



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**

Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

# **CÁLCULO AUTOMATIZADO DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO POR ONDA DE SUPERFICIE**

**Alumno: Pedro José Hidalgo Cobo**

***Tutor (1): Prof. D. Pedro J. Reche López***

**Depto.: Ingeniería de Telecomunicación**

**Tutor (2): Prof. D. J. Fernando Rivas Peña**

**Depto.: Ingeniería de Telecomunicación**

**Junio, 2017**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                   | <b>4</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>                                    | <b>6</b>  |
| <b>1 RESUMEN.....</b>                                            | <b>7</b>  |
| <b>2 INTRODUCCIÓN .....</b>                                      | <b>10</b> |
| 2.1 ONDA DE SUPERFICIE .....                                     | 10        |
| 2.2 GEOMETRÍA ESFÉRICA .....                                     | 17        |
| 2.3 GRWAVE.....                                                  | 17        |
| 2.4 DosBOX .....                                                 | 18        |
| 2.5 GUIDE.....                                                   | 18        |
| <b>3 OBJETIVOS .....</b>                                         | <b>19</b> |
| <b>4 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                              | <b>20</b> |
| 4.1 NORTON .....                                                 | 20        |
| 4.2 PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE SOBRE TIERRA PLANA.....   | 23        |
| 4.3 MILLINGTON.....                                              | 24        |
| 4.4 RECOMENDACIÓN P.368 .....                                    | 27        |
| 4.5 GOOGLE EARTH.....                                            | 29        |
| 4.6 CÁLCULO DE DISTANCIAS SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.....     | 32        |
| 4.7 GRWAVE.....                                                  | 32        |
| 4.8 DosBOX .....                                                 | 36        |
| 4.9 GUIDE.....                                                   | 38        |
| 4.9.1 Edit Text.....                                             | 38        |
| 4.9.2 Pop-up Menu.....                                           | 39        |
| 4.9.3 Push Button .....                                          | 39        |
| 4.9.4 Axes .....                                                 | 39        |
| <b>5 DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....</b>                             | <b>40</b> |
| <b>6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>                     | <b>56</b> |
| <b>7 ANEXOS .....</b>                                            | <b>59</b> |
| 7.1 MANUAL DE USUARIO.....                                       | 59        |
| 7.1.1 Obtener curvas de la recomendación P.368 de la ITU-R ..... | 60        |
| 7.1.2 Estudio de propagación mediante archivo kml .....          | 62        |
| 7.1.2.1 Crear el fichero kml .....                               | 63        |
| 7.1.3 Estudio de propagación mediante coordenadas .....          | 64        |

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.1.4    | Casos .....                                                   | 65        |
| 7.1.4.1  | Caso del estudio de propagación con fichero kml.....          | 65        |
| 7.1.4.2  | Caso del estudio de propagación mediante las coordenadas..... | 68        |
| 7.1.4.3  | Caso para generar curvas de la ITU-R.....                     | 70        |
| 7.2      | MANUAL DEL PROGRAMADOR .....                                  | 72        |
| <b>8</b> | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                       | <b>85</b> |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.2.1 FACTOR DE ATENUACIÓN, A, EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA NUMÉRICA, P .....                                                            | 13 |
| FIGURA 2.1.2 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL SUELO.....                                                                                        | 14 |
| FIGURA 2.1.3 GRÁFICA EXTRAÍDA DE LA RECOMENDACIÓN P.368 DE LA ITU-R .....                                                                     | 15 |
| FIGURA 2.2.1 CÍRCULO MÁXIMO.....                                                                                                              | 17 |
| TABLA 4.1.1 TABLA QUE COMPARA LA FUNCIÓN DE ATENUACIÓN DE SOMMERFELD Y LAS APROXIMACIONES DE NORTON SEGÚN<br>DIFERENTES VALORES DE P Y B..... | 22 |
| FIGURA 4.3.1 TRAYECTO NO HOMOGÉNEO .....                                                                                                      | 25 |
| FIGURA 4.3.2 MILLINGTON PARA UN TRAYECTO CON DOS MEDIOS.....                                                                                  | 25 |
| FIGURA 4.3.3 MILLINGTON PARA UN TRAYECTO CON TRES MEDIOS .....                                                                                | 25 |
| FIGURA 4.3.4 MILLINGTON PARA UN TRAYECTO CON TRES MEDIOS .....                                                                                | 26 |
| FIGURA 4.4.1 GRÁFICA EXTRAÍDA DE LA RECOMENDACIÓN P.368 DE LA ITU-R.....                                                                      | 28 |
| FIGURA 4.5.1 FICHERO KML (PARTE 1) .....                                                                                                      | 30 |
| FIGURA 4.5.2 FICHERO KML (PARTE 2) .....                                                                                                      | 31 |
| FIGURA 4.8.1 FICHERO DE ENTRADA DE GRWAVE .....                                                                                               | 33 |
| FIGURA 4.8.2 FICHERO DE SALIDA DE GRWAVE .....                                                                                                | 34 |
| FIGURA 4.8.3 MAPA DE LA CONDUCTIVIDAD DEL SUELO DE ESPAÑA .....                                                                               | 35 |
| FIGURA 4.8.4 MAPA DE LA CONDUCTIVIDAD DEL SUELO DE JAPÓN.....                                                                                 | 35 |
| FIGURA 4.8.5 VALORES DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA.....                                                                                      | 36 |
| FIGURA 4.9.1 VENTANA DE INICIO DE DosBOX .....                                                                                                | 37 |
| FIGURA 4.9.2 FICHERO DE CONFIGURACIÓN DE INICIO DE DosBOX .....                                                                               | 37 |
| FIGURA 4.9.1 GUI DE PRINCIPAL_UNO.M.....                                                                                                      | 38 |
| FIGURA 4.9.4.1 ELEMENTO "AXES" DE GUIDE .....                                                                                                 | 39 |
| FIGURA 5.1 CURVA OBTENIDA CON LA FUNCIÓN IMPLEMENTADA PARA TIERRA MUY SECA PARA UNA FRECUENCIA DE 5 MHZ ....                                  | 46 |
| FIGURA 5.2 CURVA DE LA RECOMENDACIÓN P.368 PARA TIERRA MUY SECA .....                                                                         | 46 |
| FIGURA 5.3 CURVA OBTENIDA CON LA FUNCIÓN IMPLEMENTADA PARA HIELO DE AGUA DULCE PARA UNA FRECUENCIA DE 7.5 MHZ<br>.....                        | 47 |
| FIGURA 5.4 CURVA DE LA RECOMENDACIÓN P.368 PARA HIELO DE AGUA DULCE.....                                                                      | 47 |
| FIGURA 5.5 CURVA OBTENIDA CON LA FUNCIÓN IMPLEMENTADA PARA AGUA DE MAR CON SALINIDAD MEDIA PARA UNA<br>FRECUENCIA DE 15 MHZ.....              | 48 |
| FIGURA 5.6 CURVA DE LA RECOMENDACIÓN P.368 PARA AGUA DE MAR CON SALINIDAD MEDIA.....                                                          | 48 |
| FIGURA 5.7 CURVA OBTENIDA CON LA FUNCIÓN IMPLEMENTADA PARA TIERRA HÚMEDA PARA FRECUENCIAS DE 1MHZ, 1.5MHZ Y<br>3MHZ.....                      | 49 |
| FIGURA 5.8 CURVA DE LA RECOMENDACIÓN P.368 PARA TIERRA HÚMEDA.....                                                                            | 49 |
| FIGURA 7.1.1 INTERFAZ_PRINCIPAL.FIG.....                                                                                                      | 60 |
| FIGURA 7.1.1.1 INTERFAZ_CURVAS.FIG.....                                                                                                       | 60 |
| FIGURA 7.1.1.2 VALORES PERMITIVIDAD DIELECTRICA.....                                                                                          | 61 |
| FIGURA 7.1.1.3 VALORES CONDUCTIVIDAD DE LA REGIÓN DE ESPAÑA .....                                                                             | 61 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 7.1.2.1 INTERFAZ_UNO.FIG .....                                                         | 62 |
| FIGURA 7.1.3.1 INTERFAZ_DOS.FIG.....                                                          | 64 |
| FIGURA 7.1.4.1 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 1).....                                  | 65 |
| FIGURA 7.1.4.2 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 2) .....                                 | 66 |
| FIGURA 7.1.4.3 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 3). MAPA DE CONDUCTIVIDAD DE EUROPA..... | 66 |
| FIGURA 7.1.4.4 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 4) .....                                 | 67 |
| FIGURA 7.1.4.5 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 5) .....                                 | 67 |
| FIGURA 7.1.4.6 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 6) .....                                 | 67 |
| FIGURA 7.1.4.7 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON KML (PARTE 7) .....                                 | 68 |
| FIGURA 7.1.4.2.1 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON COORDENADAS (PARTE 1) .....                       | 68 |
| FIGURA 7.1.4.2.2 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON COORDENADAS (PARTE 2) .....                       | 69 |
| FIGURA 7.1.4.2.2 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON COORDENADAS (PARTE 3) .....                       | 69 |
| FIGURA 7.1.4.2.2 ESTUDIO DE PROPAGACIÓN CON COORDENADAS (PARTE 4) .....                       | 70 |
| FIGURA 7.1.4.3.1 GENERAR CURVAS DE LA ITU-R (PARTE 1).....                                    | 70 |
| FIGURA 7.1.4.3.2 GENERAR CURVAS DE LA ITU-R (PARTE 2).....                                    | 71 |
| FIGURA 7.1.4.3.3 GENERAR CURVAS DE LA ITU-R (PARTE 3).....                                    | 71 |
| FIGURA 7.1.4.3.4 GENERAR CURVAS DE LA ITU-R (PARTE 4).....                                    | 72 |
| FIGURA 7.2.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE PRINCIPAL_UNO.M.....                                        | 76 |
| FIGURA 7.2.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PRINCIPAL_DOS.M .....                                       | 76 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 1 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISTANCIAS SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE .....                                                   | 40 |
| TABLA 2 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE TIERRA PLANA Y TIERRA ESFÉRICA.....                                                              | 41 |
| TABLA 3 COMPARACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO INCIDENTE SEGÚN EL TIPO DE POLARIZACIÓN DE LA ANTENA EMISORA .....                             | 42 |
| TABLA 4 COMPARACIÓN DE LA CURVAS DE LA ITU-R CON LA FUNCIÓN "GRWAVE.M" .....                                                           | 44 |
| TABLA 5 COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CAMPO ELÉCTRICO PARA DISTINTAS ALTURAS EFECTIVAS DE LAS ANTENAS<br>TRANSMISORA Y RECEPTORA ..... | 45 |
| TABLA 6 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE (PARTE 1) .....                                               | 50 |
| TABLA 7 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE (PARTE 2) .....                                               | 51 |
| TABLA 8 COMPARACIÓN DE LOS DISTINTOS MODELOS DE PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE PARA DISTANCIAS QUE SUPERAN<br>EL LÍMITE.....       | 52 |
| TABLA 9 COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE MILLINGTON PARA LOS DISTINTOS MODELOS (PARTE 1).....                                                 | 53 |
| TABLA 10 COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE MILLINGTON PARA LOS DISTINTOS MODELOS (PARTE 2).....                                                | 54 |

## 1 RESUMEN

El objetivo del proyecto es el desarrollo de un software que permita el cálculo del nivel de campo recibido en cierto emplazamiento a partir del conocimiento de la posición geográfica del transmisor y considerando las propiedades eléctricas del terreno.

Este cálculo se realiza empleando el modelo de propagación por onda de superficie que es el mecanismo de propagación dominante para las frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz.

Por una parte, se han implementado las fórmulas existentes que dan cuenta del campo eléctrico a una distancia determinada y, por otra parte, se ha realizado un programa MATLAB que hace uso de otro programa, GRWAVE, recomendado por la ITU (International Telecommunication Union). El mecanismo de propagación mediante onda de superficie era ampliamente utilizado en la segunda mitad del siglo XX. Las frecuencias utilizadas, hasta 30 MHz, permitían cubrir grandes distancias. Actualmente y debido al uso de Internet y los sistemas satelitales hay otros métodos más eficientes para la transmisión de información. Por ello, el programa propuesto por la ITU, GRWAVE, es antiguo, pensado para funcionar en MSDOS, y por sí solo no es capaz de funcionar en los ordenadores actuales, por lo que se ha hecho un esfuerzo para adaptar dicho programa a los ordenadores modernos mediante el uso de un emulador de dicho sistema operativo, denominado DosBOX. Gracias a este emulador, se consigue que GRWAVE pueda funcionar en los ordenadores de hoy en día. Ambos programas pueden descargarse de forma gratuita de Internet.

Básicamente se comparará el nivel de campo que precise el programa GRWAVE, que será el valor que se tomará como referencia con el valor del campo que proporcionan otros métodos más sencillos teniendo en cuenta que el mecanismo de propagación siempre será propagación por onda de superficie.

Para la comparación de los resultados, se toma como referencia el software GRWAVE, como queda dicho. La elección de este software como referencia se debe a que ha sido desarrollado por la ITU, organismo que estudia todo lo relacionado con las telecomunicaciones y, a su vez, es tomado como referencia por los ingenieros en su actividad profesional. Toda esta información está organizada en una serie de documentos, denominados recomendaciones. Todas estas recomendaciones pueden encontrarse en [1]. Si es necesaria una actualización, la ITU se encarga de modificar estas recomendaciones, por lo que el contenido está constantemente en revisión y actualización. En concreto, se va a hacer uso de la recomendación P.368, "Curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz", versión nueve, aprobada en febrero del 2007, que hace uso del software GRWAVE

para predecir el nivel de campo recibido a cierta distancia del transmisor a una cierta distancia y para un terreno específico cuando el mecanismo de propagación es onda de superficie.

Respecto a los métodos alternativos a GRWAVE para predecir el nivel de campo a una determinada frecuencia y en un terreno específico nos vamos a centrar en el método de Norton y un modelo de propagación por onda de superficie asumiendo Tierra plana.

Con objeto de facilitar la introducción de datos de entrada al programa y más concretamente, la ubicación de las estaciones transmisoras y receptoras se va a utilizar el programa Google Earth. Alternativamente, el usuario puede ubicar ambas estaciones indicando sus coordenadas geográficas, latitud y longitud. Se puede utilizar también Google Earth como ayuda para obtener dichas coordenadas. Como nexo de unión entre MATLAB y Google Earth se ha hecho uso de la toolbox "google\_earth", que permite manejar datos de dicho software desde el entorno de MATLAB. Esta toolbox puede adquirirse de manera gratuita en Internet.

Aunque no es necesario conocer la topografía del terreno, pues el mecanismo de propagación por onda de superficie no depende del relieve, si hay que indicar el tipo de terreno por el que la señal se propaga, ya sea, por ejemplo, agua dulce, tierra húmeda o tierra seca. El programa desarrollado cuenta con un menú de ayuda en el que el usuario puede comprobar el trayecto radioeléctrico definido, el tipo de terreno que recorre la onda, segmentando el trayecto y definiendo correctamente las características eléctricas del terreno. Para tal fin, se accederá a los mapas mundiales de conductividad eléctrica y constante dieléctrica que proporciona la recomendación de la ITU [2].

En la recomendación P.368 se proporcionan las curvas que dan cuenta, para un trayecto homogéneo, es decir, donde las características eléctricas del terreno son constantes, del valor del campo eléctrico recibido en función de la distancia para diferentes frecuencias. Una de las tareas planteadas ha sido reproducir estas curvas para una frecuencia arbitraria. [3]

Ya que los datos de los emplazamientos se introducen en términos de latitud y longitud es fundamental determinar la distancia que separa dos puntos sobre la superficie terrestre. Esto conlleva considerar la geometría esférica de la Tierra. Se ha realizado una comparación entre diversos métodos de cálculo de distancias sobre la superficie terrestre para determinar cuál se ajusta mejor a la distancia dada por Google Earth, ya que es el que utilizaremos como modelo de referencia para el cálculo de estas distancias.

El motivo de esta comparación es poder utilizar una función programada en MATLAB que desarrolle dicho método para obtener las distancias necesarias sin que el usuario tenga que indicarlo, ahorrándole una cantidad importante de trabajo y tiempo.

Por último, se han desarrollado una serie de interfaces gráficas, con un diseño sencillo e intuitivo, mediante la herramienta GUIDE, proporcionada por MATLAB, con el objetivo de facilitar la introducción de datos al usuario. En el anexo 1 se indicará el funcionamiento del programa desarrollando un caso de uso.

## 2 INTRODUCCIÓN

En primer lugar, se va a realizar un estudio del funcionamiento del modelo de propagación por onda de superficie, explicando que es una onda de superficie, factores de los que depende y campos de aplicación actuales.

También se explica brevemente las diferencias entre la geometría euclídea y la esférica y por qué ha de usarse esta última en el modelo de propagación por onda de superficie.

Se dan a conocer dos programas que serán muy importantes en este trabajo, GRWAVE Y DosBOX, y una herramienta para desarrollar interfaces gráficas proporcionada por MATLAB, denominada GUIDE.

En segundo lugar, se explican diferentes modelos clásicos de propagación por onda de superficie alternativos a GRWAVE, nuestra referencia: Norton, propagación asumiendo Tierra plana y Millington. Este último, es utilizado cuando realizamos un estudio de propagación por onda de superficie sobre un trayecto no homogéneo, es decir, con diferentes tipos de terreno.

Se explica la razón por la cual se ha elegido trabajar con el software Google Earth.

Por último, se han realizado una serie de pruebas, a partir de cuyos resultados, recogidos en diferentes tablas, han sido extraídas una serie de conclusiones.

### 2.1 Onda de superficie

El modelo de propagación por onda de superficie, utilizado para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz fue investigado en profundidad, en primer lugar por Sommerfeld [4] y seguidamente por Norton [5] [6], King [7] [8] [9], Wait [10], Millington [11] [12], Bremmer [13] [14] y Kahan [15], entre otros.

La onda de superficie ha tenido muchas aplicaciones. A continuación se comentarán algunas de ellas. Una utilidad fue su uso para radiolocalización: El sistema Loran (Long Rang Navigation) desarrollado en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) durante la II Guerra Mundial para guiar los convoyes en el océano Atlántico en condiciones meteorológicas adversas. Se utilizaba una frecuencia de 1.95 MHz (propagación por onda de superficie) y proporcionaba una cobertura de hasta 1200 kilómetros en el mar. Su funcionamiento se basaba en la emisión de pulsos sincronizados desde varias emisoras separadas y conocidas. Fue el primer sistema de navegación para todo tipo de clima y posición. La precisión ofrecida era de 1.5 kilómetros. Tras la guerra se adoptó para fines pacíficos en la guardia costera y pasó a llamarse Loran-A. Este sistema se quedó obsoleto cuando se empezaron a emplear los sistemas satelitales.

En cuanto a la radiodifusión, la onda media (OM), a veces denominada también Frecuencia Media (MF), (del inglés, Medium Frequency) es la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 kHz a 3 MHz. El principal uso de esta banda está normalizado por la ITU para el servicio de radiodifusión sonora terrestre. El modo de propagación principal en esta banda se efectúa por onda de superficie.

Otras aplicaciones de este mecanismo de propagación son: radionavegación aeronáutica, servicios fijados, land mobile, radiotelegrafía móvil marítima, radionavegación marítima, radiolocalización, radionavegación, emisión de sonido y servicios de tiempo y frecuencia estándar. [17]

La onda terrestre que se propaga está formada por la contribución de dos componentes: la onda espacial y la onda de superficie. Cuando las antenas están localizadas cerca de la superficie del suelo, la onda espacial desaparece debido a que el campo reflejado cancela la onda directa, por lo que la propagación, en este caso, solo es debida a onda de superficie. La potencia de la señal se atenúa durante la propagación de manera proporcional a la inversa de la cuarta potencia de la distancia.

La onda de superficie viaja directamente sobre la superficie terrestre. Esta onda, debido a la condición de frontera, que establece que la componente tangencial del campo eléctrico en la frontera entre dos medios es igual a cada lado de la superficie de frontera, no puede propagarse si su polarización es horizontal.

Debido a esta condición de frontera y suponiendo que la Tierra es un conductor perfecto, cosa que se puede suponer a las frecuencias de kHz y pocos MHz, no puede existir un campo eléctrico en su interior, por lo que en la superficie, el campo eléctrico es nulo y, por esta condición de frontera, el campo eléctrico en el aire, superficie paralela a la de la Tierra, es nulo. El terreno, en el rango de frecuencias empleadas (hasta 30 MHz), puede considerarse como un medio conductor. En Richards [16] se pueden encontrar las siguientes fórmulas para el cálculo del campo eléctrico mediante propagación por onda de superficie sobre un conductor perfecto. Estas expresiones dan cuenta del campo recibido en términos de la distancia y la PIRE de la antena transmisora. En todos los casos se asume que se radia una onda con polarización vertical al suelo.

$$|E| = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{d} \quad (1)$$

Donde  $E$  es la intensidad de campo eléctrico,  $P_t$  es la potencia transmitida por la antena emisora, en kilovatios,  $G_t$  es la ganancia de la antena transmisora, en dBi (decibelios referidos a la antena isotrópica) y  $d$  es la distancia al receptor, en kilómetros.

Si se considera que la antena de referencia es una antena vertical corta, cuya ganancia es 3 dBi, la ec.(1) se puede expresar del siguiente modo:

$$|E| = \frac{\sqrt{90P_t}}{d} \quad (2)$$

Sin embargo, la Tierra tiene una conductividad finita al no ser un conductor perfecto. Esto da lugar a que una onda con polarización horizontal penetre una cierta distancia bajo la superficie a causa del efecto pelicular, aunque se disipará rápidamente en forma de calor. Debido a esto, la onda sufre una atenuación muy rápida, por lo que solo cubrirá distancias cortas, así que, como consecuencia de esto, una antena polarizada horizontalmente no es adecuada para un sistema de comunicaciones. Si la onda ha sido polarizada verticalmente, no tiene componente tangencial a la superficie terrestre, hecho que se dará en este trabajo, y, por tanto, puede propagarse. La onda induce cargas en la superficie constituyendo una corriente eléctrica que viaja con la onda.

En Richards [16] se pueden encontrar las siguientes fórmulas correspondientes al cálculo del módulo del campo eléctrico recibido considerando que el terreno por el que se propaga la onda no es un conductor eléctrico perfecto y tiene una cierta conductividad. La expresión recoge también la dependencia con la frecuencia de operación. Como resultado se define un coeficiente de atenuación que modifica el valor de la ec. (2).

$$p = \frac{\pi d \cos b}{60\sigma\lambda^2} \quad (3)$$

$$x = 60\sigma\lambda \quad (4)$$

$$b = \tan^{-1} \frac{\epsilon_r + 1}{x} \quad (5)$$

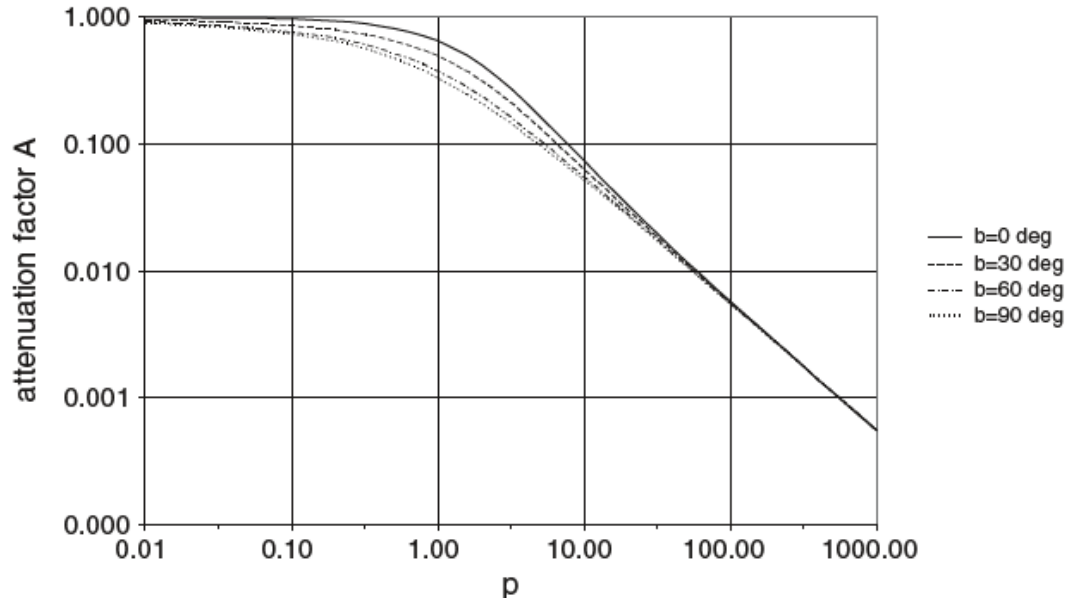
$$A_{90} = \frac{2 + 170p}{2 + 210p + 310p^2} \quad (6)$$

$$A = A_0 - (A_0 - A_{90}) \sin b \quad (7)$$

$$|E| = \frac{\sqrt{90P_{tx}}}{d} A \quad (8)$$

Donde  $p$  es la distancia numérica,  $\varepsilon_r$  es la permitividad relativa de la superficie,  $\lambda$  es la longitud de onda, en metros,  $P_{tx}$  es la potencia transmitida, en kilovatios, y  $d$  es la distancia hasta el receptor, en kilómetros.

