i(t_{sup}/100)$$

E_{inf} : valor de la intensidad de campo para el porcentaje de tiempo t_{inf}

E_{sup} : valor de la intensidad de campo para el porcentaje de tiempo t_{sup}

Una vez calculado el campo correspondiente a todos los parámetros de entrada del sistema se van a realizar una serie de correcciones dependiente del tipo de entorno y terreno en el que se propaga la onda electromagnética.

Corrección 1: Si disponemos de información del terreno, lo cual, al tener mapas digitales de terreno es cierto, podemos calcular el ángulo de despejamiento del terreno para cada cualquier punto del terreno, tratando cada uno de estos puntos del terreno como una antena receptora. Una vez calculado el ángulo de despejamiento, podremos corregir la intensidad de campo para cada punto del terreno.

Para ello conviene seguir el siguiente procedimiento:

El ángulo de despejamiento del terreno Θ_{tca} viene dado por:

$$\Theta_{tca} = \Theta \text{ grados} \quad (\text{IV.19})$$

Donde Θ es el ángulo de elevación de la línea que, con origen en la antena receptora, es rasante a todos los obstáculos hasta una distancia de 16 km, pero sin ir más allá, de la antena transmisora/de base.

Al calcular Θ no se debe tener en cuenta la curvatura de la Tierra. El valor de Θ_{tca} debe limitarse de manera que no sea inferior a +0,55° o superior a +40,0°.

Cuando se dispone de la información pertinente sobre el ángulo de despejamiento del terreno, la corrección de la intensidad de campo que se debe efectuar se calcula aplicando la fórmula siguiente:

$$\text{Corrección} = J(v') - J(v) \quad \text{dB} \quad (\text{IV.20})$$

Donde $J(v)$ se obtiene mediante la ecuación (IV-11):

$$v' = 0.036\sqrt{f} \quad (\text{IV.21})$$

$$v = 0.065\Theta_{tca}\sqrt{f} \quad (\text{IV.22})$$

Θ_{tca} : ángulo de despejamiento del terreno (grados)

f : frecuencia requerida (MHz).

Corrección 2: Altura de antena receptora:

Los valores de intensidad de campo dados por las tabulaciones corresponde a una altura de antena receptora de referencia, $R(m)$, que representa la altura de la ocupación del terreno que rodea a la antena receptora con un límite inferior de altura de 10 m. Esta altura de referencia depende del entorno donde se realiza la propagación de la onda. Ejemplo son 10 m para una zona suburbana, 20 para una zona urbana o 30 para una zona densamente poblada.

Cuando la antena receptora esté situada en el terreno, habrá que tener en cuenta en primer lugar el ángulo de elevación del rayo incidente calculando una altura representativa de los obstáculos circundantes modificada, $R' (m)$, dada por:

$$R' = \frac{1000dR - 15h_1}{1000d - 15} \quad m \quad (IV.23)$$

donde h_1 y $R(m)$ y la distancia $d(Km)$.

Cuando nos encontramos en una zona rural o no urbana $R'=10$ m y realizamos el cálculo de la corrección de la siguiente manera:

$$Corrección = K_{h2} \log(h_2/R') \quad (IV.24)$$

$$K_{h2} = 3.2 + 6.2 \log(f) \quad (IV.25)$$

De tratarse de una zona urbana podemos considerar dos opciones correspondientes a la densidad de población de la zona, lo cual se traduce a dos R distintas. En el caso de proyecto se han seleccionado las alturas de referencia de 20 y 30 metros.

Una vez seleccionado la R correspondiente se procede a realizar de nuevo el cálculo de R'

$$R' = \frac{1000dR - 15h_1}{1000d - 15} \quad m \quad (IV.26)$$

Una vez calculado R' se procederá a realizar el cálculo de la corrección de la siguiente manera:

$$Corrección = 6.03 - J(v) \quad dB \text{ para } h_2 < R' \quad (IV.27)$$

$$Corrección = K_{h2} \log(h_2/R') \quad dB \text{ para } h_2 \geq R' \quad (IV.28)$$

Donde $J(v)$ se obtiene mediante la ecuación (IV-11).

y:

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \Theta_{clut}} \quad (IV.29)$$

$$h_{dif} = R' - h_2 \quad m \quad (IV.30)$$

$$\Theta_{clut} = \arctg(h_{dif}/27) \quad \text{grados} \quad (IV.31)$$

$$K_{h2} = 3.2 + 6.2 \log(f) \quad (IV.32)$$

$$K_{nu} = 0.0108\sqrt{f} \quad (IV.33)$$

$$f : \text{frecuencia (MHz)} \quad (IV.34)$$

En caso de que R' sea inferior a 10 metros, la corrección obtenida deber ser reducida por la expresión siguiente:

$$\text{Corrección} = K_{h2} \log(10/R') \quad (IV.35)$$

Corrección 3: El método que se describe a continuación permite calcular la variabilidad con las ubicaciones en una zona pequeña, y es útil en los casos que se aplica el TCA para determinar con mayor precisión el valor mediano local de las intensidades de campo.

Cuando no se aplica el TCA, el valor pertinente de la variabilidad con las ubicaciones será mayor, y por lo general, variará en función del radio de la zona de servicio, puesto que se incluye una variedad más amplia de terreno y obstáculos.