Como se puede observar,  $p$  crece con la frecuencia tanto para terrenos conductores como dieléctricos y es inversamente proporcional a la conductividad. Como consecuencia, cuando  $p$  es pequeño, el factor de atenuación,  $A$ , se aproxima a la unidad como puede verse en la figura 2.2.1.



*Figura 2.2.1 Factor de atenuación,  $A$ , en función de la distancia numérica,  $p$*

Se considera que, en este modelo de propagación por onda de superficie, el elemento radiante es una antena vertical corta con una potencia de 1 kW. Si se utiliza otro tipo de antena, habría que modificar apropiadamente la ec. (1) introduciendo el valor de la potencia radiada referenciada a la antena vertical corta (PRAVC) así como la ganancia.

La PRAVC es la potencia radiada donde la antena de referencia es la antena vertical corta. Se puede expresar como el cociente de la ganancia de la antena y la de la antena vertical corta. Si se tiene una antena vertical corta, la PRAVC es, lógicamente, 1 kW. Si se trata de un monopolo de longitud  $\lambda/4$ , cuya ganancia es 3.28, la PRAVC es 1.1 kW. En el caso de que la antena se trate de un dipolo de longitud  $\lambda/2$ , cuya ganancia es de 1.64, la PRAVC sería 0.55 kW.

El medio de propagación de la onda de superficie es la superficie terrestre, por lo que dicha propagación dependerá de las características eléctricas del suelo, que son su conductividad y permitividad dieléctrica. Éstas características varían con el tipo de suelo, como puede observarse en la figura 2.1.2. Dependiendo de la estación del año, un suelo seco puede considerarse húmedo o viceversa, y éste es un factor que se ha de tener en consideración.

| Terreno                       | Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) | Conductividad ( $\sigma$ ) |
|-------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| Agua del mar, salinidad baja  | 80                                      | 1                          |
| Agua del mar, salinidad media | 70                                      | 5                          |
| Agua dulce                    | 80                                      | 3,00E-03                   |
| Tierra                        | 40                                      | 3,00E-02                   |
| Tierra húmeda                 | 30                                      | 1,00E-02                   |
| Tierra moderadamente seca     | 15                                      | 1,00E-03                   |
| Tierra seca                   | 7                                       | 3,00E-04                   |
| Tierra muy seca               | 3                                       | 1,00E-04                   |
| Hielo de agua dulce, -1°C     | 3                                       | 3,00E-05                   |
| Hielo de agua dulce, -10°C    | 3                                       | 1,00E-05                   |

*Figura 2.1.2 Características eléctricas del suelo*

La onda de superficie se puede propagar, con respecto al efecto de la curvatura de la Tierra, según dos modelos: tierra plana o tierra esférica. El modelo de tierra plana supone una propagación de espacio libre con un factor de atenuación, mientras que el modelo de tierra esférica, además, considera los efectos producidos por la difracción debida a la curvatura de la Tierra. El programa GRWAVE considera el efecto de la curvatura terrestre, el resto de los métodos con el que se compara GRWAVE consideran que la Tierra es plana, lo que conlleva a que sus resultados no sean válidos a partir de una cierta distancia.

Para el cálculo del campo eléctrico se debe usar uno u otro método, por tanto, debe existir un criterio para determinar qué modelo es el adecuado. El considerar Tierra plana da lugar a modelos más simplificados. Existe una distancia a partir de la cual el modelo de Tierra plana no es válido, ésta se conoce como la distancia límite. A partir de esta distancia el efecto de la difracción debida a la curvatura de la Tierra es considerable, por lo que se hará uso del modelo de Tierra esférica en lugar del de Tierra plana. En [17] se puede encontrar la siguiente fórmula correspondiente al valor de esta distancia límite:

$$d_{lim}(km) = \frac{80}{\sqrt{f(MHz)}} \quad (9)$$

El programa que recomienda la ITU, GRWAVE, no hace uso de esta limitación de distancia ya que considera un modelo de Tierra esférica, como quedó antes dicho. La recomendación P.368 proporciona una serie de gráficas donde se puede determinar el campo eléctrico a una distancia determinada según la frecuencia y las características eléctricas del terreno. Dichas gráficas se obtuvieron haciendo uso del software GRWAVE, que se explicará y se hará uso del mismo más adelante.

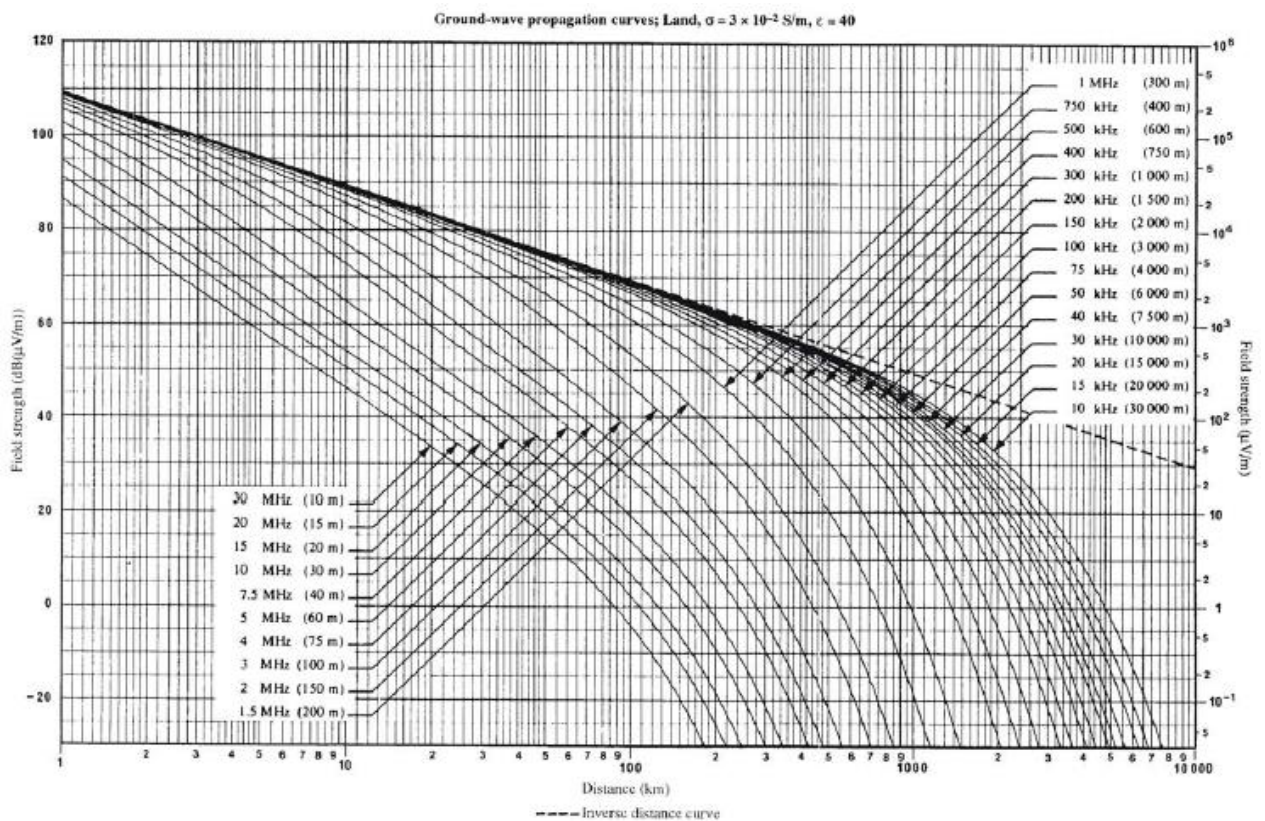


Figura 2.1.3 Gráfica extraída de la recomendación P.368 de la ITU-R

En la figura 2.1.3 se puede observar una gráfica existente en la recomendación P.368 de la ITU-R correspondiente a un terreno con unas determinadas características eléctricas, concretamente, sigma es igual a 0.03 y épsilon a 40. Como puede observarse, el eje de distancia se encuentra en escala logarítmica. El campo eléctrico se expresa en dBu. Estas curvas estándar han sido generadas para diferentes frecuencias suponiendo que la antena emisora es un dipolo corto radiando 1 kW.

El modelo de tierra esférica con polarización vertical hace uso de estas gráficas teniendo en cuenta factores relacionados con la antena emisora, como son la directividad (D) y la potencia radiada en el caso de que el emisor no se trate de una antena vertical corta, en cuyo caso, la directividad es 3 y la potencia es 1 kW. La directividad de una antena vertical corta es 1.5, sin embargo, al aplicar la teoría de las imágenes,

considerando que la Tierra se puede considerar un conductor, éste valor se dobla, por lo que el resultado es, como se ha dicho, tres.

$$E = E_{curva} \sqrt{\frac{P_{rad} D}{3}} \quad (10)$$

Donde,  $P_{rad}$  es la potencia radiada por la antena emisora, en kilovatios,  $D$  es la directividad de la antena emisora, adimensional,  $E_{curva}$  es el campo eléctrico que se lee de las gráficas de la recomendación P.368, en V/m y  $E$  es el campo eléctrico total, en V/m.

La propagación en espacio libre no tiene en cuenta obstáculos que pueden reducir el nivel campo de la onda. Se puede calcular según la siguiente fórmula, que da cuenta del módulo del campo eléctrico haciendo uso del modelo de Tierra plana a una determinada distancia:

$$|E(V/m)| = \sqrt{90} \left( \frac{\sqrt{P_{RADC}(W)}}{d(m)} \right) \quad (11)$$

El problema de la propagación por onda de superficie sobre terreno homogéneo fue resuelto inicialmente por Sommerfeld [4]. Sommerfeld propuso fórmulas complejas para el cálculo de éste campo eléctrico.

El problema de la propagación por onda de superficie por un terreno no homogéneo, es decir, que se tienen discontinuidades en las que las características del suelo varían fue tratado por Millington [9] [10] propuso un método para determinar el campo eléctrico. Aunque este método ofrece buenos resultados, recientemente, se han buscado nuevos métodos para el cálculo de este tipo de trayectos como, por ejemplo, el método de los momentos de Bourlier [18] y el método FDTD de Lili Zhou [19], ambos publicados recientemente, en 2011. En este caso se emplean métodos numéricos para obtener aproximaciones muy cercanas al campo eléctrico resultante.

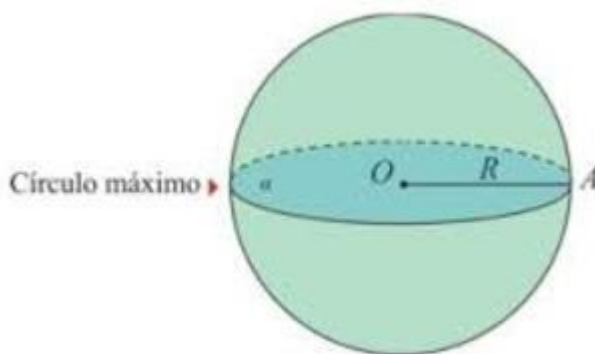
Aunque este modelo de propagación por onda de superficie es muy sencillo de entender y aplicar, tiene una serie de limitaciones.

Las señales transmitidas tienen un ancho de banda disponible para la transmisión muy bajo debido a que son de baja frecuencia. También es necesario que las antenas sean físicamente grandes para poder radiar estas señales, lo que dificulta la instalación y el mantenimiento, además de ser muy costosas económicamente.

## 2.2 Geometría esférica

Es muy importante saber con qué tipo de geometría se está trabajando. Hay que tener en consideración que la Tierra es esférica. En nuestro caso, nuestro objetivo es medir distancias sobre la superficie terrestre, por lo que no es adecuado utilizar una geometría euclídea ya que los resultados obtenidos no serían correctos. Por tanto, se hará uso de la geometría esférica [20]. Algunos de los principios en los que se basa esta geometría son comentados a continuación.

En geometría euclídea, el camino más corto entre dos puntos es una recta. Sin embargo, en geometría esférica, el camino más corto entre dos puntos es un círculo máximo, es decir, una circunferencia trazada sobre la esfera cuyo centro es el mismo centro de la esfera.



*Figura 2.2.1 Círculo máximo*

En geometría esférica, la suma de los ángulos de un triángulo esférico es siempre mayor de  $180^\circ$  mientras que en la geometría de Euclides, es siempre igual a  $180^\circ$ .

Se ha de tener todo esto en cuenta a la hora de realizar los cálculos ya que, de no ser así, se podría inducir a errores importantes.

## 2.3 GRWAVE

Se trata de un software, proporcionado, gratuitamente, por la ITU, desarrollado originalmente para su uso en MSDOS.

Haciendo uso de GRWAVE se puede calcular la intensidad de campo eléctrico para una frecuencia y a una distancia determinadas en función de las características eléctricas del terreno. El programa genera un fichero de texto en donde se accede a dicho valor del campo eléctrico.

## 2.4 DosBOX

Debido a que GRWAVE se desarrolló para ser utilizado con el sistema operativo MSDOS, ha sido necesario emplear este emulador de dicho sistema operativo para poder ejecutarlo.

MSDOS está obsoleto y no es compatible con la arquitectura de los ordenadores modernos. Sin embargo, gracias a este emulador, podemos seguir usando las mismas funciones que poseía MSDOS.

## 2.5 GUIDE

Esta herramienta, proporcionada por MATLAB, permite crear de manera gráfica, interfaces de usuario (GUI).

Su uso, además de ser muy intuitivo, es muy útil a la hora de introducir los datos en el programa.

### 3 OBJETIVOS

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de un programa que permita el cálculo del nivel de campo recibido en cierto emplazamiento a partir del conocimiento de la posición geográfica del transmisor y considerando las propiedades eléctricas del terreno. Para ello se buscarán métodos numéricos para el cálculo de la distancia entre dos puntos sobre la superficie terrestre.

El programa desarrollado en MATLAB realiza una llamada al programa GRWAVE y predecirá el nivel de campo eléctrico haciendo uso de otros métodos más sencillos que consideran Tierra plana, así como de los modelos propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, sector Radiocomunicaciones (UIT-R), por lo que también se hará uso de las recomendaciones P.527 "Características eléctricas de la superficie de la Tierra" y P.368 "Curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz".

Por otra parte, se implementará un programa que permita la representación de las diferentes curvas de propagación que aparecen en la recomendación P.368 de la ITU-R.

Un objetivo muy importante es conseguir integrar el programa implementado en MATLAB con Google Earth. De este modo, se podrán realizar estudios de casos que tengan una aplicación real. Para tal fin, se hará uso de la toolbox "googleearth".

Para determinar las características eléctricas del terreno, conductividad y permitividad dieléctrica, se elaborará una ayuda con el fin de facilitar dichas características al usuario de una manera sencilla.

Además, se buscará una solución que permita que GRWAVE funcione en los ordenadores donde el sistema operativo sea Windows 7 o superior. También se creará una interfaz para que la entrada de datos al programa por parte del usuario sea más cómoda y sencilla. Esta interfaz incorporará la ayuda descrita anteriormente.

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se explican en detalle los diferentes métodos (Norton, propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana, Millington y la recomendación P.368) y materiales (Google Earth, GRWAVE, DosBOX y GUIDE) empleados.

Se indica la formulación de cada uno de estos métodos. En el caso de Millington, además de exponer la fórmula general, para un número cualquiera de discontinuidades, se realizan tres ejemplos correspondientes a dos, tres y cuatro tramos.

### 4.1 Norton

En 1909, Sommerfeld [4] dio solución al problema del efecto en la propagación de la conductividad finita de la superficie terrestre. Esta solución involucraba matemática muy compleja y, aunque muchos investigadores han seguido estudiando este problema, fue Norton [5] [6] el primero que consiguió reducir la complejidad de las ecuaciones de Sommerfeld.

El método de Norton [5] [6], que asume la condición de propagación considerando Tierra plana, es aplicable cuando la altura de la antena es mucho menor que la longitud de onda y para distancias entre las estaciones transmisora y receptora menores que (9). En este caso, la altura efectiva para la propagación por onda de superficie es igual a la mitad de la altura física de la antena.

En [5] [6] se pueden encontrar las ecuaciones siguientes:

$$|E| = \frac{2E_0}{d} f(p, b) \quad (12)$$

$$|E_0(mV/m)| = 173 \frac{\sqrt{P_{kW}}}{d_{km}} \quad (13)$$

Donde  $E_0$ , es la intensidad de campo eléctrico en espacio libre, en V/m,  $d$  es la distancia expresada en kilómetros,  $|E|$  es el módulo del campo eléctrico expresado en V/m y  $f(p, b)$  es la función de atenuación descrita por Sommerfeld [4] producida por las pérdidas de la superficie terrestre [21].

$$f(p, b) = |1 + j\sqrt{\pi p_1} e^{-p_1} \operatorname{erfc}(-j\sqrt{p_1})| \quad (14)$$

Donde,

$$p_1 = p e^{-jb} \quad (15)$$

$$\operatorname{erfc}(-j\sqrt{p_1}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{-j\sqrt{p_1}}^{\infty} e^{-x^2} dx \quad (16)$$

Y  $\operatorname{erfc}$  es la función de error complementario.

Los argumentos  $p$ ,  $b$  están dados por:

$$p = \pi \frac{d (\cos b'')^2}{\lambda x \cos b'} \quad (17)$$

$$b = 2b'' - b' \quad (18)$$

$$x = \frac{\sigma}{w \varepsilon_0} \quad (19)$$

$$\tan b' = \frac{\varepsilon_r - 1}{x} \quad (20)$$

$$\tan b'' = \varepsilon_r / x \quad (21)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del terreno, en S/m,  $\varepsilon_0$  es la permitividad dieléctrica del vacío, en F/m,  $\varepsilon_r$  es la permitividad relativa del terreno,  $\lambda$  es la longitud de onda, en metros y  $w$  es la frecuencia angular.

Una vez propuestas las fórmulas generales, Norton realiza una serie de aproximaciones para la función de atenuación teniendo en cuenta diferentes valores de  $p$  y  $b$ .

$$f_1(p, b) = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2}, \quad b < 5^\circ, \quad p \text{ cualquiera} \quad (22)$$

$$f_2(p, b) = \frac{1}{2p - 3.7}, \quad b < 5^\circ, \quad p > 4.5 \quad (23)$$

$$f_3(p, b) = e^{-0.43p + 0.01p^2}, \quad b < 5^\circ, \quad p \leq 4.5 \quad (24)$$

$$f_4(p, b) = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2} - \sqrt{\frac{p}{2}} \sin be^{-5p/8}, \quad b \geq 5^\circ, \quad p \text{ cualquiera} \quad (25)$$

$$f_5(p, b) = e^{-0.43p+0.01p^2} - \sqrt{\frac{p}{2}} \sin be^{-5p/8}, \quad b \geq 5^\circ, \quad p \leq 4.5 \quad (26)$$

$$f_6(p, b) = \frac{1}{2p - 3.7} - \sqrt{\frac{p}{2}} \sin be^{-5p/8}, \quad b \geq 5^\circ, \quad p \geq 4.5 \quad (27)$$

En el caso de que  $b = 180^\circ$ , la solución exacta es la siguiente:

$$f_7(p, b) = |1 - \sqrt{\pi p} e^p (1 - \operatorname{erf} \sqrt{p})| \quad (28)$$

En la tabla 4.1.1 se muestran los valores de la función de atenuación de Sommerfeld, ec. (14), y de las aproximaciones, programadas en MATLAB, de la función de atenuación de Norton en función de  $p$  y  $b$  para comprobar la validez de dichas aproximaciones dentro del rango de validez de este modelo, es decir, para distancias menores a la distancia límite, que se proporcionó en la ecuación (9).

| <b>p</b> | <b>b</b> | <b>Función de atenuación de Sommerfeld</b> | <b>Aproximación de la función de atenuación de Norton</b> |
|----------|----------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 3.23     | 88.73    | 0.112                                      | 0.09                                                      |
| 5.82     | 89.29    | 0.1050                                     | 0.1176                                                    |
| 0.058    | 1.91     | 0.9875                                     | 0.9753                                                    |
| 15.71    | 2.87     | 0.0353                                     | 0.0405                                                    |
| 0.16     | 4.22     | 0.9359                                     | 0.9349                                                    |

*Tabla 4.1.1 Tabla que compara la función de atenuación de Sommerfeld y las aproximaciones de Norton según diferentes valores de  $p$  y  $b$*

A la vista de los resultados obtenidos, se puede comprobar que las aproximaciones de la función de atenuación de Norton se aproximan a la función de atenuación descrita por Sommerfeld.

La ventaja de utilizar las aproximaciones descritas por Norton es que simplifican el cálculo de la función de atenuación de Sommerfeld y obtiene resultados muy parecidos, con un error que se puede considerar despreciable.

## 4.2 Propagación por onda de superficie sobre Tierra plana

En Richards [16] se muestran la solución discutida por Rohan [22], para el cálculo del campo eléctrico en el caso en el que la Tierra es plana y no es un conductor perfecto.

Esta solución incluye un factor de atenuación que multiplica a la expresión del campo eléctrico cuando la Tierra se considera un conductor perfecto.

Hace uso del concepto de distancia numérica y de ángulo de fase. En función de estos dos parámetros, obtiene la expresión correspondiente a la atenuación por conductividad limitada.

La formulación del procedimiento descrito se encuentra en [16] y es la siguiente:

$$p = \frac{\pi d \cos b}{60 \sigma \lambda^2} \quad (28)$$

$$x = 60 \sigma \lambda \quad (29)$$

$$b = \tan^{-1} \frac{\epsilon_r + 1}{x} \quad (30)$$

$$A_{90} = \frac{2 + 170p}{2 + 210p + 310p^2} \quad (31)$$

$$A = A_0 - (A_0 - A_{90}) \sin b \quad (32)$$

$$|E| = \frac{\sqrt{90 P_{tx}}}{d} A \quad (33)$$

Donde,  $p$  corresponde a la distancia numérica,  $b$  es el ángulo de fase, en grados,  $\sigma$  es la conductividad del suelo, en S/m,  $\epsilon_r$  es la permitividad dieléctrica del suelo,  $\lambda$  es la longitud de onda, expresada en metros,  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor, en metros,  $P_{tx}$  es la potencia transmitida, en kilovatios y  $E$  es el módulo del campo eléctrico en el receptor, expresado en V/m.

Aunque este modelo tiene en cuenta la conductividad finita de la Tierra, no tiene en cuenta la atenuación producida por la curvatura de la misma, es decir, asume un modelo de propagación de Tierra plana con conductividad finita y en consecuencia, la distancia máxima de aplicación está dada por (9).

### 4.3 Millington

Lógicamente, la superficie de la Tierra no es homogénea, es decir, existen diferentes tipos de terreno con distintas características eléctricas. El cambio de un terreno con unas determinadas características eléctricas a otro con distintas características se denomina discontinuidad.

Millington propuso un método eficaz para el caso en el que la onda atraviesa varias discontinuidades en su camino hasta llegar al receptor.

El modelo de Millington [11] [12] [23] puede ser formulado del siguiente modo:

$$E_D = \sum_{k=1}^N E_k(S_k) - \sum_{k=2}^N E_k(S_{k-1}) \quad (34)$$

$$S_k = \sum_{n=1}^k d_n \quad (35)$$

$$E_R = \sum_{k=1}^N E_{N-k+1}(r_k) - \sum_{k=2}^N E_{N-k+1}(r_{k-1}) \quad (36)$$

$$r_k = \sum_{n=1}^k d_{N-n+1} \quad (37)$$

$$E_T = \frac{E_D + E_R}{2} \quad (38)$$

Donde,  $E_D$  es la intensidad del campo eléctrico en un sentido del trayecto, en dBu,  $E_R$  es la intensidad del campo eléctrico en el sentido opuesto, en dBu, y  $E_T$  es la intensidad del campo eléctrico total en el receptor, en dBu.

En primer lugar, mediante las ecuaciones (34) y (35) se calcula el valor del campo eléctrico en un sentido. Después se calcula el valor de campo eléctrico aplicando las

ecuaciones (36) y (37) en sentido contrario. Por último, haciendo uso de la ec. (38) se calcula el campo eléctrico resultante.

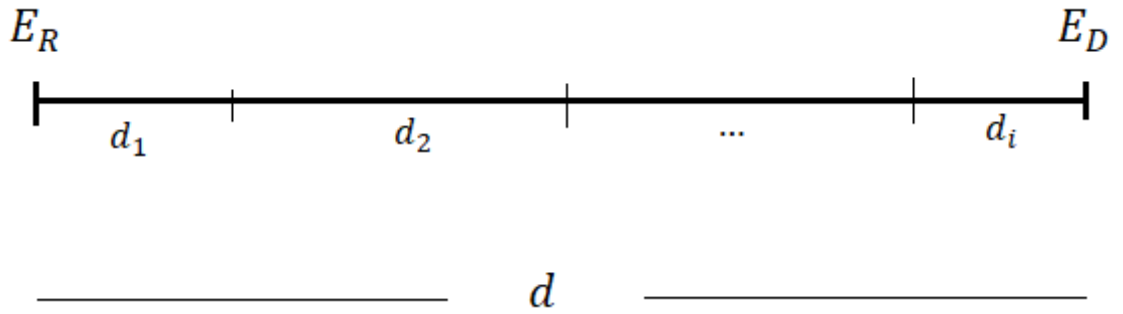


Figura 4.3.1 Trayecto no homogéneo

Desarrollando las fórmulas anteriores, podemos calcular el campo eléctrico para cualquier número de medios. Por ejemplo, si el trayecto a estudiar está formado por dos medios:

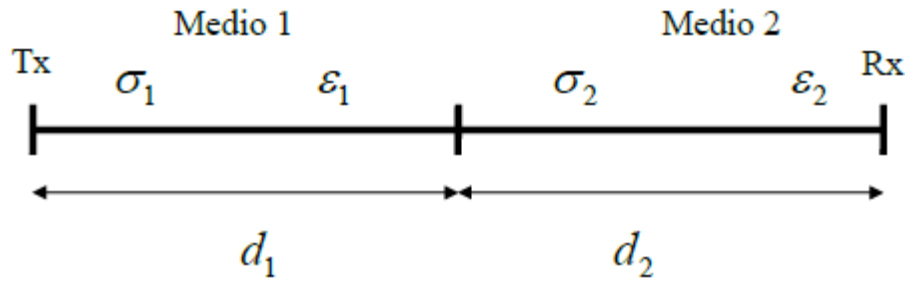


Figura 4.3.2 Millington para un trayecto con dos medios

$$E_D = E_1(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_2(d_1)$$

$$E_R = E_2(d_2) + E_1(d_1 + d_2) - E_1(d_2)$$

$$E_T = \frac{E_D + E_R}{2}$$

En el caso en el que el trayecto presente tres medios:

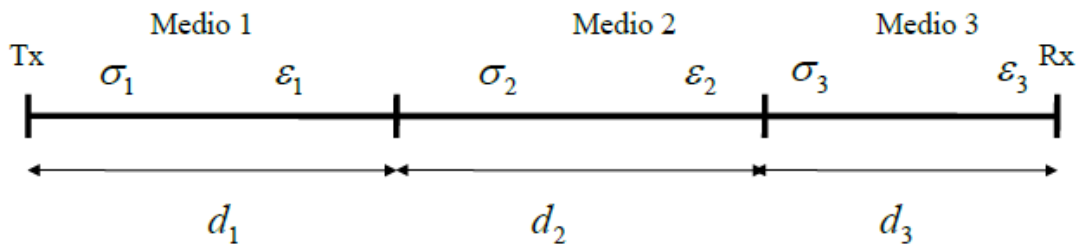


Figura 4.3.3 Millington para un trayecto con tres medios

Para calcular el campo eléctrico total que le llega al receptor, se aplican las siguientes fórmulas:

$$E_D = E_1(d_1) + E_2(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) - E_2(d_1) - E_3(d_1 + d_2)$$

$$E_R = E_3(d_3) + E_2(d_2 + d_3) + E_1(d_1 + d_2 + d_3) - E_2(d_3) - E_1(d_2 + d_3)$$

$$E_T = \frac{E_R + E_T}{2}$$

Por último, si el trayecto está compuesto por cuatro medios:

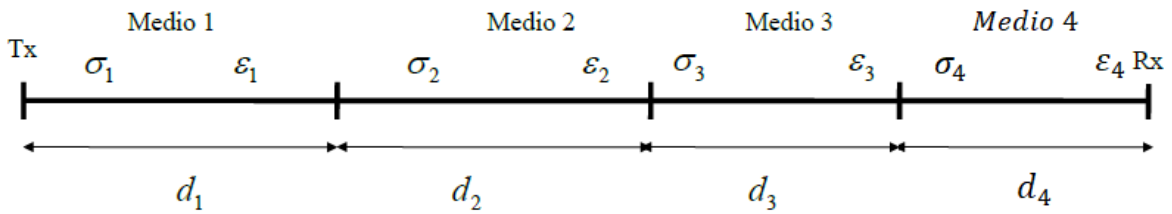


Figura 4.3.4 Millington para un trayecto con tres medios

$$E_D = E_1(d_1) + E_2(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) + E_4(d_1 + d_2 + d_3 + d_4) - E_2(d_1) - E_3(d_1 + d_2) - E_4(d_1 + d_2 + d_3)$$

$$E_R = E_4(d_4) + E_3(d_3 + d_4) + E_2(d_2 + d_3 + d_4) + E_1(d_1 + d_2 + d_3 + d_4) - E_3(d_4) - E_2(d_3 + d_4) - E_1(d_2 + d_3 + d_4)$$

$$E_T = \frac{E_R + E_T}{2}$$

Del mismo modo, si el trayecto está formado por más de cuatro medios, se puede extender el desarrollo anterior aplicando las ecuaciones (34) – (38) para el número de medios deseado.

En el programa principal desarrollado se ha implementado la fórmula general que da cuenta del campo recibido en un trayecto con n discontinuidades.

#### 4.4 Recomendación P.368

Esta norma estandarizada por la ITU-R corresponde a las curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz. Actualmente, la versión disponible es la nueve, correspondiente al año 2007.

Dicha recomendación cuenta con una serie de gráficas que permiten calcular el campo eléctrico a una determinada distancia en función de la frecuencia de trabajo y de las características eléctricas del terreno, es decir, de la conductividad ( $\sigma$ ) y de la permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ).

Haciendo uso de esta recomendación se puede obtener la intensidad de campo eléctrico, tanto para trayectos homogéneos como para trayectos no homogéneos.

Las condiciones de validez que estas curvas han de cumplir para calcular el campo eléctrico en un trayecto homogéneo son las siguientes: [3]

- Se supone un modelo de Tierra esférica homogénea.
- El índice de refracción en la troposfera decrece exponencialmente con la altura, como se describe en la recomendación P.453 [24] de la ITU-R.
- Tanto la antena transmisora como la receptora se encuentra a nivel del suelo. Esto significa que, cuando  $\epsilon_r \ll 60\lambda\sigma$ , estas curvas pueden ser utilizadas hasta una altura  $h = 1.2\sigma^{1/2} \lambda^{3/2}$ .
- El elemento radiante es el monopolo vertical corto con una potencia de 1 kW, asumiendo que se encuentra sobre Tierra plana con una superficie conductora perfecta. La intensidad de campo eléctrico correspondiente a una distancia de un kilómetro sería 300 mV/m. Si el elemento radiante no fuera un monopolo vertical corto, se hace uso de la Tabla 1 de la recomendación P.341 [25] de la ITU-R para referencias estas curvas a otra antena de referencia.
- Las curvas están dibujadas para distancias medidas alrededor de la superficie curva de la Tierra.
- Las curvas dan la componente vertical de la intensidad de campo eléctrico, que puede ser medida en la región de campo lejano de la antena.

En [3], también se definen las pérdidas básicas de transmisión para las mismas condiciones anteriores:

$$L_b = 142 + 20 \log f - E \quad (39)$$

Donde,  $f$  es la frecuencia, en MHz,  $E$  es la intensidad de campo eléctrico, en dBu y  $L_b$  son las pérdidas básicas de transmisión, en dB.

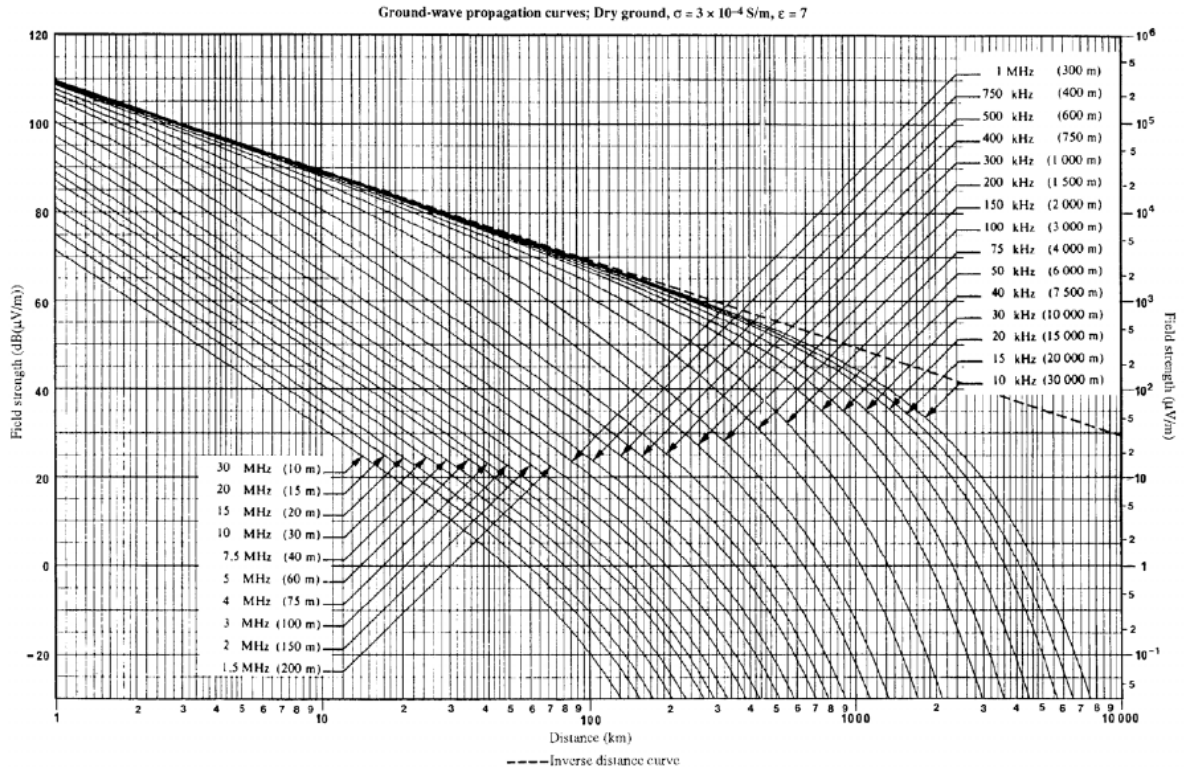


Figura 4.4.1 Gráfica extraída de la recomendación P.368 de la ITU-R

En la figura 4.4.1 se puede observar una gráfica existente en la recomendación P.368 de la ITU-R correspondiente a un terreno con unas determinadas características eléctricas, concretamente, sigma es igual a 0.0003 y épsilon a 7. Como puede observarse, el eje de distancia se encuentra en escala logarítmica. El campo eléctrico se devuelve en dBu. Estas curvas estándar han sido generadas para diferentes frecuencias suponiendo que la antena emisora es un dipolo corto radiando 1 kW.

Estas curvas han sido generadas mediante el programa GRWAVE, que realiza el cálculo de la intensidad de campo eléctrico debido a onda de superficie en función de la frecuencia, las alturas de las antenas y las constantes del suelo, en un rango de frecuencias aproximado entre 10 kHz y 10 GHz. El funcionamiento de este programa será explicado en el apartado 4.8.

Como se ha mencionado con anterioridad, se considera un modelo de tierra curva homogénea y que el elemento radiante es un monopolo vertical corto radiando 1 kW. Por esto, si la antena emisora radia una potencia distinta a 1 kW es necesario aplicar una corrección, ecuaciones (40) y (41), al valor obtenido de dichas curvas.

$$E \left( \frac{\mu V}{m} \right) = E_{curva} \left( \frac{\mu V}{m} \right) \sqrt{\frac{G P_{tx}(kW)}{3}} \quad (40)$$

$$E(dBu) = E_{curva}(dBu) + 10 \log_{10} PRAVC(kW) \quad (41)$$

Donde,  $P_{tx}$  corresponde con la potencia transmitida,  $G$  es la ganancia de la antena emisora,  $E_{curva}$  es el campo eléctrico obtenido mediante las gráficas que aparecen en esta recomendación y  $E$  es el campo eléctrico resultante.

Si en las ecuaciones (39) y (40) se sustituye la potencia transmitida y la ganancia por la de una antena vertical corta, uno y tres respectivamente, se observa que el campo eléctrico resultante coincide con el obtenido mediante las curvas, como era de esperar.

Para casos en los que la distancia entre emplazamientos es mucho menor que la distancia al transmisor, las características reales de la superficie y las condiciones de recepción no coinciden, sino que existe una diferencia de aproximadamente 3.5 dB.

La intensidad de campo eléctrico debida a onda de superficie varía con la temperatura, como puede observarse en la recomendación P.1321 [26], aunque no se ha considerado este factor en el programa implementado.

Estas curvas dan el campo total a una determinada distancia,  $r$ , con un error menor de 1 dB cuando el producto  $kr$  es mayor de 10, donde  $k = 2\pi/\lambda$ .

Los efectos de campo cercano pueden ser incluidos mediante un factor (42), en dB, que incrementa la intensidad de campo eléctrico.

$$+10 \log \left\{ 1 - \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^4} \right\} \quad (42)$$

Para trayectos no homogéneos, propone el método de Millington como el método más preciso disponible. Este método asume que cada sección puede ser considerada individualmente homogénea y, por tanto, se puede aplicar una curva a cada sección. Aparte del método matemático descrito anteriormente (apartado 4.3), propone un método gráfico para el cálculo del campo eléctrico.

## 4.5 Google Earth

Este software consiste en un mapa mundial con numerosas funciones disponibles que serán de gran utilidad en este trabajo.

Es posible desplazarse por el mapa viendo los diferentes emplazamientos, permite calcular distancias entre dos puntos, muestra información de las coordenadas del emplazamiento, podemos definir trayectos, rutas, etc.

El programa principal desarrollado se basa en la posibilidad que nos ofrece esta herramienta de definir trayectos. El usuario utiliza Google Earth para marcar cada punto del trayecto el cual quiere calcular la intensidad de campo eléctrico, mediante el modelo de propagación por onda de superficie. Es posible guardar este trayecto definido por el usuario en un archivo con extensión "kml". Este archivo contiene toda la información referente al trayecto, entre ellos, la latitud y la longitud, que son los datos que nos interesan para realizar el estudio.

A continuación se muestra el contenido de un fichero kml:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2" xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2" xmlns:kml:
<Document>
  <name>Path.kml</name>
  <Style id="s_ylw-pushpin">
    <IconStyle>
      <scale>1.1</scale>
      <Icon>
        <href>http://maps.google.com/mapfiles/kml/pushpin/ylw-pushpin.png</href>
      </Icon>
      <hotSpot x="20" y="2" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
    </IconStyle>
  </Style>
  <StyleMap id="m_ylw-pushpin">
    <Pair>
      <key>normal</key>
      <styleUrl>#s_ylw-pushpin</styleUrl>
    </Pair>
    <Pair>
      <key>highlight</key>
      <styleUrl>#s_ylw-pushpin_hl</styleUrl>
    </Pair>
  </StyleMap>
  <Style id="s_ylw-pushpin_hl">
    <IconStyle>
      <scale>1.3</scale>
      <Icon>
        <href>http://maps.google.com/mapfiles/kml/pushpin/ylw-pushpin.png</href>
      </Icon>
      <hotSpot x="20" y="2" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
    </IconStyle>
  </Style>
```

Figura 4.5.1 Fichero kml (parte 1)

```

<Placemark>
  <name>Madrid</name>
  <LookAt>
    <longitude>-3.703759021783054</longitude>
    <latitude>40.41675587604181</latitude>
    <altitude>0</altitude>
    <heading>6.857056608582485e-005</heading>
    <tilt>0</tilt>
    <range>58085.77814724081</range>
    <gx:altitudeMode>relativeToSeaFloor</gx:altitudeMode>
  </LookAt>
  <styleUrl>#m_ylw-pushpin</styleUrl>
  <Point>
    <gx:drawOrder>1</gx:drawOrder>
    <coordinates>-3.703759021783054,40.41675587604181,0</coordinates>
  </Point>
</Placemark>
<Placemark>

```

*Figura 4.5.2 Fichero kml (parte 2)*

En la figura 4.5.1 se muestra el inicio del fichero kml donde se definen la versión y el estilo de dicho documento.

En la figura 4.5.2 se muestran muestras las características de un emplazamiento, en este caso, de Madrid. Para cada emplazamiento se tiene la estructura que aparece en esta figura. De todos los datos que se pueden leer en el fichero kml solo son de interés, solamente son de interés, la latitud y la longitud de cada emplazamiento.

El procedimiento para obtener un fichero kml con varios emplazamientos se detalla en el manual del usuario (apartado 7.1.2.1).

Además, MATLAB cuenta con una toolbox, denominada "googleearth" que permite manipular datos de Google Earth de una forma sencilla, facilitando el trabajo con estos ficheros. Gracias a esta toolbox se puede extraer la información contenida en el archivo "kml" guardado anteriormente. De esta forma, se obtienen las coordenadas de cada uno de los puntos definidos en el trayecto por el usuario.

También es posible el proceso inverso, es decir, una vez introducidas las coordenadas de los emplazamientos, es posible crear un fichero con extensión "kml" en el que se muestre el trayecto en Google Earth.

Se han contemplado ambas posibilidades en la toolbox implementada.

Por todo este rango de posibilidades, se ha elegido Google Earth.

## 4.6 Cálculo de distancias sobre la superficie terrestre

Conocer las distancias entre los emplazamientos del trayecto es indispensable para poder utilizar el método de propagación por onda de superficie.

En primer lugar, se valoró la opción de que el usuario introdujese la distancia entre cada uno de los puntos manualmente pero, finalmente, se descartó debido a la incomodidad que presentaba para el usuario.

Una vez descartada esta opción se buscaron nuevas posibilidades para facilitar el trabajo al usuario. Gracias al estudio de la geometría esférica explicada en el apartado anterior, se encontró una solución al conocer que existen fórmulas para calcular distancias sobre la superficie de la Tierra de una manera muy sencilla. Pues bien, la solución tomada ha sido desarrollar una función en MATLAB que calcula la distancia entre los puntos conociendo sus coordenadas de latitud y longitud. De esta forma el usuario no tiene que preocuparse de saber de antemano la distancia entre cada uno los emplazamientos, sino que el programa es capaz de calcularla automáticamente.

Debido a la existencia de varios métodos para este cálculo, se han realizado una serie de pruebas para obtener el método más adecuado. Estas pruebas consisten en una comparación de cada uno de los métodos con la distancia calculada por Google Earth, ya que, como se ha explicado, es con este programa con el que el usuario va a interactuar.

Para cada uno de los métodos se ha creado su función correspondiente que será explicada en detalle en el manual del programador (apartado 7.2).

## 4.7 GRWAVE

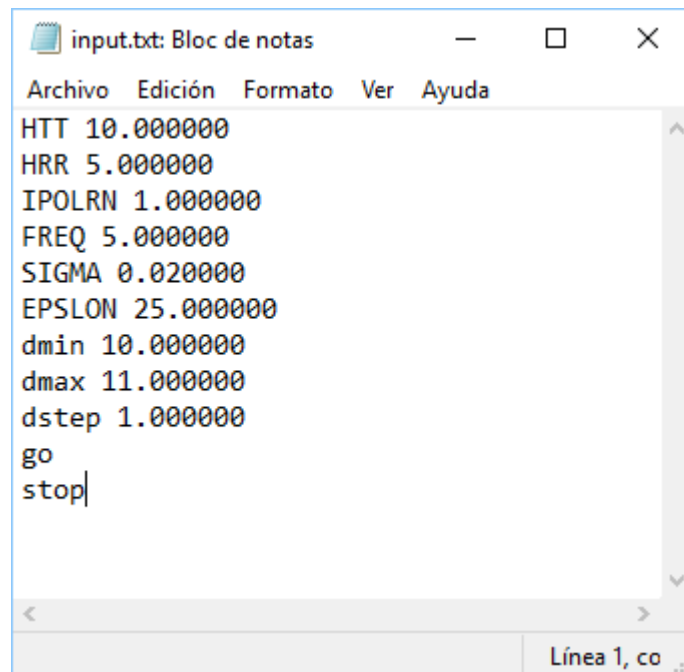
GRWAVE es un software gratuito proporcionado por la ITU-R para calcular el campo eléctrico a una determinada distancia según el modelo de propagación por onda de superficie con características eléctricas conocidas. Fue desarrollado por Gill [27] y está basado en las series de Rotheram [28] [29]. Gracias a este programa se han obtenido las curvas correspondientes a la recomendación P.368 explicada en el apartado 4.5.

Al igual que Holm [30] y Li [31] se ha hecho uso de este software para comprobar la validez de los modelos implementados debido a que GRWAVE fue desarrollado por la ITU-R, organismo de referencia para los temas relacionados con las telecomunicaciones.

Los comandos para ejecutar este software se deben introducir en MSDOS. En el siguiente apartado se explicará cómo emular MSDOS y qué comandos de GRWAVE se han empleado para desarrollar las diferentes funciones en MATLAB.

En el fichero de entrada a GRWAVE se deben especificar las características siguientes:

- HTT: altura efectiva del transmisor (m).
- HRR: altura efectiva del receptor (m).
- IPOLRN: tipo de polarización. Vertical (1), horizontal (2).
- FREQ: frecuencia (MHz).
- SIGMA: conductividad del suelo (S/m).
- EPSLON: permitividad dieléctrica del suelo (F/m).
- dmin: distancia mínima (km).
- dmax: distancia máxima (km).
- dstep: pasos entre la distancia mínima y la máxima.
- go: indica que empieza a ejecutarse.
- stop: cuando acaba, se cierra el programa.



```

input.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
HTT 10.000000
HRR 5.000000
IPOLRN 1.000000
FREQ 5.000000
SIGMA 0.020000
EPSLON 25.000000
dmin 10.000000
dmax 11.000000
dstep 1.000000
go
stop
  
```

*Figura 4.8.1 Fichero de entrada de GRWAVE*

El fichero de salida muestra los parámetros establecidos en el fichero de entrada y añade el nivel de campo para las distancias introducidas, así como las pérdidas básicas de transmisión. Todos los parámetros de entrada se introducen en la interfaz que se ha implementado.

```

*****GRWAVE (RELEASE 2 AT 23/10/1985 )*****
*****COPYRIGHT (C) GEC PLC 1985 *****
CCIR Personal Computer Version 1989 Study Group 5 IWP5/1

```

```

GRWAVE COMPUTES FIELD STRENGTH-DISTANCE VARIATIONS
FOR A HOMOGENEOUS CURVED EARTH WITH EXPONENTIALLY
DECREASING REFRACTIVE INDEX

```

```

ATMOSPHERIC CONSTANTS
REFRACTIVITY =315.00 (N-UNITS)
SCALE HEIGHT = 7.350 KM

```

```

GROUND CONSTANTS
RELATIVE PERMITTIVITY = 25.000
CONDUCTIVITY =2.0000D-02 SIEMENS/METRE

```

```

VERTICAL POLARISATION

```

```

MINIMUM DISTANCE = 10.000 KILOMETRES
MAXIMUM DISTANCE = 11.000 KILOMETRES
DSTEP = 1.000 KILOMETRES

```

```

FREQUENCY = 5.000 MHZ

```

```

TRANSMITTER HEIGHT = 10.0 METRES
RECIEVER HEIGHT = 5.0 METRES

```

| DISTANCE<br>KM | FIELD STRENGTH<br>DB(UV/M) | BASIC TRANSMISSION LOSS<br>DB | LOSS<br>(F) |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|-------------|
| 10.00          | 67.91                      | 86.92                         |             |
| 11.00          | 66.07                      | 88.76                         |             |
| 11.00          | .00                        | .00                           | (R)         |

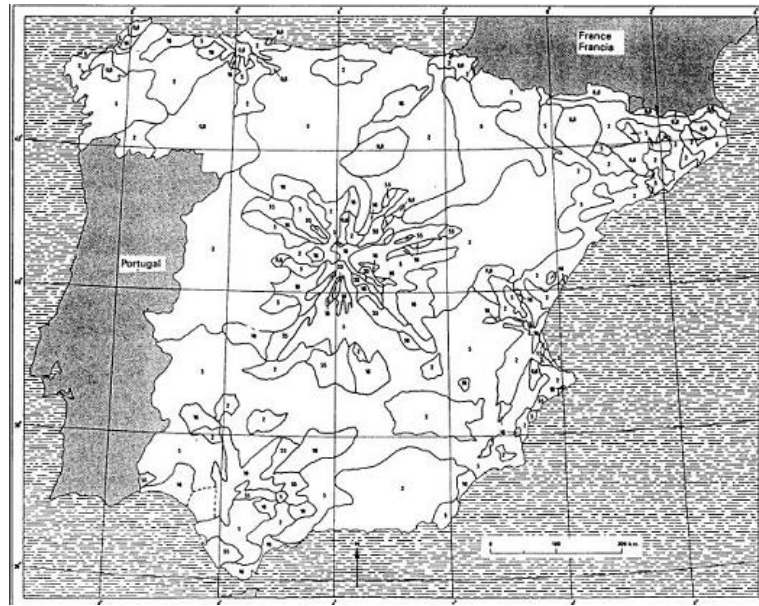
```

Stop - Program terminated.