Del extenso análisis de los datos se deduce que la distribución del valor mediano de la intensidad de campo debida a variaciones en la ocupación del suelo, en dicha área en entornos urbanos y suburbanos, es aproximadamente log-normal.

Así pues, en la ubicación de una antena receptora, la intensidad de campo E rebasada en el $q\%$ de las ubicaciones viene dada por:

$$E(q) = E(\text{mediana}) + Q_i\left(\frac{q}{100}\right)\sigma_L(f) \text{ dB}\left(\mu\frac{V}{m}\right) \quad (IV.36)$$

donde:

$Q_i(x)$: distribución normal acumulativa complementaria inversa en función de la probabilidad

σ_L : desviación típica de la distribución gaussiana de las medias locales en la zona en estudio.

Los valores de la desviación típica dependen de la frecuencia y el entorno, y los resultados de los estudios empíricos han mostrado que se produce una dispersión considerable. A continuación se muestra una tabla con valores típicos de la desviación típica dependiendo de tipo de radiodifusión:

Valores de variabilidad utilizados en ciertas situaciones de planificación

	Desviación típica (dB)		
	100 MHz	600 MHz	2 000 MHz
Radiodifusión, analógica	8,3	9,5	–
Radiodifusión, digital	5,5	5,5	5,5

Tabla IV-2 desviación típica para distintos servicios de radiodifusión.

El porcentaje de ubicaciones q puede variar entre 1 y 99, por lo que para valores inferiores al 1 % y superiores al 99% no hay métodos para el cálculo y por tanto no se han implementado en la herramienta.

Tras realizar todos estos cálculos conviene volver a limitar la intensidad de campo resultante al máximo indicado por la ecuación ya comentada con anterioridad.

La recomendación UIT-1546 describe un método para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico para distancias mayores a 1 Km, pero, también describe un método para calcular el campo eléctrico en distancias inferiores a esta distancia. Este método se describe a continuación:

Se calcula la intensidad de campo, E , a una distancia menor de 1 km, mediante:

$$E = E_{\max nf} \quad dB \left(\mu \frac{V}{m} \right) \quad \text{para } d \leq d_{nf} \quad (IV.37)$$

$$E = E_{\max d} \quad dB \left(\mu \frac{V}{m} \right) \quad \text{para } d_{nf} < d \leq 0.1 \text{ km} \quad (IV.38)$$

$$E = E_{0.1 \text{ km}} + (E_{1 \text{ km}} - E_{0.1 \text{ km}}) \log(d/0.1) \quad dB \left(\mu \frac{V}{m} \right) \quad \text{para } 0.1 \text{ km} < d \leq 1 \text{ km} \quad (IV.39)$$

donde:

$E_{\max nf}$ = máxima intensidad de campo a una distancia de d_{nf} km, expresada mediante la ecuación (IV-5)

$E_{\max d}$ = máxima intensidad de campo a la distancia requerida, expresada mediante la ecuación (IV-5)

$E_{0.1 \text{ km}}$ = máxima intensidad de campo a una distancia de 0,1 km, expresada mediante la ecuación (IV-5)

$E_{1 \text{ km}}$ = intensidad de campo a una distancia de 1 km

y d_{nf} es una estimación de la distancia de campo cercano de la antena transmisora/de base dada por:

$$d_{nf} = 10^{0.1G/(10f)} \quad \text{km} \quad (IV.40)$$

donde:

G es la *ganancia* de la antena, en dBi.

f es la frecuencia, en MHz.

Debe limitarse el valor de d_{nf} de modo que $d_{nf} \leq 0,1 \text{ km}$.

Se recomienda un valor por defecto de $d_{nf} = 0,01 \text{ km}$.

Las correcciones relativas a la estación receptora/móvil siguen siendo válidas. Si se aplican, ha de ser en el emplazamiento real de la estación receptora/móvil, y no a 1 km de la estación transmisora.

Tras este paso concluye el método que se ha implementado para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico, siguiendo la recomendación UIT-1546.

Por último, se ha de comentar que a lo largo de la implementación de esta recomendación se ha utilizado la función de distribución normal acumulativa complementaria inversa, así que a continuación se muestra una manera de mediante una aproximación, calcular dicha función:

La siguiente aproximación a la función de distribución normal acumulativa complementaria inversa, $Q_i(x)$, es válida para $0,01 \leq x \leq 0,99$:

$$Q_i(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{si } x \leq 0.5 \quad (\text{IV.41})$$

$$Q_i(x) = -\{T(1-x) - \xi(1-x)\} \quad \text{si } x > 0.5 \quad (\text{IV.42})$$

donde:

$$T(x) = \sqrt{[-2\ln(x)]} \quad (\text{IV.43})$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2.T(x)+C_1).T(x)]+C_0}{[(D_3.T(x)+D_2).T(x)+D_1].T(x)+1} \quad (\text{IV.44})$$

$$C_0 = 2.5115517 \quad (\text{IV.45})$$

$$C_1 = 0.802853 \quad (\text{IV.46})$$

$$C_2 = 0.010328 \quad (\text{IV.47})$$

$$D_1 = 1.432788 \quad (\text{IV.48})$$

$$D_2 = 0.189269 \quad (\text{IV.49})$$

$$D_3 = 0.001308 \quad (\text{IV.50})$$