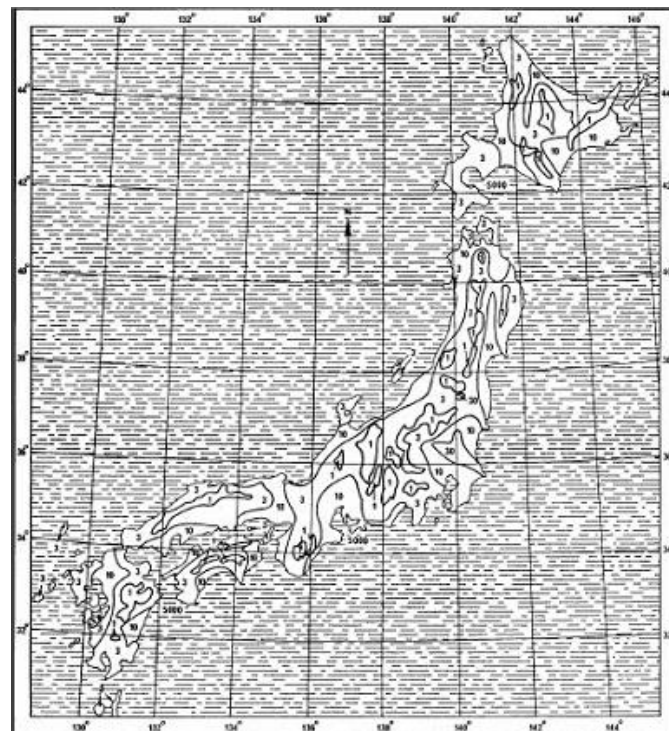
```

*Figura 4.8.2 Fichero de salida de GRWAVE*

Entre los parámetros mostrados, se encuentran los valores de conductividad y permitividad dieléctrica. La dificultad para obtener con precisión estos valores radica en que no existe una base de datos de alta resolución de los mismos. Aunque existe una base de datos para los valores de conductividad, ésta posee una baja resolución y no tiene en cuenta ni ríos ni lagos, que poseen una gran conductividad, por lo que son muy importantes en este trabajo. Sin embargo, la ITU-R proporciona un atlas de conductividad detallado en la recomendación P.832 [32]. Estos mapas se muestran en el menú de ayuda de la aplicación, de modo que, cuando el usuario define un trayecto conozca la conductividad del terreno en todo punto.



*Figura 4.8.3 Mapa de la conductividad del suelo de España*



*Figura 4.8.4 Mapa de la conductividad del suelo de Japón*

El valor de la permitividad dieléctrica no es fácil de determinar ya que tampoco existe una base de datos que englobe todos los terrenos posibles. Además, dicho parámetro varía con la frecuencia. Por ello, se ha elaborado una tabla donde se recogen los valores de la permitividad dieléctrica expuestos en la recomendación P.368 [3] para cada tipo de terreno. Al igual que con los mapas de conductividad, esta tabla es mostrada como ayuda al usuario cuando define un trayecto concreto entre dos estaciones.

| Terreno                                    | Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) | Conductividad ( $\sigma$ ) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| Agua de mar, salinidad baja                | 80                                      | 1                          |
| Agua de mar, salinidad media               | 70                                      | 5                          |
| Agua dulce                                 | 80                                      | $3e^{-3}$                  |
| Tierra                                     | 40                                      | $3e^{-2}$                  |
| Tierra húmeda                              | 30                                      | $1e^{-2}$                  |
| Tierra moderadamente seca                  | 15                                      | $1e^{-3}$                  |
| Tierra seca                                | 7                                       | $3e^{-4}$                  |
| Tierra muy seca                            | 3                                       | $1e^{-4}$                  |
| Hielo de agua dulce, $-1^{\circ}\text{C}$  | 3                                       | $3e^{-5}$                  |
| Hielo de agua dulce, $-10^{\circ}\text{C}$ | 3                                       | $1e^{-5}$                  |

Figura 4.8.5 Valores de la permitividad dieléctrica

## 4.8 DosBOX

DosBOX es un emulador del sistema operativo MSDOS. Ha sido necesario su uso debido a que el software GRWAVE está pensado para ejecutarse en dicho sistema operativo.

Debido a que los ordenadores actuales no disponen de MSDOS, no hemos tenido otra opción que hacer uso de un emulador de este dicho operativo para poder ejecutar GRWAVE.

Al ejecutar DosBOX se abre una ventana de comandos, similar a la que aparecía con MSDOS. Los comandos son similares a los usados en MSDOS.

Para empezar a trabajar es necesario crear un espacio virtual en nuestra carpeta de trabajo donde debe de encontrarse el software GRWAVE. El comando que permite dicha acción es: **"mount [nombre\_espacio\_virtual] [localización\_carpeta\_trabajo]"**.

Una vez creado el espacio virtual, nos movemos a él, introduciendo su nombre en la línea de comandos.

Por último, llamamos a GRWAVE mediante el comando: **"grwave<fichero\_entrada>fichero\_salida"**. Con este comando se ejecuta GRWAVE y toma como fichero de texto de entrada el indicado y el resultado lo imprime en el fichero de salida indicado.

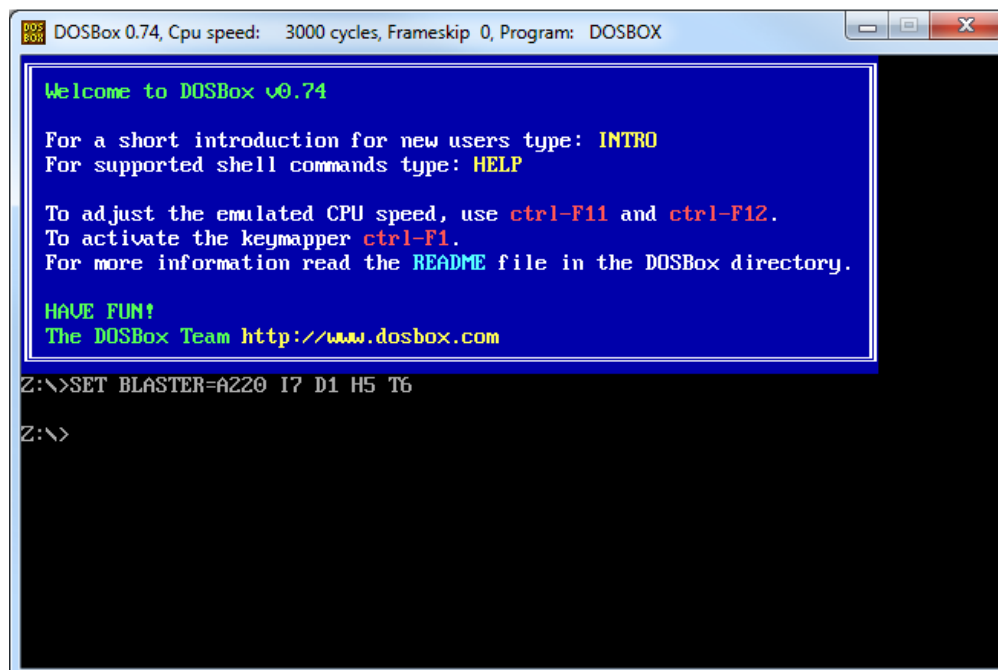


Figura 4.9.1 Ventana de inicio de DosBOX

Cada vez que se inicia este emulador es necesario repetir todos estos comandos. Esto resulta muy incómodo para el usuario, ya que debe introducirlos manualmente y puede dar lugar a fallos. Sin embargo, DosBOX cuenta con un fichero de configuración de inicio, en el cuál se pueden introducir, en orden, los comandos que se ejecutarán automáticamente cuando éste se abra.

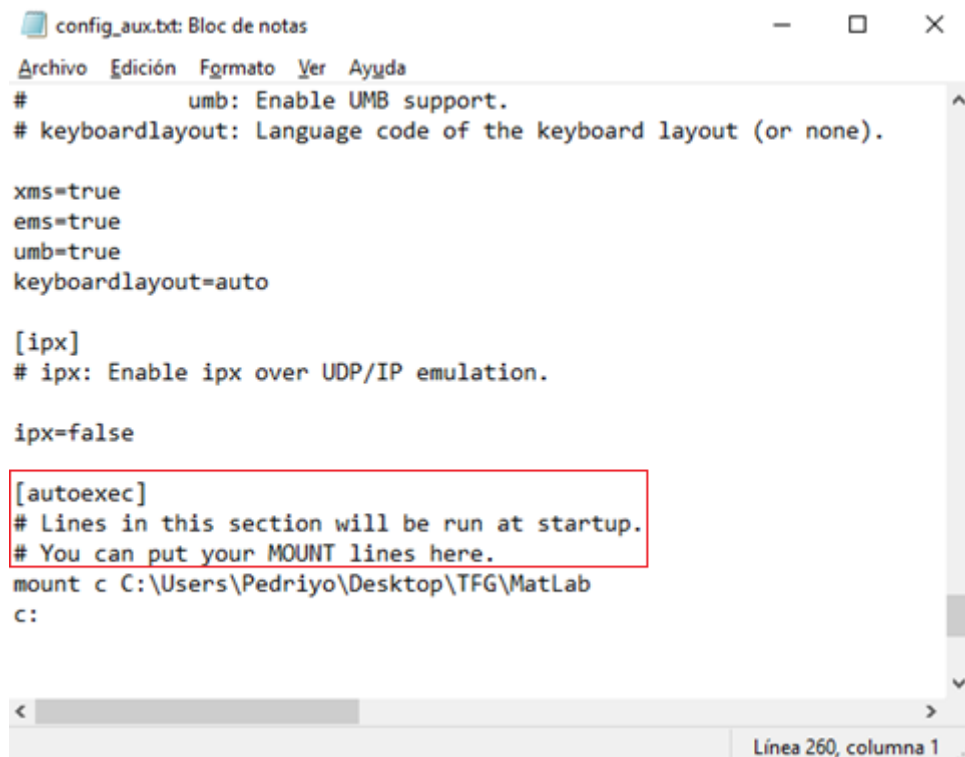


Figura 4.9.2 Fichero de configuración de inicio de DosBOX

## 4.9 GUIDE

GUIDE es una herramienta proporcionada por MATLAB para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario (GUI).

Una vez que ejecutamos esta herramienta, se generan dos archivos: uno con extensión ".m" y otro con extensión ".fig".

En el archivo con extensión ".fig", se pueden colocar, de forma gráfica, distintos elementos: cuadros de texto, botones, lista, figuras, etc. En esta ventana es donde nuestra interfaz gráfica toma forma.

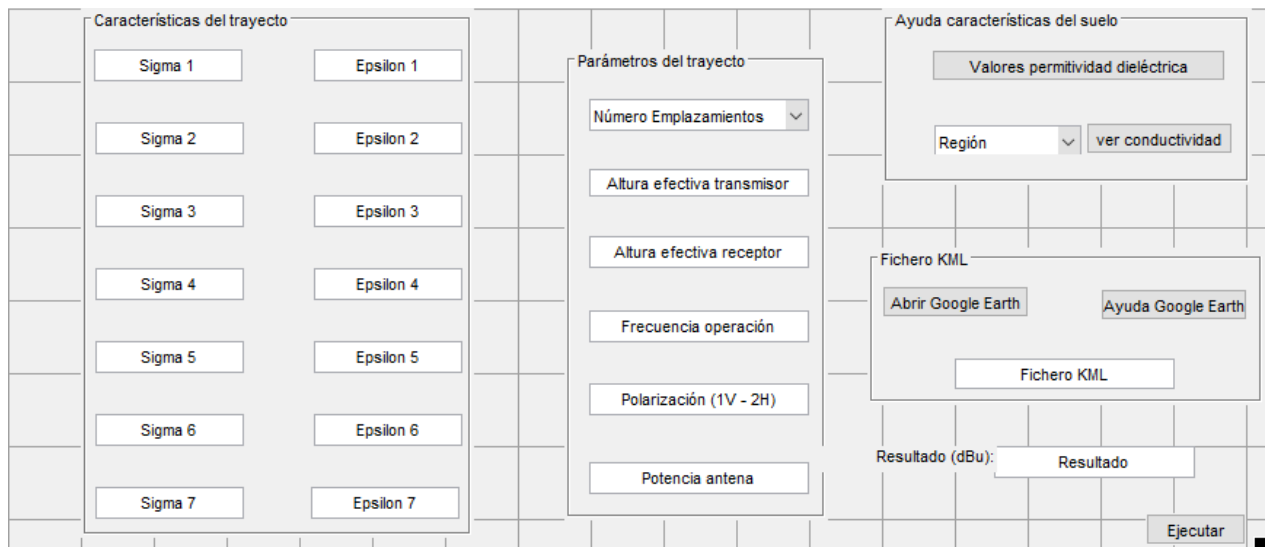


Figura 4.9.1 GUI de *principal\_uno.m*

De esta forma solo se crea gráficamente la interfaz pero es necesario que los diferentes cuadros de texto y botones realicen sus correspondientes funciones. Para ello, se debe modificar el fichero con extensión ".m", previamente generado.

En este fichero, aparece cada elemento de la interfaz en una función distinta con el nombre correspondiente al que aparece en la GUIDE, aunque veremos que este se puede cambiar para que la identificación de los diferentes elementos sea más sencilla.

A continuación veremos cómo asociar cada elemento a una función determinada.

### 4.9.1 Edit Text

Consiste en un cuadro de texto, en el que el usuario puede escribir. Se emplea para introducir los parámetros de entrada de una función. Lo más importante es que podemos extraer los valores introducidos en cada Edit Text así como escribir en él.

#### 4.9.2 Pop-up Menu

Consiste en una lista desplegable con diferentes opciones. En el archivo .fig se deben seleccionar los elementos que conformen esta lista.

En el archivo .m se crea una función correspondiente a dicha lista.

#### 4.9.3 Push Button

Consiste en un botón que cuando es pulsado se ejecuta el código correspondiente al mismo descrito en el archivo .m.

En el caso de nuestra GUIDE implementada, al pulsar sobre el botón "Ejecutar", se recopilan todos los datos introducidos en los Edit Text y se realiza la llamada a una función de MATLAB que calcula el campo eléctrico según las características introducidas.

#### 4.9.4 Axes

Con este elemento se puede ubicar una gráfica en la interfaz de usuario. En primer lugar se coloca el elemento correspondiente y se le da un nombre.

Este será el lugar en el que se mostrarán las diferentes representaciones gráficas que realicemos.

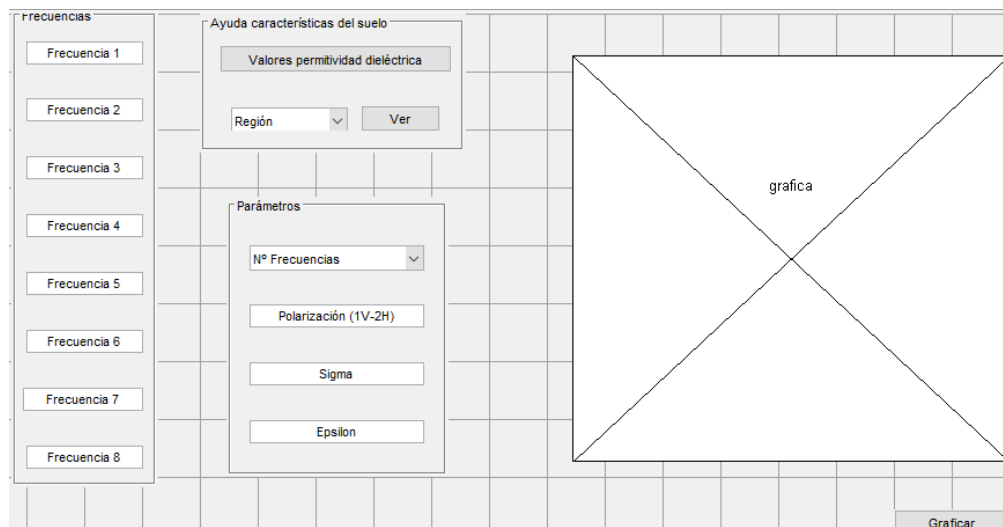


Figura 4.9.4.1 Elemento "Axes" de GUIDE

## 5 DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este apartado se van a ejecutar diversas pruebas para comprobar la validez de la aplicación desarrollada.

En el caso del cálculo de distancias sobre la superficie terrestre, se van a comparar los diferentes métodos existentes tomando como referencia los valores obtenidos mediante Google Earth. De este modo, determinaremos que función obtiene los resultados más próximos a los obtenidos con Google Earth para dicho cálculo y, de este modo, determinar estas distancias sin necesidad de que el usuario las conozca a priori.

Google Earth representa las coordenadas del siguiente modo: en el Norte (respecto al ecuador) y en el Este (respecto al meridiano de Greenwich) las coordenadas son positivas, mientras que en el Sur y en el Oeste, son negativas.

En primer lugar vamos a determinar qué modelo para el cálculo de distancias es el que más se ajusta a Google Earth. Se han comparado diferentes casos para los siguientes modelos: Haversine [33], ley esférica del coseno y Vincenty [33].

| <b>Coordenadas<br/>(origen)-<br/>(destino)</b> | <b>Haversine<br/>(km)</b> | <b>Ley esférica<br/>del coseno<br/>(km)</b> | <b>Vincenty<br/>(km)</b> | <b>Google Earth<br/>(km)</b> |
|------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| (49.42°, 2.42°)-<br>(49.78°, 1.83°)            | 57.64                     | 57.64                                       | 57.74                    | 57.74                        |
| (37.85°, -4.77°)-<br>(37.76°, -3.06°)          | 150.56                    | 150.56                                      | 150.92                   | 151.13                       |
| (30.15°, 72.3°)-<br>(28.32°, 75.19°)           | 346.45                    | 346.44                                      | 346.50                   | 346.23                       |
| (63.57°, 79.6°)-<br>(60.10°, 88.81°)           | 618.3393                  | 618.3393                                    | 620.2853                 | 620.81                       |
| (3.12°, -96.68°)-<br>(23.4°, -92.12°)          | 1173.22                   | 1173.22                                     | 1170.20                  | 1169.86                      |
| (40.42°, -3.71°)-<br>(50.68°, 9.12°)           | 1512.28                   | 1512.29                                     | 1513.72                  | 1513.73                      |
| (1.92°, -31.6°) -<br>(49.65°, -43°)            | 5416.83                   | 5416.83                                     | 5399.87                  | 5400.48                      |

*Tabla 1 Comparación de los métodos de distancias sobre la superficie terrestre*

A la vista de los resultados obtenidos, aunque los tres métodos dan resultados muy precisos y semejantes entre ellos, el método que mejor se ajusta, tanto a distancias

cortas como largas, es el de Vincenty. Se comprueba que se ajusta muy bien a los resultados obtenidos por nuestro software de referencia, Google Earth, por lo que, haremos uso de esta función para calcular las distancias entre los emplazamientos existentes.

Los modelos de Tierra plana y Tierra esférica obtienen resultados parecidos entre sí. Sin embargo, por encima de una distancia superior a (9) no se pueden utilizar los modelos de Tierra plana. Se va a utilizar el modelo de Norton (12) - (28) para Tierra plana y GRWAVE para Tierra esférica. Se va a comprobar el efecto que tiene esta distancia en la intensidad de campo eléctrico.

En la tabla 2 se muestra el nivel de campo, en dBu, para cada uno de estos modelos de propagación en función de la distancia y la frecuencia, así como la distancia máxima a utilizar para cada frecuencia seleccionada ( $d_{lim}$ ).

| Frecuencia (kHz)                     | Distancia (km) | Modelo de tierra plana | Modelo de tierra esférica |
|--------------------------------------|----------------|------------------------|---------------------------|
| 500<br>$d_{lim} = 113.14 \text{ km}$ | 50             | 69.8811                | 70.2700                   |
|                                      | 80             | 65.2633                | 66.4100                   |
|                                      | 100            | 62.9703                | 63.9300                   |
|                                      | 150            | 58.5684                | 51.0000                   |
| 200<br>$d_{lim} = 178.89 \text{ km}$ | 150            | 61.1280                | 61.0800                   |
|                                      | 170            | 60.1519                | 60.3900                   |
|                                      | 180            | 59.6555                | 58.7800                   |
|                                      | 200            | 58.7403                | 55.6200                   |
| 50<br>$d_{lim} = 357.77 \text{ km}$  | 340            | 54.1313                | 55.1800                   |
|                                      | 350            | 53.8796                | 52.8500                   |
|                                      | 360            | 53.6349                | 50.5300                   |
|                                      | 380            | 53.1653                | 48.9100                   |
| 30<br>$d_{lim} = 461.88 \text{ km}$  | 450            | 51.6967                | 51.3900                   |
|                                      | 460            | 51.5058                | 50.1300                   |
|                                      | 470            | 51.3190                | 48.8700                   |
|                                      | 500            | 50.7815                | 45.1100                   |
| 10<br>$d_{lim} = 800 \text{ km}$     | 780            | 46.9190                | 46.7900                   |
|                                      | 790            | 46.8084                | 47.1200                   |
|                                      | 810            | 46.5912                | 45.2900                   |
|                                      | 850            | 46.1725                | 42.6400                   |

Tabla 2 Comparación de los modelos de tierra plana y tierra esférica

Observamos que a medida que la frecuencia aumenta, la distancia límite para el modelo de tierra plana disminuye. Para distancias menores a la distancia límite, se obtienen valores muy próximos para ambos modelos. Sin embargo, cuando la distancia de operación es mayor que la distancia límite, se evidencia, como no podía ser de otro modo, una mayor diferencia entre el modelo de Tierra plana y el de Tierra esférica, como era de esperar. La diferencia entre ambos modelos se acentúa a medida que aumenta la distancia de trabajo, pues si la frecuencia aumenta, la distancia límite disminuye.

La tabla 3 muestra los valores de campo eléctrico, en dBu, en función del tipo de polarización y de las características del terreno. Estos valores se han obtenido con GRWAVE.

| <b>Características del terreno</b>                                          | <b>Distancia (km)</b> | <b>Polarización Vertical</b> | <b>Polarización Horizontal</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| $\varepsilon_r = 20$<br>$\sigma = 0.002\text{S/m}$<br>$f = 5 \text{ MHz}$   | 10                    | 56.0600                      | 1.1000                         |
|                                                                             | 50                    | 26.7700                      | -26.5700                       |
|                                                                             | 150                   | 1.2600                       | -52.5000                       |
|                                                                             | 350                   | -33.6100                     | -88.2700                       |
| $\varepsilon_r = 40$<br>$\sigma = 0.001\text{S/m}$<br>$f = 7 \text{ MHz}$   | 10                    | 58.3000                      | -7.5300                        |
|                                                                             | 50                    | 28.9400                      | -35.4700                       |
|                                                                             | 150                   | 2.4100                       | -62.6100                       |
|                                                                             | 350                   | -35.5000                     | -101.7800                      |
| $\varepsilon_r = 50$<br>$\sigma = 0.03\text{S/m}$<br>$f = 13 \text{ MHz}$   | 10                    | 57.3600                      | -17.4300                       |
|                                                                             | 50                    | 27.1200                      | -45.8400                       |
|                                                                             | 150                   | -2.1200                      | -75.7900                       |
|                                                                             | 350                   | -47.3700                     | -122.5400                      |
| $\varepsilon_r = 80$<br>$\sigma = 0.0003\text{S/m}$<br>$f = 18 \text{ MHz}$ | 10                    | 55.8900                      | -21.9400                       |
|                                                                             | 50                    | 25.6100                      | -50.9200                       |
|                                                                             | 150                   | -5.3000                      | -82.7100                       |
|                                                                             | 350                   | -55.0400                     | -134.2200                      |

*Tabla 3 Comparación del campo eléctrico incidente según el tipo de polarización de la antena emisora*

Como se esperaba, el nivel de campo eléctrico cuando la polarización es horizontal es mucho menor que cuando la polarización es vertical. Como ya se explicó con anterioridad, cuando la antena está polarizada horizontalmente, el campo eléctrico se atenúa muy bruscamente y la onda apenas puede propagarse.

La tabla 4 muestra el campo eléctrico, en dBu, calculado gráficamente a partir de las curvas presentes en la recomendación P.368 y mediante la función implementada en MATLAB, "grwave.m" [34], a una distancia determinada y en función de las características eléctricas del terreno y de la frecuencia.

| <b>Características del terreno</b>                                      | <b>Distancia (km)</b> | <b>Frecuencia (MHz)</b> | <b>Recomendación P.368</b> | <b>Función MATLAB</b> |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Agua con baja salinidad<br>$\epsilon_r = 80$<br>$\sigma = 1\text{S/m}$  | 50                    | 0.5                     | 75                         | 75.2800               |
|                                                                         |                       | 1                       | 75                         | 75.1000               |
|                                                                         |                       | 5                       | 72.5                       | 72.1100               |
|                                                                         |                       | 10                      | 64                         | 64.4100               |
|                                                                         |                       | 15                      | 55                         | 55.0500               |
|                                                                         |                       | 20                      | 48                         | 47.9000               |
|                                                                         |                       | 30                      | 39                         | 39.0000               |
| Agua con salinidad media<br>$\epsilon_r = 70$<br>$\sigma = 5\text{S/m}$ | 100                   | 0.5                     | 72                         | 72.2100               |
|                                                                         |                       | 1                       | 72                         | 72.0200               |
|                                                                         |                       | 5                       | 70                         | 70.6800               |
|                                                                         |                       | 10                      | 68                         | 68.1000               |
|                                                                         |                       | 15                      | 64                         | 64.3300               |
|                                                                         |                       | 20                      | 60                         | 59.5900               |
|                                                                         |                       | 30                      | 49                         | 49.3000               |
| Tierra<br>$\epsilon_r = 40$<br>$\sigma = 0.03\text{S/m}$                | 200                   | 0.5                     | 58                         | 58.0400               |
|                                                                         |                       | 1                       | 48                         | 48.0300               |
|                                                                         |                       | 3                       | 20                         | 19.5400               |
|                                                                         |                       | 5                       | 7                          | 7.3700                |
|                                                                         |                       | 7.5                     | -2                         | -2.1800               |
|                                                                         |                       | 10                      | -9                         | -8.9000               |
|                                                                         |                       | 15                      | -18                        | -18.3000              |
|                                                                         |                       | 0.3                     | 52                         | 51.5900               |
|                                                                         |                       | 0.5                     | 43                         | 42.3700               |
|                                                                         |                       | 0.75                    | 31                         | 30.9800               |

|                                                                                 |     |       |     |          |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-----|----------|
| Tierra húmeda<br>$\varepsilon_r = 30$<br>$\sigma = 0.01\text{S/m}$              | 300 | 1     | 23  | 22.9100  |
|                                                                                 |     | 3     | -6  | -5.2900  |
|                                                                                 |     | 5     | -20 | -18.1400 |
|                                                                                 |     | 7.5   | -29 | -28.3600 |
| Tierra moderadamente seca<br>$\varepsilon_r = 15$<br>$\sigma = 0.001\text{S/m}$ | 400 | 0.05  | 52  | 53.2700  |
|                                                                                 |     | 0.1   | 45  | 46.4600  |
|                                                                                 |     | 0.4   | 10  | 12.1500  |
|                                                                                 |     | 0.75  | -2  | -2.3500  |
|                                                                                 |     | 1     | -8  | -8.7100  |
|                                                                                 |     | 1.5   | -18 | -17.4700 |
|                                                                                 |     | 2     | -23 | -23.6400 |
| Tierra seca<br>$\varepsilon_r = 7$<br>$\sigma = 0.0003\text{S/m}$               | 500 | 0.03  | 50  | 50.1100  |
|                                                                                 |     | 0.075 | 35  | 35.2800  |
|                                                                                 |     | 0.15  | 15  | 16.3600  |
|                                                                                 |     | 0.3   | -1  | -0.4400  |
|                                                                                 |     | 0.5   | -12 | -12.2300 |
|                                                                                 |     | 0.75  | -22 | -21.2800 |
|                                                                                 |     | 1     | -28 | -27.6200 |

*Tabla 4 Comparación de la curvas de la ITU-R con la función "grwave.m"*

Los resultados obtenidos con la función implementada en MATLAB se ajustan muy bien a los valores de campo eléctrico obtenidos mediante las curvas de la recomendación P.368 de la ITU-R como no puede ser de otra manera, pues se están leyendo los valores que proporciona directamente GRWAVE, programa que fue usado para la representación gráfica de dichas curvas. La tabla 4 muestra que la llamada y la extracción de valores de GRWAVE se realiza correctamente.

Un parámetro que utiliza GRWAVE y que no es tenido en cuenta por el resto de modelos estudiados es la altura efectiva de las antenas transmisora y receptora. La tabla 5 muestra el nivel de campo eléctrico, en dBu, en función de las alturas efectivas de las antenas. Se adelanta que el efecto es muy poco significativo.

| Características                                                                                   | HTT<br>(m) | HRR<br>(m) | Nivel de campo<br>eléctrico (dBu) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|-----------------------------------|
| $\varepsilon_r = 7$<br>$\sigma = 0.0003\text{S/m}$<br>$f = 500\text{ kHz}$<br>$d = 100\text{ km}$ | 0          | 0          | 30.8000                           |
|                                                                                                   | 5          | 2          | 30.7200                           |
|                                                                                                   | 10         | 7          | 30.6200                           |
|                                                                                                   | 15         | 12         | 30.5100                           |
| $\varepsilon_r = 30$<br>$\sigma = 0.01\text{S/m}$<br>$f = 1\text{ MHz}$<br>$d = 150\text{ km}$    | 0          | 0          | 41.3500                           |
|                                                                                                   | 5          | 3          | 41.2800                           |
|                                                                                                   | 10         | 7          | 41.2000                           |
|                                                                                                   | 15         | 10         | 41.1300                           |
| $\varepsilon_r = 40$<br>$\sigma = 0.03\text{S/m}$<br>$f = 5\text{ MHz}$<br>$d = 200\text{ km}$    | 0          | 0          | 7.3700                            |
|                                                                                                   | 5          | 5          | 6.9000                            |
|                                                                                                   | 10         | 10         | 6.4400                            |
|                                                                                                   | 15         | 15         | 6.0200                            |
| $\varepsilon_r = 22$<br>$\sigma = 0.003\text{S/m}$<br>$f = 10\text{ MHz}$<br>$d = 250\text{ km}$  | 0          | 0          | -29.2300                          |
|                                                                                                   | 5          | 4          | -29.2900                          |
|                                                                                                   | 10         | 9          | -28.6100                          |
|                                                                                                   | 15         | 14         | -27.3100                          |
| $\varepsilon_r = 15$<br>$\sigma = 0.003\text{S/m}$<br>$f = 20\text{ MHz}$<br>$d = 300\text{ km}$  | 0          | 0          | -61.2100                          |
|                                                                                                   | 5          | 2          | -60.4400                          |
|                                                                                                   | 10         | 6          | -57.3200                          |
|                                                                                                   | 15         | 12         | -52.5100                          |

*Tabla 5 Comparación de los valores de campo eléctrico para distintas alturas efectivas de las antenas transmisora y receptora*

Como se puede observar a la vista de los resultados reflejados en la tabla 5, las alturas efectivas de las antenas en transmisión y en recepción apenas influyen en el cálculo del nivel de campo eléctrico de la onda de superficie. Las variaciones son mayores a medida que aumenta la frecuencia.

Como se ha venido comentando, se ha implementado una función que permite representar gráficamente las curvas presentes en la recomendación P.368. Se recuerda que son las curvas que dan el nivel de campo a una frecuencia determinada en términos de la distancia. De este modo, no es necesario que el usuario disponga previamente de dichas curvas. Puede además fijar la frecuencia de trabajo a su conciencia, no limitándose a utilizar los valores proporcionados por la ITU, que son valores discretos de frecuencia, tal y como se indica en la figura 5.2

Se va a representar, a una frecuencia de trabajo de 5 MHz, la curva correspondiente a un terreno de tierra muy seca, cuyas características eléctricas son las siguientes:  $\sigma=0.0004$  S/m y  $\epsilon_r=3$ . Se presenta la curva que proporciona el programa y la curva que se proporciona en la recomendación P.368 de la ITU-R.

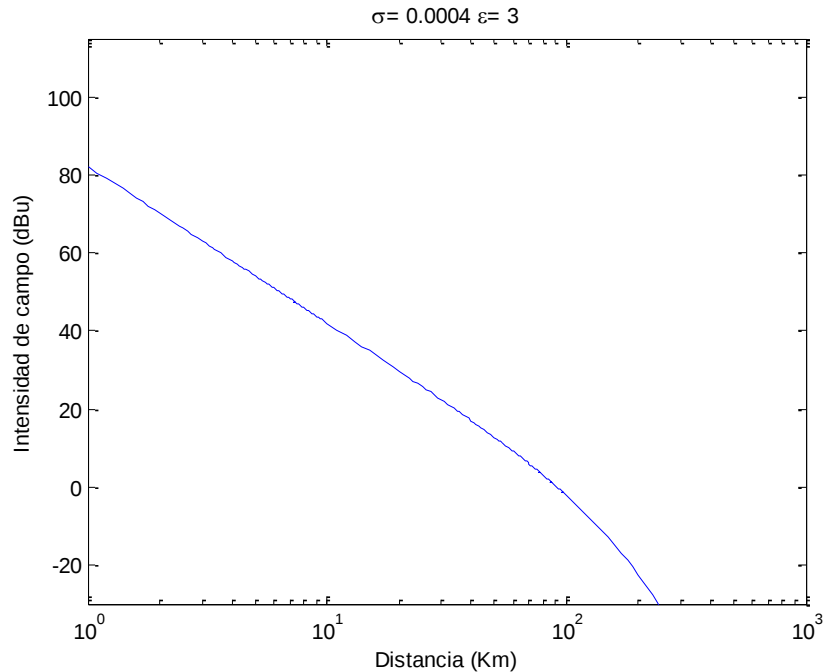


Figura 5.1 Curva obtenida con la función implementada para tierra muy seca para una frecuencia de 5 MHz

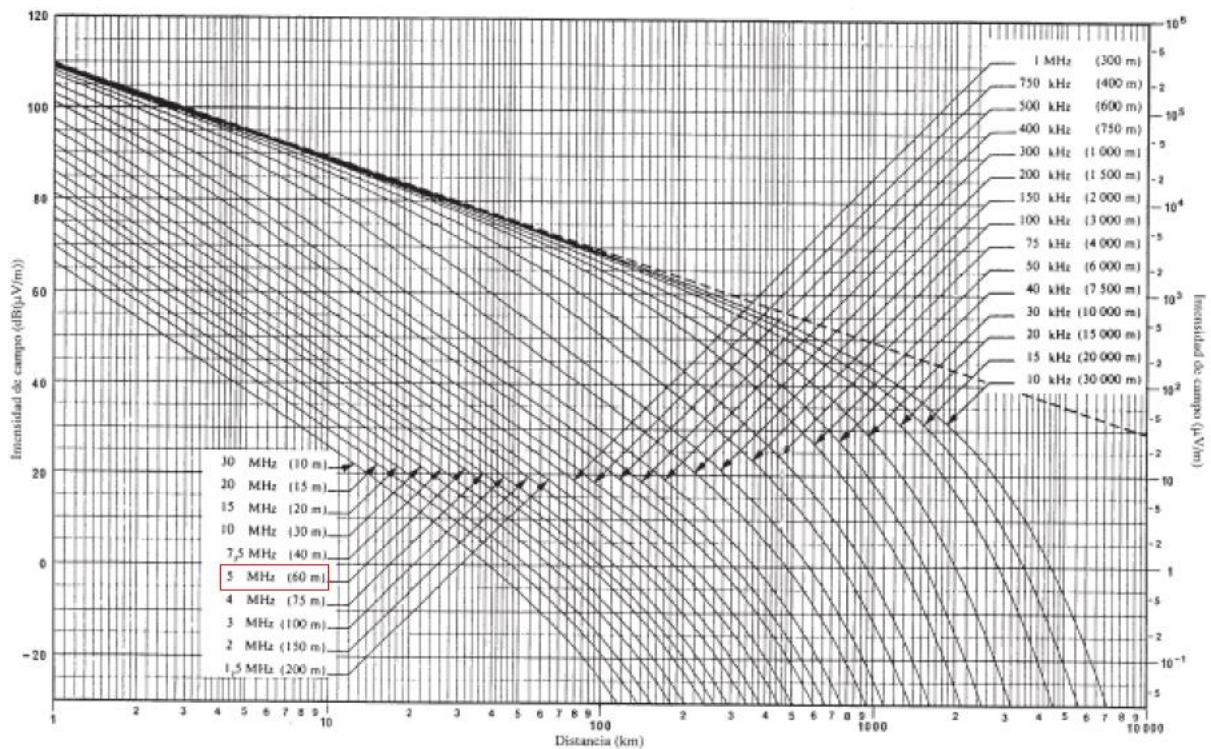


Figura 5.2 Curva de la recomendación P.368 para tierra muy seca

La siguiente curva a representar, a una frecuencia de trabajo de 7.5 MHz, corresponde a un terreno de hielo de agua dulce, cuyas características eléctricas son las siguientes:  $\sigma=0.00003$  S/m y  $\epsilon_r=3$ .

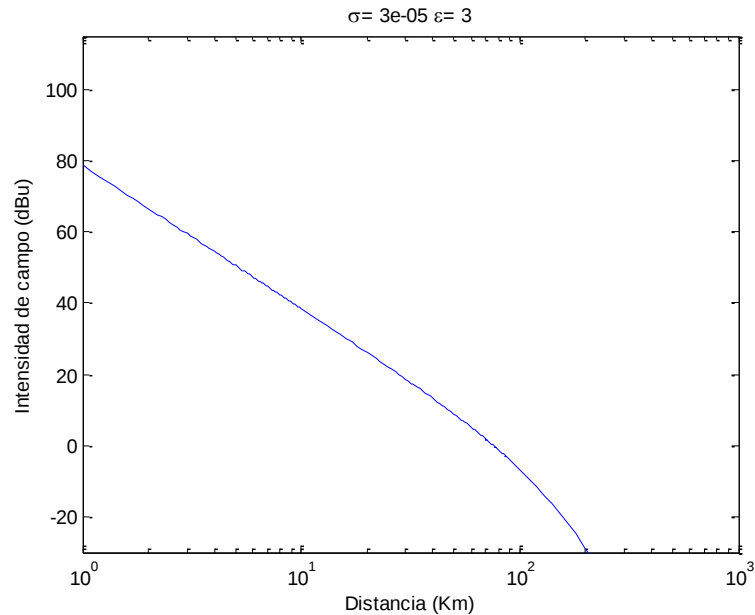


Figura 5.3 Curva obtenida con la función implementada para hielo de agua dulce para una frecuencia de 7.5 MHz

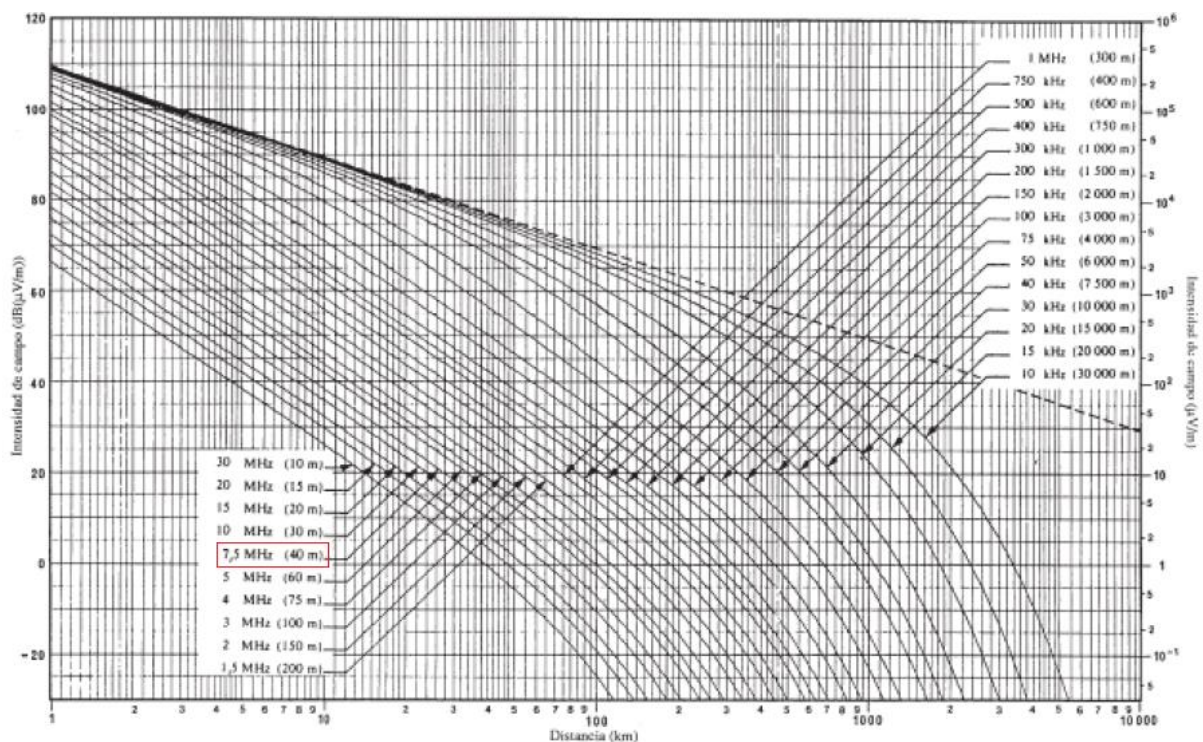


Figura 5.4 Curva de la recomendación P.368 para hielo de agua dulce

La siguiente curva a representar, a una frecuencia de trabajo de 15 MHz, corresponde a un terreno de agua de mar con salinidad media, cuyas características eléctricas son las siguientes:  $\sigma=5$  S/m y  $\epsilon_r=70$ .

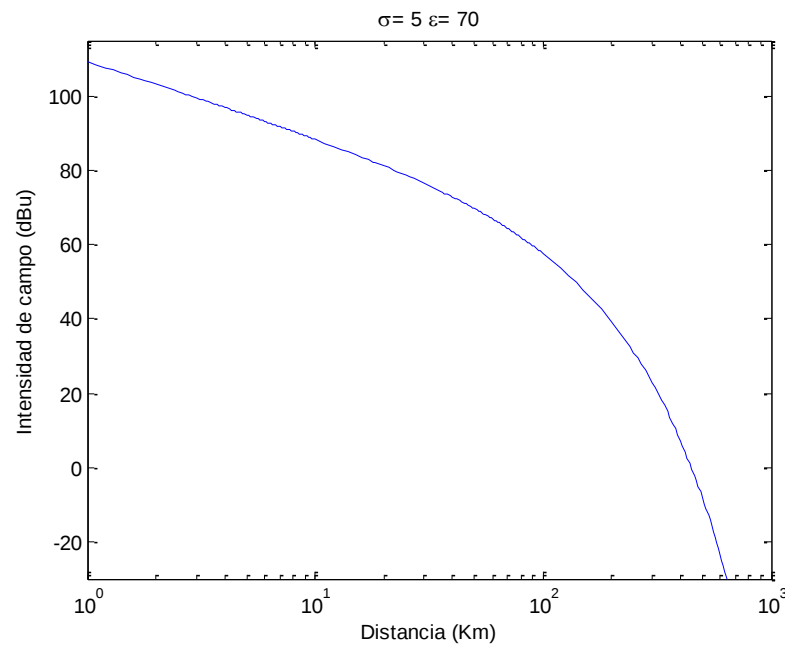


Figura 5.5 Curva obtenida con la función implementada para agua de mar con salinidad media para una frecuencia de 15 MHz

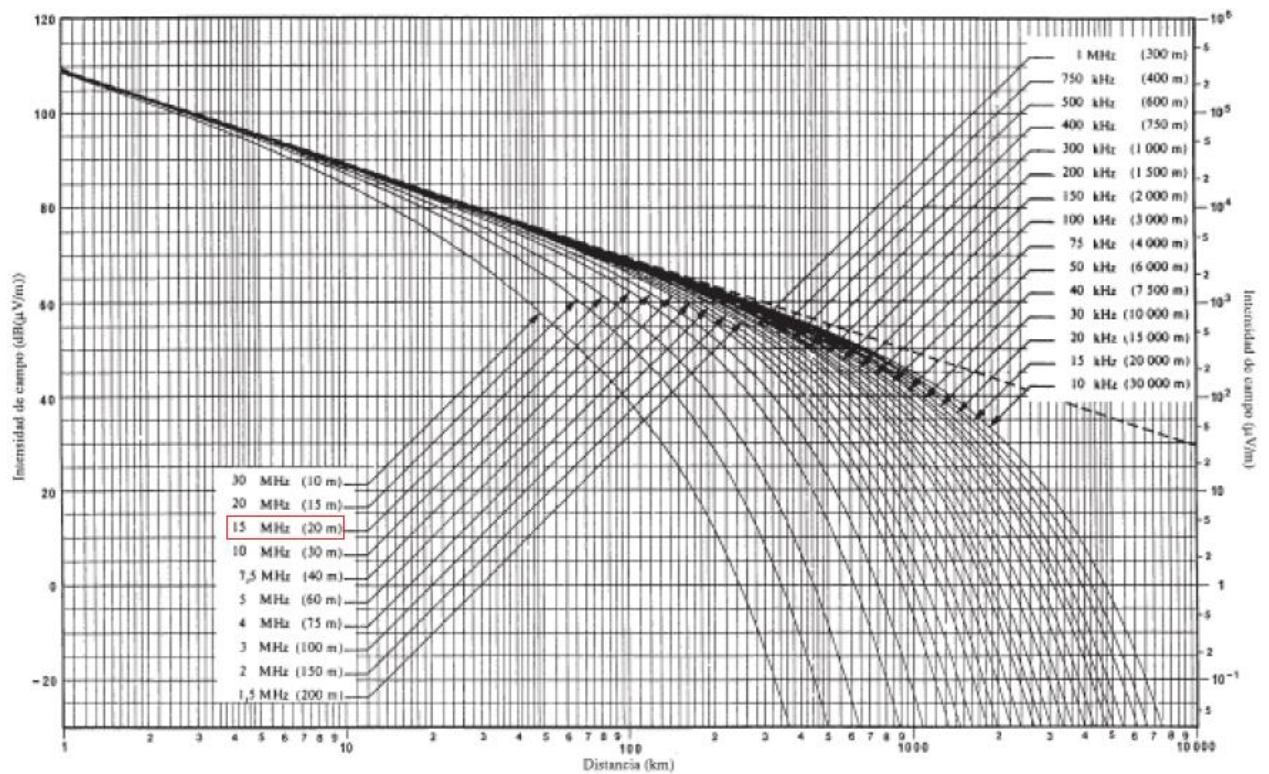


Figura 5.6 Curva de la recomendación P.368 para agua de mar con salinidad media

Por último, vamos a representar varias frecuencias, para un mismo terreno, simultáneamente. En nuestro caso, tenemos un terreno de tierra húmeda, cuyas características eléctricas son las siguientes:  $\sigma=0.01$  S/m y  $\epsilon_r=30$ , a unas frecuencias de trabajo de 1 MHz, 1.5 MHz y 3 MHz.

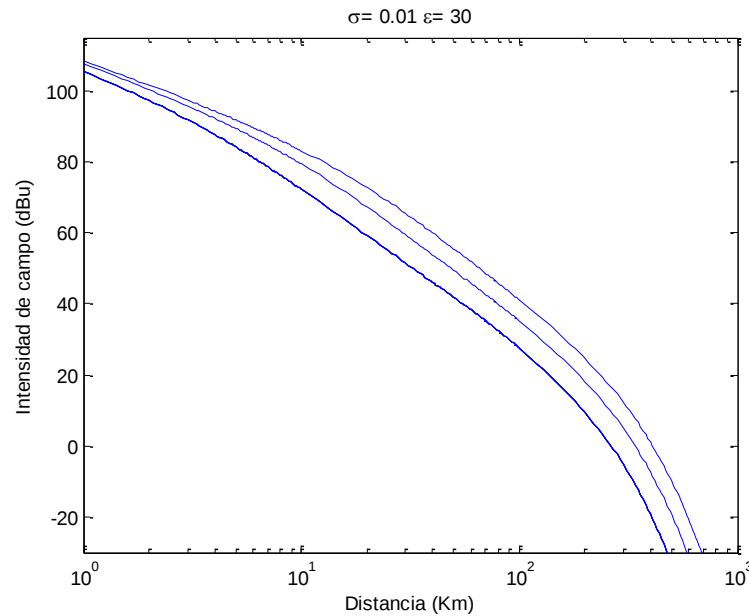


Figura 5.7 Curva obtenida con la función implementada para tierra húmeda para frecuencias de 1MHz, 1.5MHz y 3MHz

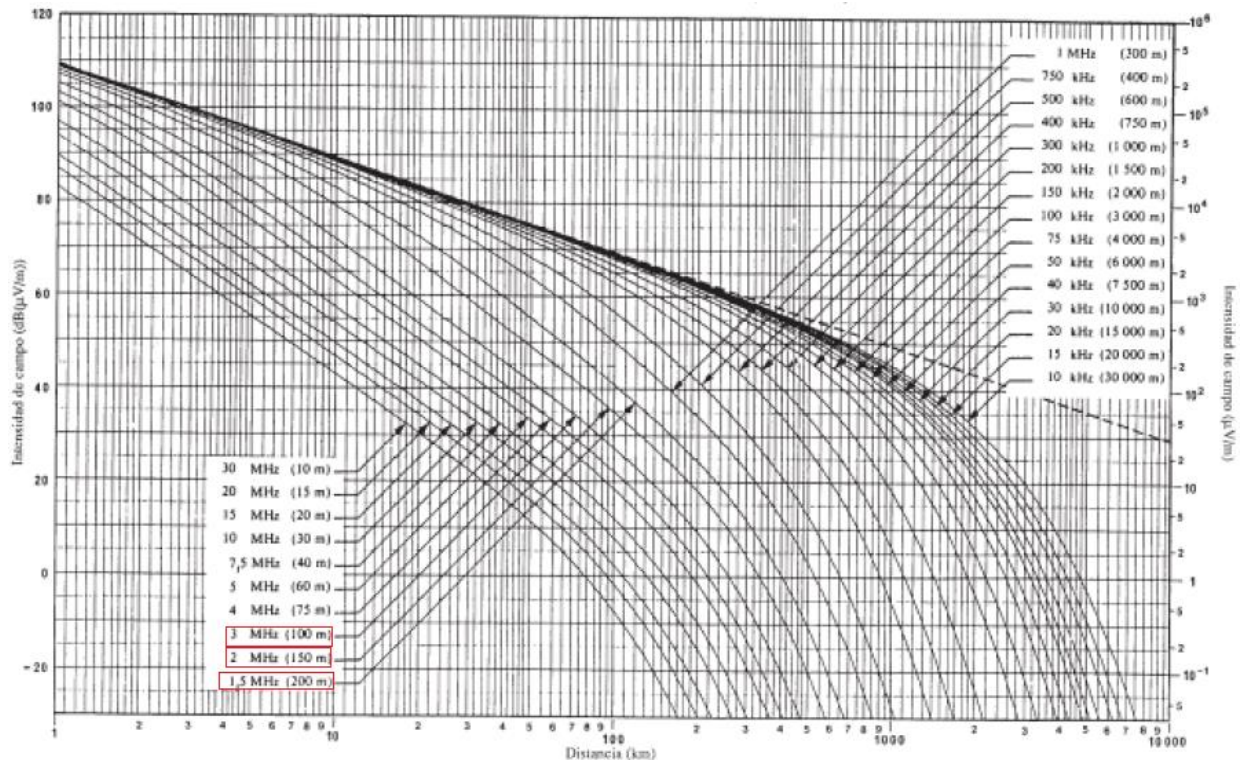


Figura 5.8 Curva de la recomendación P.368 para tierra húmeda

A continuación se va a comparar el campo que proporciona GRWAVE con el campo que proporcionan otros métodos basados en Tierra plana. Los resultados se presentan en las tablas 6-7.

| Tipo de terreno                                             | Frecuencia (kHz) | Distancia límite (km) | Distancia numérica | Distancia (km) | Norton  | Tierra plana | GRWAVE  |
|-------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|----------------|---------|--------------|---------|
| Agua dulce<br>$\epsilon_r=80$<br>$\sigma=0.003\text{S/m}$   | 20               | 565.7                 | 0.0039             | 50             | 70.7670 | 72.7815      | 75.4100 |
|                                                             |                  |                       | 0.0116             | 150            | 61.1956 | 58.0103      | 65.6300 |
|                                                             |                  |                       | 0.0194             | 250            | 56.7297 | 55.7917      | 60.7900 |
|                                                             | 50               | 357.77                | 0.0242             | 50             | 70.6912 | 72.7813      | 75.2400 |
|                                                             |                  |                       | 0.0726             | 150            | 60.9685 | 58.0097      | 65.1400 |
|                                                             |                  |                       | 0.1210             | 250            | 56.3516 | 55.7909      | 59.9500 |
|                                                             | 100              | 352.98                | 0.0960             | 50             | 70.7779 | 72.7815      | 73.8500 |
|                                                             |                  |                       | 0.2879             | 150            | 61.2282 | 58.0103      | 65.7600 |
|                                                             |                  |                       | 0.4799             | 250            | 56.7840 | 55.7918      | 61.0400 |
| Tierra húmeda<br>$\epsilon_r=30$<br>$\sigma=0.01\text{S/m}$ | 200              | 178.89                | 0.1164             | 50             | 70.3480 | 72.7810      | 74.8300 |
|                                                             |                  |                       | 0.2328             | 100            | 63.8962 | 59.7702      | 68.1200 |
|                                                             |                  |                       | 0.3026             | 130            | 61.3597 | 58.6305      | 65.3600 |
|                                                             | 400              | 126.49                | 0.4647             | 50             | 69.0645 | 70.7782      | 73.2600 |
|                                                             |                  |                       | 0.9295             | 100            | 61.3644 | 58.7649      | 65.1700 |
|                                                             |                  |                       | 1.2083             | 130            | 58.0958 | 56.6237      | 61.6300 |
|                                                             | 600              | 103.28                | 1.0426             | 50             | 66.1578 | 68.7717      | 70.8100 |
|                                                             |                  |                       | 2.0852             | 100            | 55.9755 | 54.7530      | 60.7900 |
|                                                             |                  |                       | 2.7108             | 130            | 51.6236 | 48.6090      | 56.2200 |

*Tabla 6 Comparación de los modelos de propagación por onda de superficie (parte 1)*

| Tipo de terreno                                                         | Frecuencia (kHz) | Distancia límite (km) | Distancia numérica | Distancia (km) | Norton  | Tierra plana | GRWAVE  |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|----------------|---------|--------------|---------|
| Agua del mar, salinidad baja<br>$\epsilon_r=80$<br>$\sigma=1\text{S/m}$ | 150              | 206.56                | 0.0007             | 50             | 70.7791 | 72.7815      | 75.3500 |
|                                                                         |                  |                       | 0.0010             | 75             | 67.2560 | 69.0206      | 71.7700 |
|                                                                         |                  |                       | 0.0012             | 90             | 65.6717 | 68.2288      | 70.1000 |
|                                                                         | 500              | 113.14                | 0.0073             | 50             | 70.7543 | 72.6956      | 75.2800 |
|                                                                         |                  |                       | 0.0109             | 75             | 67.2189 | 69.0015      | 71.5300 |
|                                                                         |                  |                       | 0.0131             | 90             | 65.6272 | 68.1267      | 69.7900 |
|                                                                         | 750              | 92.37                 | 0.0164             | 50             | 70.7204 | 71.9233      | 75.1900 |
|                                                                         |                  |                       | 0.0246             | 75             | 67.1680 | 68.8425      | 71.3800 |
|                                                                         |                  |                       | 0.0295             | 90             | 65.5660 | 67.5483      | 69.6000 |
| Hielo de agua dulce<br>$\epsilon_r=3$<br>$\sigma=0.00003\text{S/m}$     | 10               | 800                   | 0.0968             | 50             | 70.4207 | 72.7808      | 73.2400 |
|                                                                         |                  |                       | 0.3873             | 200            | 57.3069 | 66.7580      | 61.4200 |
|                                                                         |                  |                       | 0.5809             | 300            | 53.0781 | 58.9957      | 56.8900 |
|                                                                         | 40               | 400                   | 1.4958             | 50             | 63.0130 | 61.7477      | 68.1000 |
|                                                                         |                  |                       | 5.9832             | 200            | 39.5046 | 46.6593      | 43.8800 |
|                                                                         |                  |                       | 8.9748             | 300            | 31.8629 | 39.8679      | 35.2500 |
|                                                                         | 60               | 326.6                 | 3.2207             | 50             | 56.3223 | 54.6916      | 61.8800 |
|                                                                         |                  |                       | 12.8828            | 200            | 31.8018 | 36.5349      | 35.3100 |
|                                                                         |                  |                       | 19.3243            | 300            | 24.3477 | 28.7218      | 26.7600 |

*Tabla 7 Comparación de los modelos de propagación por onda de superficie (parte 2)*

A la vista de los resultados obtenidos, observamos que los resultados obtenidos por los métodos anteriores se asemejan en gran medida siempre y cuando se encuentren dentro del límite (9). Este criterio se ha tenido en cuenta a la hora de elaborar las tablas anteriores, por lo que, aunque los modelos de Norton y el de propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana consideran Tierra plana, a diferencia de GRWAVE, que considera Tierra esférica, los resultados se parecen debido a que la distancia límite para el modelo de Tierra plana no se ha superado en los casos expuestos. En la tabla 9 se

muestra el valor del campo eléctrico para cada método cuando la distancia de operación es mayor que la distancia límite (9).

| Tipo de terreno                                                            | Frecuencia (kHz)                     | Distancia (km) | Norton  | Tierra plana | GRWAVE  |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------|---------|--------------|---------|
| Agua del mar,<br>salinidad baja<br>$\epsilon_r=80$<br>$\sigma=1\text{S/m}$ | 150<br>$d_{lim} = 206.56 \text{ km}$ | 220            | 75.9017 | 76.3470      | 61.2700 |
|                                                                            |                                      | 250            | 73.7899 | 74.7918      | 59.8500 |
|                                                                            |                                      | 300            | 70.2038 | 71.0000      | 57.7200 |
|                                                                            | 500<br>$d_{lim} = 113.14 \text{ km}$ | 130            | 72.4114 | 73.6317      | 66.1100 |
|                                                                            |                                      | 200            | 71.6317 | 72.7609      | 61.3500 |
|                                                                            |                                      | 250            | 68.6663 | 67.7918      | 58.5600 |

*Tabla 8 Comparación de los distintos modelos de propagación por onda de superficie para distancias que superan el límite*

El modelo de propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana expuesto por Rohan [16] introduce un término multiplicativo dependiente de la distancia. Para distancias cortas, este factor es  $1/d$ , para distancias intermedias,  $1/d^2$ , y para distancias largas, el factor es  $1/d^3$ . Teniendo en cuenta la distancia del receptor, se multiplica por el factor que corresponda según el caso en el que nos encontremos, realizando una corrección.

Por tanto, los métodos de Norton y el de propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana son válidos, en referencia al grado de aproximación respecto a los resultados calculados por GRWAVE, para distancias inferiores a la distancia límite (9). A medida que la frecuencia y la distancia aumentan, la distancia límite es superada y, por tanto, la atenuación producida por la curvatura de la Tierra comienza a ser considerable por lo que, como ambos métodos no tienen esto en cuenta, los resultados difieren respecto a GRWAVE.

Por último, vamos a estudiar diferentes casos de propagación cuando ésta se realiza a través de terreno no homogéneo. En las tablas 9 y 10 se muestra el valor del campo eléctrico, en dBu, para un trayecto no homogéneo, con diferente número de discontinuidades, en función de cada uno de los modelos estudiados: Norton, propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana y GRWAVE. Se indica la distancia numérica,  $p$ , ec. (3).

| Caso | Terreno                        | Longitud<br>(km)<br>(Distancia<br>numérica) | Características<br>eléctricas                | Frecuencia<br>(kHz) | Distancia<br>límite | Norton  | Tierra<br>plana | GRWAVE  |
|------|--------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------|-----------------|---------|
| 1    | Tierra seca                    | 10<br>( $p=0.0049$ )                        | $\epsilon_r=7$<br>$\sigma=0.0003\text{S/m}$  | 5e3                 | 35.77               | 49.7956 | 47.2154         | 41.1000 |
|      | Agua dulce                     | 15<br>( $p=0.00073$ )                       | $\epsilon_r=80$<br>$\sigma=0.003\text{S/m}$  |                     |                     |         |                 |         |
| 2    | Agua con<br>salinidad<br>media | 50<br>( $p=0.0036$ )                        | $\epsilon_r=70$<br>$\sigma=5\text{S/m}$      | 250                 | 160                 | 61.4834 | 51.2605         | 53.9600 |
|      | Tierra<br>húmeda               | 100<br>( $p=0.3636$ )                       | $\epsilon_r=30$<br>$\sigma=0.01\text{S/m}$   |                     |                     |         |                 |         |
| 3    | Tierra                         | 150<br>( $p=0.0026$ )                       | $\epsilon_r=40$<br>$\sigma=0.03\text{S/m}$   | 30                  | 461.88              | 58.0788 | 47.3821         | 51.3250 |
|      | Agua dulce                     | 75<br>( $p=0.0131$ )                        | $\epsilon_r=80$<br>$\sigma=0.003\text{S/m}$  |                     |                     |         |                 |         |
|      | Tierra muy<br>seca             | 200<br>( $p=1.0461$ )                       | $\epsilon_r=3$<br>$\sigma=0.0001\text{S/m}$  |                     |                     |         |                 |         |
| 4    | Tierra                         | 40<br>( $p=0.0019$ )                        | $\epsilon_r=40$<br>$\sigma=0.03\text{S/m}$   | 50                  | 357.77              | 53.9657 | 52.3856         | 52.1750 |
|      | Hielo de<br>agua dulce         | 100<br>( $p=4.5811$ )                       | $\epsilon_r=3$<br>$\sigma=0.00003\text{S/m}$ |                     |                     |         |                 |         |
|      | Tierra<br>húmeda               | 75<br>( $p=0.0109$ )                        | $\epsilon_r=30$<br>$\sigma=0.01\text{S/m}$   |                     |                     |         |                 |         |

Tabla 9 Comparación del método de Millington para los distintos modelos (parte 1)

| Caso | Terreno                         | Longitud<br>(km)<br>Distancia<br>numérica | Características<br>eléctricas               | Frecuencia<br>(kHz) | Distancia<br>límite | Norton  | Tierra<br>plana | GRWAVE  |
|------|---------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------|-----------------|---------|
| 5    | Tierra                          | 20<br>( $p=0.0039$ )                      | $\epsilon_r=40$<br>$\sigma=0.03\text{S/m}$  | 100                 | 252.98              | 52.5017 | 54.7650         | 57.9200 |
|      | Agua con<br>salinidad baja      | 80<br>( $p=0.0047$ )                      | $\epsilon_r=80$<br>$\sigma=1\text{S/m}$     |                     |                     |         |                 |         |
|      | Tierra húmeda                   | 70<br>( $p=0.0408$ )                      | $\epsilon_r=30$<br>$\sigma=0.01\text{S/m}$  |                     |                     |         |                 |         |
|      | Tierra seca                     | 50<br>( $p=0.9603$ )                      | $\epsilon_r=7$<br>$\sigma=0.0003\text{S/m}$ |                     |                     |         |                 |         |
| 6    | Tierra<br>moderadamente<br>seca | 50<br>( $p=0.0243$ )                      | $\epsilon_r=15$<br>$\sigma=0.003\text{S/m}$ | 50                  | 357.77              | 54.6322 | 50.3932         | 53.4400 |
|      | Agua con<br>salinidad media     | 100<br>( $p=0.00029$ )                    | $\epsilon_r=70$<br>$\sigma=5\text{S/m}$     |                     |                     |         |                 |         |
|      | Tierra muy seca                 | 30<br>( $p=0.4344$ )                      | $\epsilon_r=3$<br>$\sigma=0.0001\text{S/m}$ |                     |                     |         |                 |         |
|      | Tierra seca                     | 150<br>( $p=0.726$ )                      | $\epsilon_r=7$<br>$\sigma=0.0003\text{S/m}$ |                     |                     |         |                 |         |

*Tabla 10 Comparación del método de Millington para los distintos modelos (parte 2)*

Comparando los resultados obtenidos en las tablas 10 y 11, observamos que los modelos de Norton y Rohan aplicados a trayectos no homogéneos se aproximan a los resultados obtenidos con GRWAVE siempre y cuando la distancia de trabajo no sea superior a la distancia límite definida en la ec. (9). Esto se puede observar en trayectos largos, donde los resultados difieren con GRWAVE. Sin embargo, en trayectos cortos, los resultados se aproximan bastante.

Este efecto también está relacionado con la frecuencia, de modo que a medida que ésta aumenta, la distancia a la que empieza a ser considerable el efecto de Tierra esférica se reduce.

En resumen, los modelos de Norton y el de propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana asumen un modelo de Tierra plana, por lo que no consideran la atenuación producida por el efecto de la curvatura de la Tierra. Sin embargo GRWAVE si considera este efecto. Por tanto, el rango de validez de estos modelos viene determinado por la distancia límite, es decir, la distancia a partir de la cual la curvatura de la Tierra no es despreciable e introduce una atenuación considerable en la intensidad de campo eléctrico, lo que reduce su aplicabilidad a trayectos no muy largos. Por este hecho, para distancias superiores a la distancia límite, se ha de usar GRWAVE en lugar de los modelos de Norton y el propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana. Esto no es nada nuevo, pues la ITU recomienda al ingeniero utilizar GRWAVE siempre que se haga un estudio de propagación por onda de superficie.

## 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo se ha puesto en valor una herramienta software de la ITU-R que no funcionaría en los equipos informáticos actuales ya que, el software GRWAVE, se hizo pensando en su uso para sistemas informáticos antiguos que funcionaban a 16 bits y utilizaban MSDOS para ejecutarlo. Por tanto, ha sido necesaria una adaptación para que los ordenadores actuales puedan hacer uso de esta útil herramienta para el ingeniero.

Este mecanismo de propagación no tiene una única implementación, por lo que hemos realizado un estudio de los diferentes modelos de propagación por onda de superficie, entre los que destacamos Norton y el de propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana. Cada uno de estos modelos considera diferentes aproximaciones.

Se ha comprobado la validez de los resultados obtenidos mediante los métodos nombrados anteriormente, en comparación con los proporcionados por GRWAVE. Para bajas frecuencias y distancias cortas, los resultados se asemejan entre sí en gran medida debido a que estos modelos asumen la propagación en condiciones de Tierra plana, es decir, no tiene en cuenta la atenuación provocada por la curvatura de la Tierra. Sin embargo, cuando la distancia aumenta, la curvatura de la Tierra introduce una atenuación no despreciable. Este mismo efecto ocurre cuando la frecuencia aumenta, ya que la distancia a la cual el efecto de la curvatura de la Tierra es considerable se reduce. Es decir, los modelos de Norton y el de propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana son válidos cuando la frecuencia de operación es tal que la distancia está por debajo del modelo de Tierra plana, lo cual no es la situación general, pues la ventaja de la propagación por onda de superficie se basa en cubrir grandes trayectos.

La validez de esta condición de distancia ha sido comprobada mediante diferentes pruebas y se ha concluido que, para distancias por debajo de la distancia límite, ambos modelos, tierra plana y esférica, obtienen resultados que se asemejan bastante entre sí. Sin embargo, por encima de este valor de distancia límite, los resultados difieren en mayor medida, debido a que ahora el efecto de la curvatura de la Tierra tiene una influencia considerable en la propagación de la onda, atenuando el campo eléctrico.

Aunque en el modelo de propagación por onda de superficie, es conveniente tener los elementos radiantes muy próximos al suelo, el software GRWAVE, a diferencia del resto de modelos estudiados, tiene en cuenta las alturas efectivas de las antenas transmisora y receptora. Sin embargo, a la vista de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, se ha llegado a la conclusión de que las alturas efectivas no tienen apenas influencia en la propagación, es decir, el campo eléctrico, debido a propagación por onda de superficie es prácticamente independiente de las alturas de las antenas.

El hecho de que la antena emisora esté polarizada correctamente es muy importante en la propagación. Hemos comprobado que el nivel de campo eléctrico cuando la antena está polarizada horizontalmente es prácticamente insignificante, por lo que, este tipo de polarización no es conveniente para comunicaciones. Por el contrario, si la antena transmisora está polarizada verticalmente, el nivel de campo eléctrico es adecuado. Por tanto, para la propagación por onda de superficie es conveniente que las antenas posean una polarización vertical.

En lo que respecta al cálculo de distancias sobre superficie esférica, se ha realizado una comparación entre las diferentes implementaciones existentes para determinar cuál es la que más se aproxima al valor dado por Google Earth, programa que ha sido usado como referencia. Estos métodos son la ley esférica del coseno, ley de Haversine y ley de Vincenty. De estos métodos, el de Vincenty es el que presenta resultados más próximos a Google Earth, por lo que se hará uso de dicho método para el cálculo de distancias sobre la superficie terrestre.

Para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico en trayectos inhomogéneos, hemos hecho uso del método de Millington, ya que es un método estandarizado, incluido en la recomendación P.368 de la ITU-R.

Un aspecto muy importante es que la toolbox desarrollada ha sido integrada en Google Earth, por lo que pueden ser estudiados casos reales, es decir, radioenlaces con origen y fin definidos por sus coordenadas geográficas.

Haciendo uso de todo lo explicado anteriormente, se ha alcanzado el objetivo que se fijó en un primer momento: desarrollar un software que permita el cálculo del nivel de campo recibido en cierto emplazamiento a partir del conocimiento de la posición geográfica del transmisor y considerando las propiedades eléctricas del terreno.

Con los materiales y métodos expuestos en el apartado 4 se ha conseguido el desarrollo de dicho software. Las funciones que utilizan este programa principal, se explicarán en el manual del programador, en el apartado 7.2.

Por último, una mejora de gran importancia sería incorporar la conexión con bases de datos georreferenciadas para obtener las características eléctricas del terreno. De esta forma, no habría que buscar dichos valores en tablas que, además, son aproximados según el tipo de terreno. Otro inconveniente es que los valores de la

permitividad dieléctrica varían con la estación del año. Por tanto, si tenemos disponible una base de datos con todos estos valores es más sencillo disponer de ellos.

Sería interesante poder adaptar esta toolbox a otro lenguaje de programación, como por ejemplo, C, C++, Java o Python entre otros.

## 7 ANEXOS

En esta sección se definen dos manuales para ayudar a comprender mejor el funcionamiento de la toolbox desarrollada.

Un manual de usuario en el que se explica cómo hacer que la toolbox funcione correctamente.

Otro manual de programador en el que se explica el funcionamiento de cada una de las funciones incluidas en la toolbox, la forma de invocarlas, así como el diagrama de flujo del programa, es decir, las funciones de las cuales el programa principal hace uso.

### 7.1 Manual de usuario

La función de este manual es que el usuario aprenda a manejar cada uno de los programas. Se indicará que pasos hay que seguir para conseguir que el programa funcione adecuadamente. Al final se expondrá un ejemplo para su mejor comprensión.

Existen tres programas principales con los que usuario interactúa: uno que genera las curvas de la recomendación P.368 de la ITU-R, otro que permite hacer un estudio de propagación por onda de superficie mediante un fichero kml, que también se explicara cómo crearlo y, por último, otro programa que permite hacer un estudio de propagación por onda de superficie pero, en este caso, indicando las coordenadas de cada uno de los emplazamientos.

A cada uno de estos programas se accede pulsando los diferentes botones de la interfaz principal, figura 7.1.1, que es la que se presenta al usuario. Al lado de cada botón existe otro que si se pulsa muestra un mensaje con información relativa a lo que realiza cada programa.



Figura 7.1.1 interfaz\_principal.fig

### 7.1.1 Obtener curvas de la recomendación P.368 de la ITU-R

Al usuario se le presenta la siguiente interfaz donde debe introducir los datos:

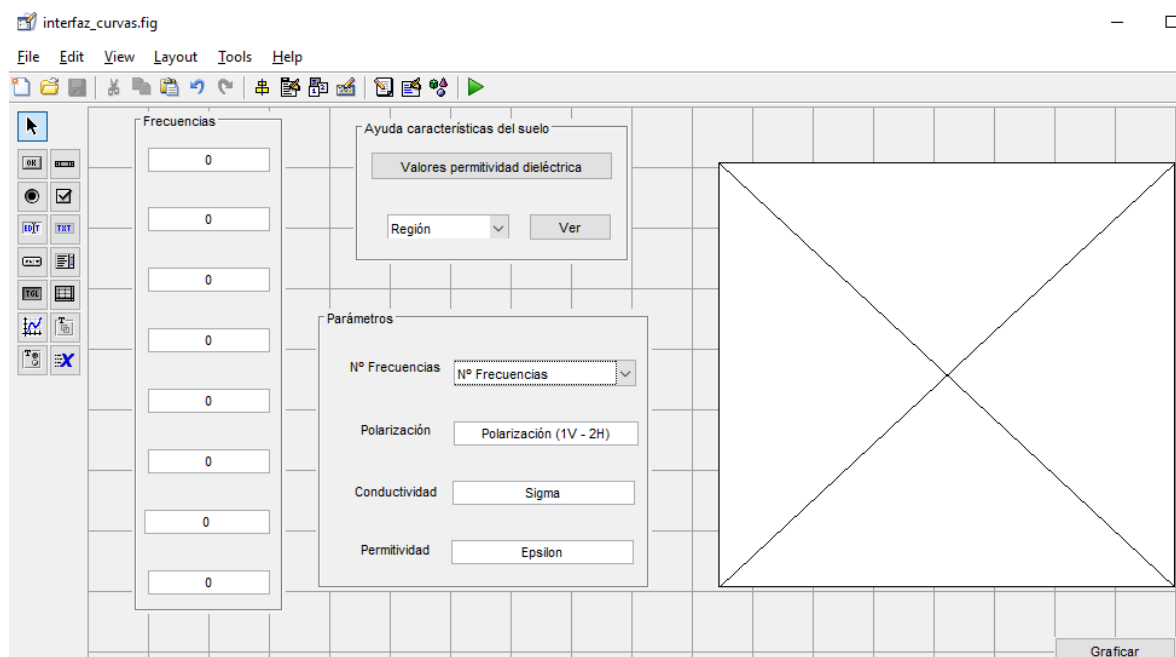


Figura 7.1.1.1 interfaz\_curvas.fig

En primer lugar, se ha creado una tabla con las características eléctricas de cada tipo de terreno. Ésta se abre si se pulsa sobre "Valores permitividad dieléctrica". Para obtener la conductividad, se debe seleccionar la región estudiada y pulsar sobre "Ver". Con esto, se abre una imagen en la que aparece la conductividad del terreno en cada zona de la región seleccionada. Estos mapas de conductividad han sido extraídos de la recomendación P.527 de la ITU-R [29]. Estos valores corresponden a "Sigma" (conductividad) y "Epsilon" (permitividad dieléctrica).

| Terreno                                    | Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) | Conductividad ( $\sigma$ ) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| Agua de mar, salinidad baja                | 80                                      | 1                          |
| Agua de mar, salinidad media               | 70                                      | 5                          |
| Agua dulce                                 | 80                                      | $3e^{-3}$                  |
| Tierra                                     | 40                                      | $3e^{-2}$                  |
| Tierra húmeda                              | 30                                      | $1e^{-2}$                  |
| Tierra moderadamente seca                  | 15                                      | $1e^{-3}$                  |
| Tierra seca                                | 7                                       | $3e^{-4}$                  |
| Tierra muy seca                            | 3                                       | $1e^{-4}$                  |
| Hielo de agua dulce, $-1^{\circ}\text{C}$  | 3                                       | $3e^{-5}$                  |
| Hielo de agua dulce, $-10^{\circ}\text{C}$ | 3                                       | $1e^{-5}$                  |

Figura 7.1.1.2 Valores permitividad dieléctrica

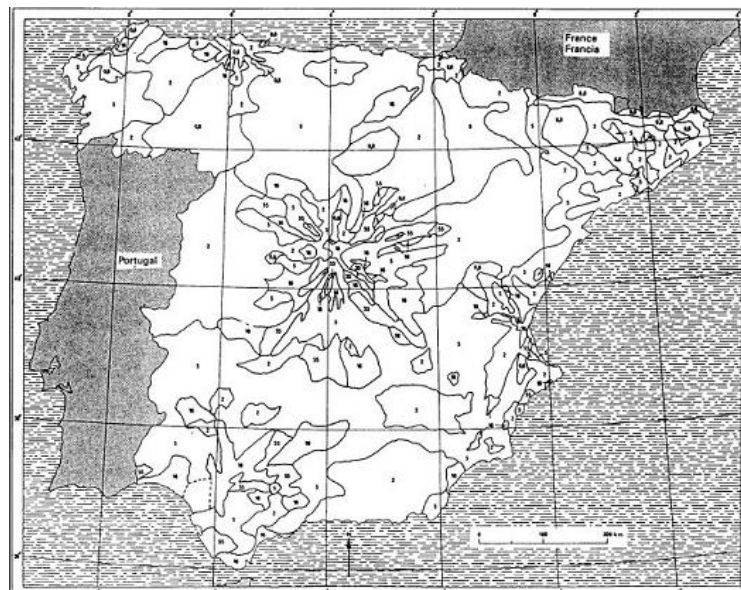


Figura 7.1.1.3 Valores conductividad de la región de España

En segundo lugar, se elige el tipo de polarización: se escribe un "1" si es vertical y un "2" si es horizontal.

En tercer lugar, se selecciona el número de frecuencias que se quieran representar abriendo el menú desplegable "Nº Frecuencias" y se escriben en la columna "Frecuencias".

Por último, pulsamos sobre "Graficar". Las curvas se mostrarán en el eje de coordenadas que aparece en la parte derecha de la interfaz. Si se pulsa sobre el icono



se puede guardar la gráfica generada con extensión jpg.

### 7.1.2 Estudio de propagación mediante archivo kml

La interfaz es la siguiente:

Figura 7.1.2.1 interfaz\_uno.fig

En primer lugar, se pulsa sobre "Valores permitividad dieléctrica" para obtener una ayuda en la que se muestra dichos valores para cada tipo de terreno. Para obtener la conductividad, se debe seleccionar la región estudiada y pulsar sobre "Ver conductividad". Con esto, se abre una imagen en la que aparece la conductividad del terreno en cada zona de la región seleccionada. Estos valores corresponden a "Sigma" (conductividad) y "Épsilon" (permitividad dieléctrica).

En segundo lugar se selecciona el número de emplazamientos del trayecto seleccionándolo en el menú "Número Emplazamientos". Después, se introducen los valores de conductividad y permitividad en la parte "Características del trayecto".

En tercer lugar, se introducen los datos correspondientes a las alturas efectivas del transmisor y receptor, frecuencia de operación, polarización y la potencia de la antena emisora y se pulsa sobre "Ejecutar".

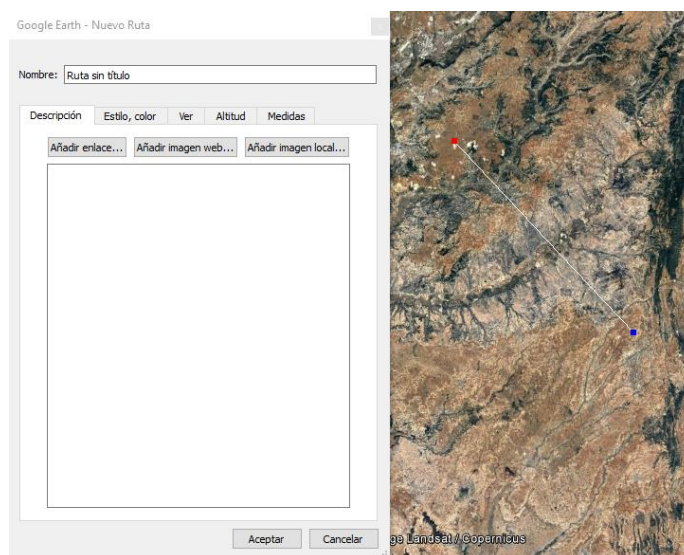
Por último se introduce el nombre del fichero kml donde se encuentre el trayecto definido por el usuario. Si no se ha creado, pulsamos sobre el botón "Abrir Google Earth"

para que se abra dicho software y sobre "Ayuda Google Earth". Aparecerá un documento en el que se indica cómo crear este fichero paso a paso.

#### 7.1.2.1 Crear el fichero kml

En este apartado se indica cómo crear un fichero kml con el trayecto definido por el usuario:

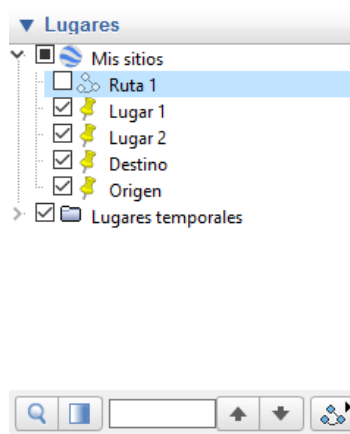
1. Abrir Google Earth.
2. Pulsar sobre el siguiente icono: 
3. Se abrirá una ventana para asignar un nombre a la ruta y un indicador cuadrado para determinar la ruta. Clicamos sobre el punto del mapa correspondiente al principio de la ruta y clicamos de nuevo donde se ubica nuestro punto final.



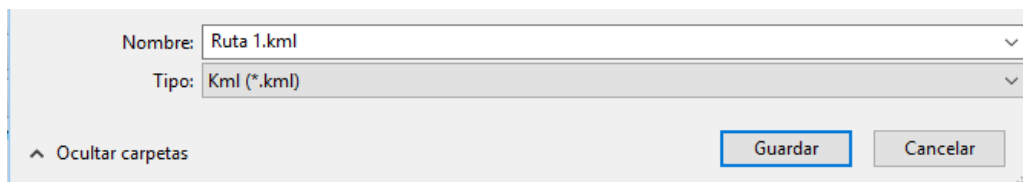
4. Sobre esta ruta iremos colocando los demás emplazamientos mediante el siguiente botón: 
5. Al pulsar sobre este icono, el cursor cambia a una chincheta. Colocar esta chincheta donde corresponda dentro de la ruta creada anteriormente. Podemos ver la información de posición (longitud y latitud) del emplazamiento en la ventana que aparecerá a la izquierda.
6. Una vez definidos todos los puntos de la ruta, exportamos el contenido a un archivo con extensión "kml".

Para ello, primero deseleccionamos la ruta y hacemos clic con el botón derecho sobre "Mis sitios" en la parte izquierda de la interfaz de Google Earth, denominada "Lugares" y seleccionamos la opción "Guardar lugar como":

El programa detectará automáticamente el número de trayectos que se corresponden. En cada uno de ellos, la conductividad y la permitividad dieléctrica serán consideradas constante y el campo en recepción se obtiene aplicando el método de Millington.



Seleccionamos la extensión "kml" y guardamos en archivo:



### 7.1.3 Estudio de propagación mediante coordenadas

La interfaz es la siguiente:

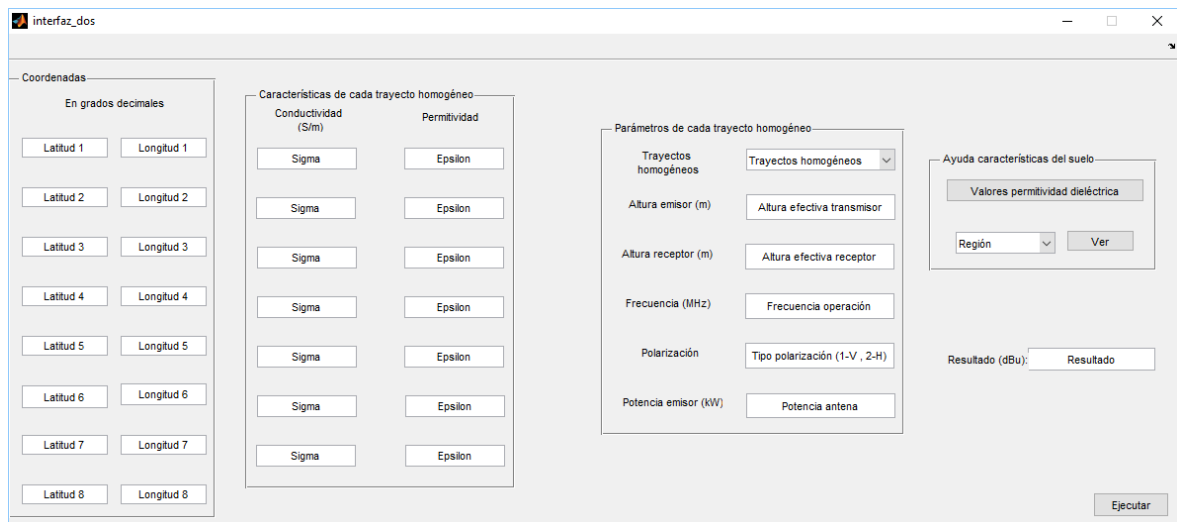


Figura 7.1.3.1 interfaz\_dos.fig

En primer lugar, se pulsa sobre "Valores permitividad dieléctrica" para obtener una ayuda en la que se muestra dichos valores para cada tipo de terreno. Para obtener la conductividad, se debe seleccionar la región estudiada y pulsar sobre "Ver

conductividad". Con esto, se abre una imagen en la que aparece la conductividad del terreno en cada zona de la región seleccionada. Estos valores corresponden a "Sigma" (conductividad) y "Épsilon" (permitividad dieléctrica).

En segundo lugar se selecciona el número de emplazamientos del trayecto seleccionándolo en el menú "Número Emplazamientos". Después, se introducen los valores de conductividad y permitividad en la parte "Características del trayecto" y los valores de latitud y longitud en la parte de "Coordenadas".

En tercer lugar, se introducen los datos correspondientes a las alturas efectivas del transmisor y receptor, frecuencia de operación, polarización y la potencia de la antena emisora y se pulsa sobre "Ejecutar".

#### 7.1.4 Casos

##### 7.1.4.1 Caso del estudio de propagación con fichero kml

A continuación, se realizará un ejemplo de un estudio de propagación por onda de superficie para facilitar el manejo del programa al usuario.

En primer lugar se define el trayecto en Google Earth, por lo que en la interfaz pulsamos sobre "Abrir Google Earth" y seguimos los pasos descritos que aparecen en el documento que se abre al pulsar sobre "Ayuda Google Earth".



Figura 7.1.4.1 Estudio de propagación con kml (parte 1)

En este caso se ha definido un trayecto entre París y Londres que presenta dos discontinuidades, es decir, lugares donde las características eléctricas del terreno cambian.

A continuación se introducen los parámetros del trayecto. En este ejemplo, el número de emplazamientos es cuatro, las alturas efectivas del transmisor y del receptor son cero, se trabaja a 5 MHz con polarización vertical y con una potencia de antena emisora de 10 kW.

Figura 7.1.4.2 Estudio de propagación con kml (parte 2)

El siguiente paso es determinar las características eléctricas del terreno. En primer lugar, hay un terreno de tierra, el segundo tipo de terreno es agua salada y, por último, se vuelve a tener tierra.

Los valores de conductividad (sigma) y permitividad (épsilon) se obtienen en el menú de ayuda. En este caso, se selecciona "Europa" en el menú "Región". Al pulsar sobre "Ver conductividad" se obtiene lo siguiente:

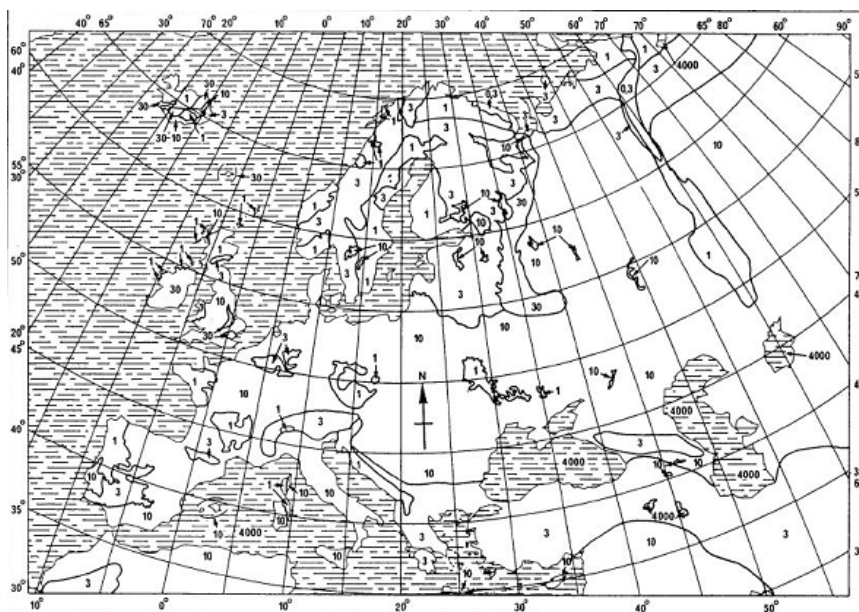


Figura 7.1.4.3 Estudio de propagación con kml (parte 3). Mapa de conductividad de Europa

Si se pulsa sobre "Valores permitividad dieléctrica", aparece lo siguiente:

| Terreno                                    | Permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) | Conductividad ( $\sigma$ ) |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| Agua de mar, salinidad baja                | 80                                      | 1                          |
| Agua de mar, salinidad media               | 70                                      | 5                          |
| Agua dulce                                 | 80                                      | $3e^{-3}$                  |
| Tierra                                     | 40                                      | $3e^{-2}$                  |
| Tierra húmeda                              | 30                                      | $1e^{-2}$                  |
| Tierra moderadamente seca                  | 15                                      | $1e^{-3}$                  |
| Tierra seca                                | 7                                       | $3e^{-4}$                  |
| Tierra muy seca                            | 3                                       | $1e^{-4}$                  |
| Hielo de agua dulce, $-1^{\circ}\text{C}$  | 3                                       | $3e^{-5}$                  |
| Hielo de agua dulce, $-10^{\circ}\text{C}$ | 3                                       | $1e^{-5}$                  |

Figura 7.1.4.4 Estudio de propagación con kml (parte 4)

Una vez conocidos estos valores, se introducen en "Características del trayecto".

interfaz\_uno

Características de cada trayecto homogéneo

Conductividad (S/m)      Permitividad

0.003      22

5      70

0.003      22

Parámetros de cada trayecto homogéneo

Trayectos homogéneos: 4

Altura transmisor (m): 0

Altura receptor (m): 0

Frecuencia (MHz): 5

Polarización: 1

Potencia transmisor (kW): 10

Ayuda características del suelo

Valores permitividad dieléctrica

Europa      Ver conductividad

Fichero KML

Abrir Google Earth      Ayuda Google Earth

Fichero kml      Fichero KML

Resultado (dBu):      Resultado

Ejecutar

Figura 7.1.4.5 Estudio de propagación con kml (parte 5)

Por último se introduce el nombre del fichero kml creado anteriormente y pulsamos sobre "Ejecutar":

interfaz\_uno

Características de cada trayecto homogéneo

Conductividad (S/m)      Permitividad

0.003      22

5      70

0.003      22

Parámetros de cada trayecto homogéneo

Trayectos homogéneos: 4

Altura transmisor (m): 0

Altura receptor (m): 0

Frecuencia (MHz): 5

Polarización: 1

Potencia transmisor (kW): 10

Ayuda características del suelo

Valores permitividad dieléctrica

Europa      Ver conductividad

Fichero KML

Abrir Google Earth      Ayuda Google Earth

Fichero kml      **Ruta Paris-Londres.kml**

Resultado (dBu):      Resultado

Ejecutar

Figura 7.1.4.6 Estudio de propagación con kml (parte 6)

El resultado obtenido es el siguiente:

The screenshot shows the 'interfaz\_uno' window with the following settings:

- Características de cada trayecto homogéneo:**
  - Conductividad (S/m): 0.003, 5, 0.003
  - Permitividad: 22, 70, 22
- Parámetros de cada trayecto homogéneo:**
  - Trayectos homogéneos: 4
  - Altura transmisor (m): 0
  - Altura receptor (m): 0
  - Frecuencia (MHz): 5
  - Polarización: 1
  - Potencia transmisor (kW): 10
- Ayuda características del suelo:**
  - Valores permitividad dieléctrica: Europa
  - Ver conductividad: [button]
- Fichero KML:**
  - Abrir Google Earth: [button]
  - Ayuda Google Earth: [button]
  - Fichero kml: Ruta París-Londres.kml
- Resultado (dBu):** -0.32
- Ejecutar:** [button]

Figura 7.1.4.7 Estudio de propagación con kml (parte 7)

Esto significa que a Londres (receptor) llega un nivel de potencia de **-0.32 dBu**.

#### 7.1.4.2 Caso del estudio de propagación mediante las coordenadas

En este caso, conocemos las coordenadas de latitud y longitud de los diferentes emplazamientos del trayecto. Para el mismo caso anterior, la coordenadas de París son (48.8566°, 2.3522°) y las de Londres son (51.4965°, 0.0710°). Además, conocemos las coordenadas de los puntos donde cambia el terreno, que son (50.0625°, 1.3582°) y (50.8686°, 0.6587°).

En primer lugar, seleccionamos el número de emplazamientos en el menú desplegable "Número Emplazamientos" que, en nuestro caso, es cuatro e introducimos el resto de parámetros del trayecto.

The screenshot shows the 'interfaz\_dos' window with the following settings:

- Coordenadas:**
  - En grados decimales
  - Latitud 1, Longitud 1
  - Latitud 2, Longitud 2
  - Latitud 3, Longitud 3
  - Latitud 4, Longitud 4
- Características de cada trayecto homogéneo:**
  - Conductividad (S/m): Sigma
  - Permitividad: Epsilon
- Parámetros de cada trayecto homogéneo:**
  - Trayectos homogéneos: 4
  - Altura emisor (m): 0
  - Altura receptor (m): 0
  - Frecuencia (MHz): 5
  - Polarización: 1
  - Potencia emisor (kW): 10
- Ayuda características del suelo:**
  - Valores permitividad dieléctrica: Región
  - Ver: [button]
- Resultado (dBu):** Resultado
- Ejecutar:** [button]

Figura 7.1.4.2.1 Estudio de propagación con coordenadas (parte 1)

En segundo lugar, introducimos las coordenadas de cada trayecto homogéneo en la parte de "Coordenadas". Deben de estar en orden desde el origen hasta el destino.

The screenshot shows the 'interfaz\_dos' window. The 'Coordenadas' section is highlighted with a red box. It contains a table for entering coordinates in decimal degrees:

| En grados decimales |        |
|---------------------|--------|
| 40.0566             | 2.3522 |
| 50.0625             | 1.3582 |
| 50.8606             | 0.6567 |
| 51.4965             | 0.0710 |

Other sections visible include 'Características de cada trayecto homogéneo' with input for Conductividad (Sigma) and Permittividad (Epsilon), 'Parámetros de cada trayecto homogéneo' with inputs for number of homogeneous paths, antenna heights, frequency, polarization, and power, and 'Ayuda características del suelo' for soil characteristics.

Figura 7.1.4.2.2 Estudio de propagación con coordenadas (parte 2)

Por último, definimos las características de cada tipo de terreno. Para obtener estos valores, pulsamos sobre los botones de la sección "Ayuda características del suelo" al igual que se detalló en el caso anterior.

The screenshot shows the same 'interfaz\_dos' window, but now the 'Características de cada trayecto homogéneo' section is highlighted with a red box. The terrain characteristics have been defined:

| Características de cada trayecto homogéneo |               |
|--------------------------------------------|---------------|
| Conductividad (S/m)                        | Permittividad |
| 0.003                                      | 22            |
| 5                                          | 70            |
| 0.003                                      | 22            |

The 'Coordenadas' section remains unchanged. The 'Parámetros de cada trayecto homogéneo' and 'Ayuda características del suelo' sections are also visible.

Figura 7.1.4.2.2 Estudio de propagación con coordenadas (parte 3)

Pulsamos sobre "Ejecutar" y obtenemos el resultado:

The screenshot shows the 'interfaz\_dos' window with the following sections:

- Coordenadas:** A table with 4 rows of coordinates in decimal degrees.
 

| En grados decimales |        |
|---------------------|--------|
| 40.0566             | 2.3522 |
| 50.0625             | 1.3582 |
| 50.8606             | 0.6567 |
| 51.4965             | 0.0710 |
- Características de cada trayecto homogéneo:** A table with 3 rows of conductivity and permittivity values.
 

| Conductividad (S/m) | Permitividad |
|---------------------|--------------|
| 0.003               | 22           |
| 5                   | 70           |
| 0.003               | 22           |
- Parámetros de cada trayecto homogéneo:**
  - Trayectos homogéneos: 4
  - Altura emisor (m): 0
  - Altura receptor (m): 0
  - Frecuencia (MHz): 5
  - Polarización: 1
  - Potencia emisor (KW): 10
- Ayuda características del suelo:**
  - Valores permitividad dieléctrica: (button)
  - Región: (dropdown menu)
  - Ver: (button)
- Resultado (dBu):** -0.32 (highlighted with a red box)
- Ejecutar:** (button)

Figura 7.1.4.2.2 Estudio de propagación con coordenadas (parte 4)

Comprobamos que el resultado es el mismo, ya que las coordenadas introducidas manualmente en la interfaz dos corresponden con los puntos definidos por el usuario en el archivo kml de la interfaz uno.

#### 7.1.4.3 Caso para generar curvas de la ITU-R

Vamos a representar varias curvas correspondientes a distintas frecuencias para diferentes tipos de terreno.

Para el primer caso tenemos un terreno de tierra seca a una frecuencia de operación de 5 MHz. Las características de este tipo de suelo son:  $\epsilon_r=15$  y  $\sigma=0.001$  S/m.

Seleccionamos el número de frecuencias, en este caso, una única frecuencia, introducimos los parámetros y pulsamos sobre "Graficar".

The screenshot shows the 'interfaz\_curvas' window with the following sections:

- Frecuencias:** 5
- Ayuda características del suelo:**
  - Valores permitividad dieléctrica: (button)
  - Región: (dropdown menu)
  - Ver: (button)
- Parámetros:**
  - Nº Frecuencias: 1
  - Polarización: 1
  - Conductividad: 0.001
  - Permitividad: 15
- Gráfico:** A blank coordinate system with x and y axes ranging from 0 to 1.
- Graficar:** (button)

Figura 7.1.4.3.1 Generar Curvas de la ITU-R (parte 1)

El resultado es el siguiente:

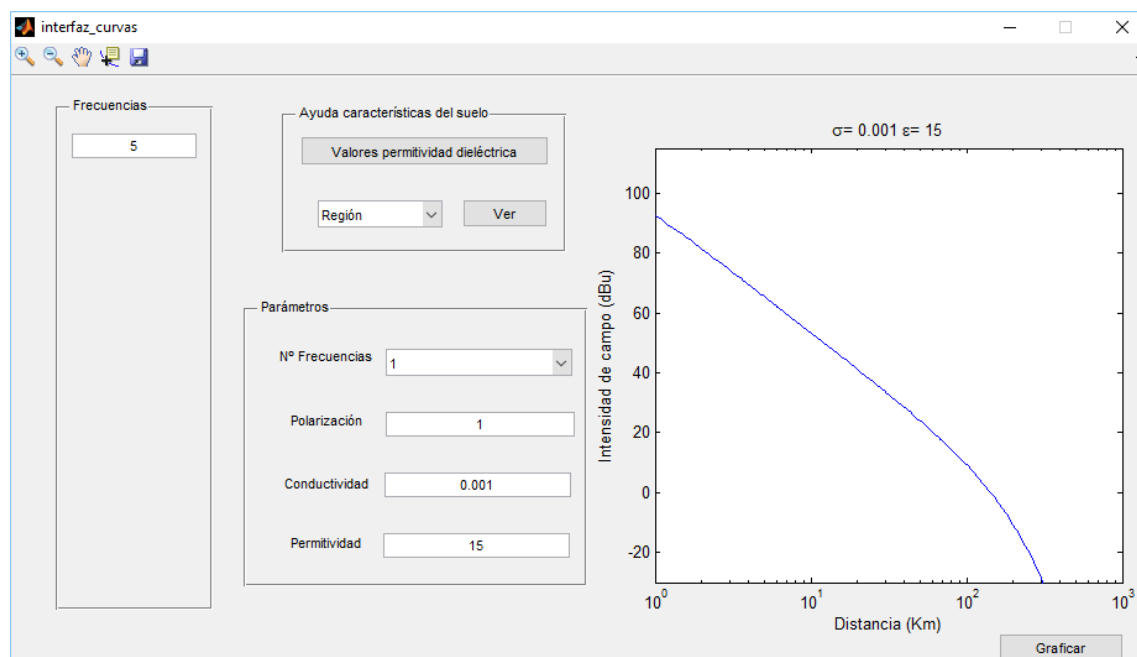


Figura 7.1.4.3.2 Generar Curvas de la ITU-R (parte 2)

En el siguiente caso, tenemos otra frecuencia de 15 MHz. En este caso, debemos seleccionar "2" en "Nº Frecuencias". El terreno es el mismo, por lo que las características eléctricas no varían.

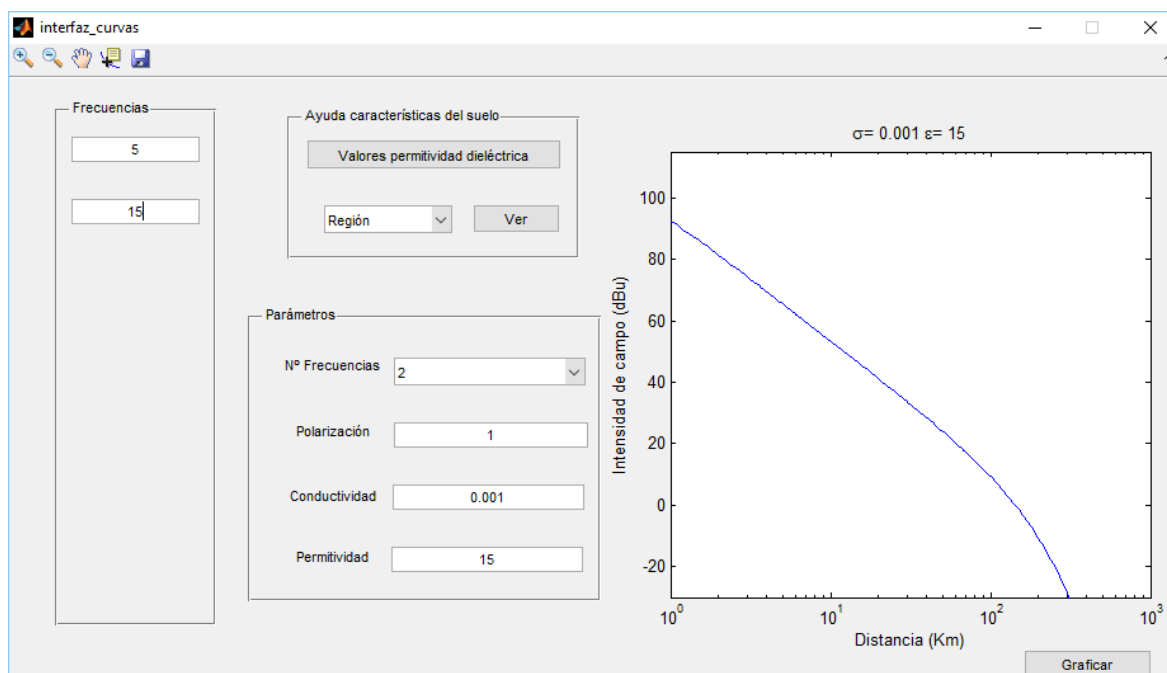


Figura 7.1.4.3.3 Generar Curvas de la ITU-R (parte 3)

El resultado es el siguiente:

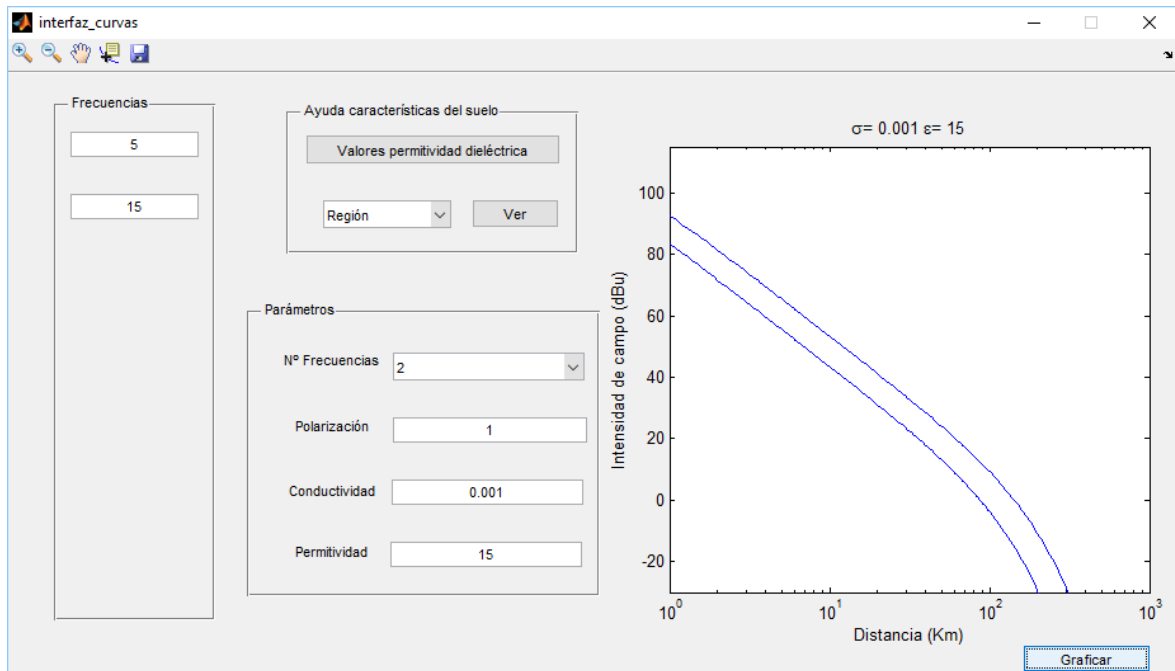


Figura 7.1.4.3.4 Generar Curvas de la ITU-R (parte 4)

De esta forma se generan las gráficas que aparecen en la recomendación P.368 de la ITU-R. Si se quieren representar gráficamente más frecuencias, solo hay que seleccionarlás en el menú correspondiente.

## 7.2 Manual del programador

En este manual se desarrollan las funciones implementadas así como la relación que éstas poseen entre sí en un diagrama de flujo. El objetivo de éste es ayudar a comprender con mayor facilidad la toolbox desarrollada en caso de que se quiera seguir ampliando en un futuro.

La toolbox denominada "GroundWaveTool" contiene las siguientes funciones:

```
% GroundWaveTool Toolbox es una toolbox que realiza el cálculo del campo
% eléctrico en un punto mediante el método de propagación por onda de
% superficie. Este método tiene en cuenta las características eléctricas
% del suelo: permitividad dieléctrica y conductividad.
% Este modo de propagación se realiza según distintos métodos, detallados
% más adelante.
%
% Contenido de GroundWaveTool:
%
% abrir_googleearth - Función que abre el software
%                   Google Earth
```

|                                            |                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <code>% abrir_ayuda_googleeearth</code>    | - Función que abre un documento de texto de ayuda para generar un archivo KML con Google Earth.                                                                                                                      |
| <code>% crear_inicio_dosbox_curvas</code>  | - Función que genera el archivo de configuración de inicio de DOSBox que es utilizado para ejecutar la función "curva_grwave".                                                                                       |
| <code>% crear_inicio_dosbox_general</code> | - Función que genera el archivo de configuración de inicio de DOSBox que es utilizado para ejecutar las funciones excepto "curva_grwave".                                                                            |
| <code>% modelo_simplificado</code>         | - Función que calcula el campo debido a onda de superficie asumiendo terreno plano, homogéneo y conductor perfecto.                                                                                                  |
| <code>% curva_grwave</code>                | - Función que grafica las curvas correspondientes a las frecuencias introducidas según el modelo de propagación por onda de superficie descrito en la recomendación P368 de la ITU haciendo uso del software GRWAVE. |
| <code>% RecP368</code>                     | - Función que calcula el campo eléctrico para el modelo de tierra curva homogénea detallado en la recomendación 368 de la ITU con características eléctricas conocidas. Este programa utiliza el software GRWAVE.    |
| <code>% grwave</code>                      | - crea el archivo .txt de entrada, llama a GRWAVE y extrae el dato de salida.                                                                                                                                        |
| <code>% leer_grwave</code>                 | - obtiene los datos de salida de GRWAVE.                                                                                                                                                                             |
| <code>% lanzar_ayuda</code>                | - abre en el navegador las recomendaciones P832 y P527                                                                                                                                                               |
| <code>% ordenar</code>                     | - función que ordena los emplazamientos definidos por el usuario teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra cada uno con el resto                                                                         |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | correspondientes a las características eléctricas del suelo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| % parse_kml           | - función que extrae las coordenadas (latitud y longitud) de los sitios que han sido descritos en un archivo con extensión kml.                                                                                                                                                                                                                                       |
| % ley_esferica_coseno | - calcula la distancia ortodrómica entre dos puntos geográficos dados por longitud y latitud.                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| % vincenty            | - Función que calcula la distancia ortodrómica entre dos puntos geográficos dados por su longitud y latitud.<br>Este método tiene en cuenta que la Tierra es una elipsoide de revolución, por tanto, los semiejes no son de la misma longitud.                                                                                                                        |
| % haversine           | - calcula la distancia ortodrómica entre dos puntos geográficos dados por longitud y latitud.                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| % norton              | - Función que calcula el campo eléctrico mediante el método de propagación por onda de superficie según las aproximaciones de Norton. Este modelo es válido para el caso en el que la altura de la antena sea mucho menor que la longitud de onda. Considera un modelo de Tierra plana, es decir, no considera la atenuación producida por la curvatura de la Tierra. |
| % rohan               | - Función que calcula el campo eléctrico mediante el método de por onda de superficie según las aproximaciones de Norton. Este modelo es válido para el caso en el que la altura de la antena sea mucho menor que la longitud de onda. Considera un modelo de Tierra plana, es decir, no considera la atenuación producida por la curvatura de la Tierra.             |
| % error_comp          | - calcula la función de error complementario según desarrollo en serie.                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

```

% millington
- calcula el campo eléctrico en el receptor en un inhomogéneo, es decir, cuando hay más de un tipo de suelo con diferentes características.

% principal_uno
- calcula el campo eléctrico en cada uno de los puntos del trayecto definido por el usuario. Estos tramos tienen distintas características eléctricas, por lo que se hace uso del método de Millington. El usuario interactúa con Google Earth para aportar diferentes datos detallados en el programa, como por ejemplo: latitud y longitud, longitud del tramo, etc. Esta es una de las dos formas que tiene el usuario de interactuar con Google Earth y MATLAB. En este programa, el usuario utiliza Google Earth como ayuda para obtener las coordenadas de los emplazamientos para indicarlos la función de MATLAB.

% principal_dos
- resultados similares al "principal_uno.m". La única diferencia es la forma de interactuar con el programa. El usuario define una ruta en Google Earth (se le proporcionará un fichero de texto de ayuda) y las características eléctricas de cada uno de los tramos. Una vez definido, el usuario lo exportará a un fichero .kml y le pasará esta función.

% Las interfaces, como su propio nombre indica, corresponden a cada una de las interfaces correspondientes a las funciones "principal_uno", "principal_dos" y "curva_grwave".
% Mediante la interfaz principal nos podemos mover por el resto de interfaces.
%
% Autor: Pedro José Hidalgo Cobo.

```

El código anterior muestra el contenido del fichero "**Contents.m**", que informa de cada una de las funciones existentes y para que se utilizan.

Además de las funciones expuestas, se ha creado una interfaz principal con la herramienta GUIDE de MATLAB. Esta interfaz hace más sencillo el método de inserción de datos por parte del usuario y de una forma muy intuitiva. También se le proporciona

una ayuda para determinar las características eléctricas del terreno (conductividad y permitividad dieléctrica). Todo esto se encuentra integrado en la interfaz de usuario.

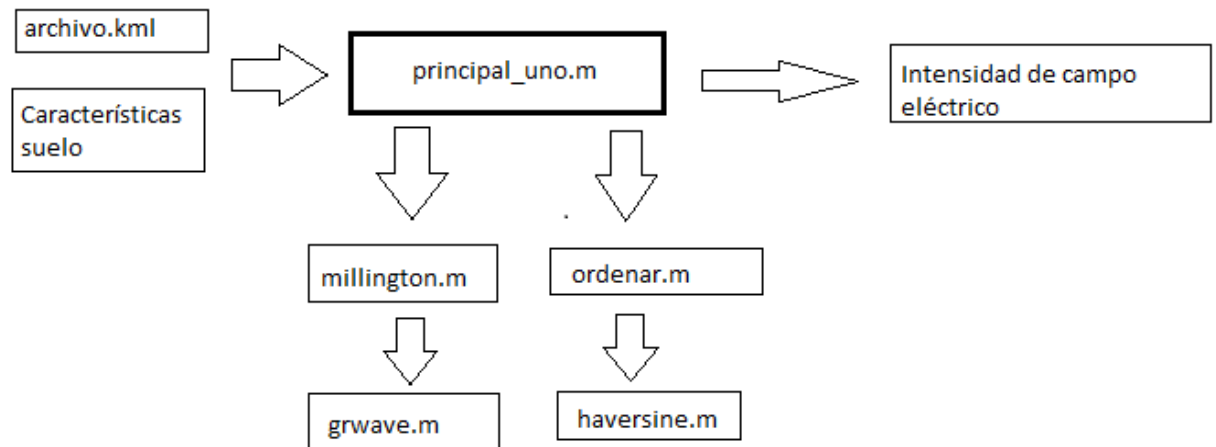


Figura 7.2.1 Diagrama de flujo de `principal_uno.m`

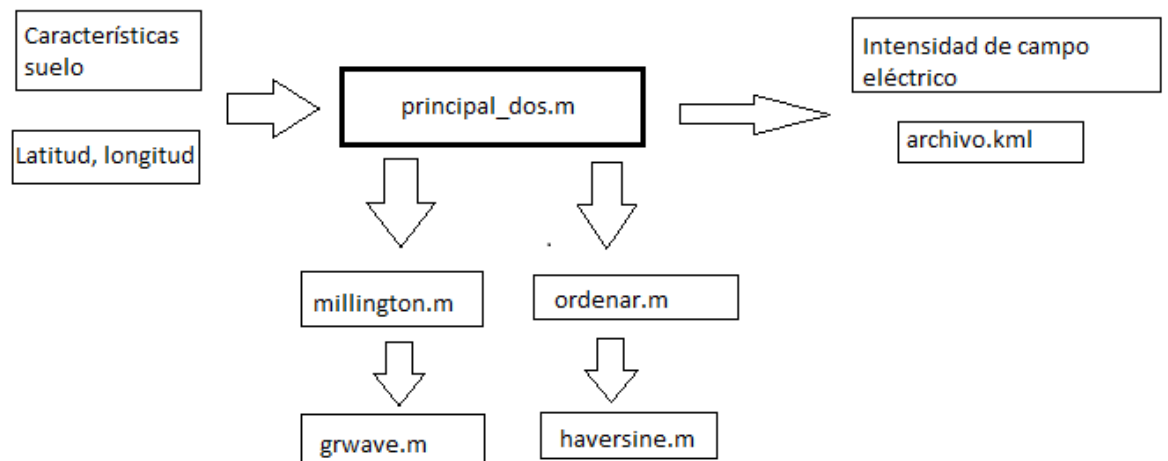


Figura 7.2.2 Diagrama de flujo de `principal_dos.m`

La función "**abrir\_ayuda\_googleearth**" abre un documento de texto con las instrucciones necesarias para que el usuario cree, sin problemas, el archivo con extensión kml que incluye la ruta definida por el mismo. Este archivo será utilizado por otra función de la toolbox para calcular la intensidad de campo eléctrico de la ruta contenida. Se invoca de la siguiente forma: `function abrir_ayuda_googleearth.`

La función "**lanzar\_ayuda.m**" muestra un cuadro en el cual se indica el valor de la permitividad dieléctrica en función del terreno. Se invoca de la siguiente forma:

```
function lanzar_ayuda
```

La función **"modelo\_simplificado.m"** calcula la intensidad de campo eléctrico debido a onda de superficie asumiendo terreno plano, homogéneo y conductor perfecto. Los resultados se ofrecen tanto en voltios por metro (V/m) como en dBu. La función se invoca del siguiente modo:

```
function [Evm,Edbu] = modelo_simplificado(pravc,d)

%%Parámetros de entrada:
% pravc: potencia transmitida referida a la antena vertical corta
(W).
% d:      distancia al punto de cálculo (km)

%%Parámetros de salida:
% Evm: campo rms en el punto determinado (en V/m)
% Edbu: campo rms en el punto determinado (en dbu)
```

En primer lugar se pregunta al usuario por la polarización de la antena transmisora. Como se ha explicado antes, para el método de propagación por onda de superficie es necesario que las antenas tengan una polarización vertical.

Si la polarización es la correcta, se aplica la fórmula correspondiente para obtener el campo eléctrico una determinada la distancia.

Una vez obtenidos los resultados, se presentan al usuario en las distintas unidades mencionadas anteriormente.

La función **"haversine.m"** calcula la distancia sobre la superficie terrestre entre dos puntos según el método de Haversine dadas sus coordenadas de latitud y longitud. Los datos de entrada son la latitud y longitud de los emplazamientos y nos devuelve la distancia entre ambos puntos. La invocación se realiza del siguiente modo:

```
function d = haversine (lat1,long1,lat2,long2)
%%
% Parámetros de entrada:
% lat1:      latitud del primer emplazamiento (grados).
% lat2:      latitud del segundo emplazamiento (grados).
% long1:     longitud del primer emplazamiento (grados).
% long2:     longitud del segundo emplazamiento (grados).

%%Parámetros de salida:
% d:         distancia entre los dos emplazamientos (km).
```

La función **"ley\_esferica\_coseno.m"**, al igual que el método anterior, es otra forma de calcular la distancia sobre la superficie terrestre entre dos puntos utilizando geometría esférica. La llamada a la función es la siguiente:

```
function d = ley_esferica_coseno (lat1,long1,lat2,long2)
%%
% Parámetros de entrada:
% lat1:      latitud del primer emplazamiento (grados).
% lat2:      latitud del segundo emplazamiento (grados).
% long1:     longitud del primer emplazamiento (grados).
% long2:     longitud del segundo emplazamiento (grados).

%%Parámetros de salida:
% d:         distancia entre los dos emplazamientos (km)
```

La función **"vincenty.m"**, de igual forma que los anteriores, es otro método para calcular la distancia ortodrómica entre dos puntos. Sin embargo, como hemos demostrado en el apartado 5, es más exacto que los dos métodos anteriores, por tanto, es el que vamos a utilizar para realizar el cálculo de las distancias sobre la superficie de la Tierra. La llamada a la función se realiza del siguiente modo:

```
function d = vincenty (lat1,long1,lat2,long2)

%%
% Parámetros de entrada:
% lat1:      latitud del primer emplazamiento (grados).
% lat2:      latitud del segundo emplazamiento (grados).
% long1:     longitud del primer emplazamiento (grados).
% long2:     longitud del segundo emplazamiento (grados).

%%Parámetros de salida:
% d:         distancia entre los dos emplazamientos (km)
```

Este método involucra unas fórmulas más complejas que los anteriores, por lo que se obtiene una mayor precisión.

La función **"ordenar.m"** ordena los emplazamientos definidos por el usuario teniendo en cuenta la distancia a la que se encuentra cada uno de ellos con el resto. No es necesario que el usuario introduzca los emplazamientos en orden, lo que simplifica su trabajo. Toma el origen y compara todas las distancias con el resto. El punto que se encuentre a menor distancia es el segundo. Se repite el proceso hasta que todos queden ordenados. La función se invoca del siguiente modo:

```

function [lat_orden long_orden] = ordenar(latitud,longitud)
%% Parámetros de entrada:
    % latitud:    vector con los valores de la latitud de cada punto.
    % longitud:   vector con los valores de longitud de cada punto.
% Tanto el primer valor de longitud como el de latitud deben corresponder
% al punto de origen.

%% Parámetros de salida:
    % lat_orden: vector con los valores de latitud ordenados.
    % long_orden: vector con los valores de longitud ordenados.

```

La función **"RecP368.m"** calcula el campo eléctrico para el modelo de tierra curva con características eléctricas conocidas. Es el método que aparece en la recomendación P.368 de la ITU, resuelto mediante el software GRWAVE, mencionado al principio. Esta función crea el fichero de texto de entrada a GRWAVE. Los parámetros de este fichero, vistos con anterioridad, son los parámetros de entrada de la función. Seguidamente, se hace una llamada a GRWAVE a través del emulador DosBOX y se obtiene un fichero de texto con el resultado. Por último, se llama a la función **"leer\_grwave.m"** para obtener el resultado de dicho fichero de texto. Esta función se explica a continuación.

La invocación de esta función se realiza del siguiente modo:

```

function E = RecP368(HTT,HRR,FREQ,dmin,dmax,dstep,pot,dir)
%%
% Parámetros de entrada:
    % HTT:        altura efectiva del transmisor.
    % HRR:        altura efectiva del receptor.
    % FREQ:       frecuencia de operación (mHz).
    % epsilon:    permitividad dieléctrica del suelo (F/m). [se pregunta
durante la ejecución del programa]
    % sigma:      conductividad eléctrica del suelo (S/m). [se pregunta
durante la ejecución del programa]
    % dmin:       distancia de inicio (Km).
    % dmax:       distancia final (Km).
    % dstep:      número de pasos.
    % pot:        potencia del transmisor. Si no se indica nada será
    % 1KW(KW) .
    % dir:        directividad de la antena transmisora. Si no se indica
    % nada será 3.

%%Parámetros de salida:
    % E: campo eléctrico en el punto de operación (dBu)

```

La función **"leer\_grwave.m"** [34] es la encargada de extraer los valores del fichero de texto devuelto por GRWAVE. Estos valores corresponden con intensidades de campo eléctrico en cada punto del trayecto. Se invoca del siguiente modo:

```

function E = leer_grwave(fichero)

```

Debido que, dependiendo del fichero de entrada de GRWAVE, el archivo de salida puede tener presentaciones distintas, ha sido necesario establecer dos formas de lectura. Para ello se hace uso de un fichero de texto auxiliar.

La función **"grwave.m"** crea el archivo de entrada a GRWAVE, lo llama y extrae el dato de salida haciendo uso de la función anterior, **"leer\_grwave"**. Hace uso de la función de MATLAB "fopen" para crear el archivo que será leído por GRWAVE. Una vez que GRWAVE crea el fichero de salida, se obtiene el resultado mediante la función **"leer\_grwave.m"** del apartado anterior. La función se invoca de la siguiente forma:

```
function E = grwave(HTT,HRR,IPOL,FREQ,sigma,epsilon,d)

%%
% Parámetros de entrada:
% HTT:      altura efectiva del transmisor.
% HRR:      altura efectiva del receptor.
% IPOL:     tipo de polarización: vertical (1) u horizontal (2).
% FREQ:     frecuencia de operación (mHz).
% sigma:    conductividad eléctrica del suelo (S/m).
% epsilon:  permitividad dieléctrica del suelo (F/m).
% d:        distancia al punto de cálculo(km).

% Parámetros de salida:
% E: campo eléctrico en el punto de operación (dBu).
```

La función **"curva\_grwave.m"** es la encargada de representar gráficamente las curvas correspondientes a las frecuencias introducidas por el usuario según el modelo de propagación por onda de superficie descrito en la recomendación de la P.368 de la ITU basándose en el uso del software GRWAVE.

Debido a que el eje de abscisas es logarítmico, se ha dividido el mismo en cuatro partes para coger el mismo número de punto en cada una de ellas. Las divisiones se han hecho por décadas, es decir, de la 1 a la 10, de la 10 a la 100, de la 100 a la 1000 y de la 1000 a la 10000.

La primera parte del código crea un fichero de entrada a GRWAVE para cada una de las décadas y llama al mismo para obtener los correspondientes ficheros de salida para cada una de las entradas.

En segundo lugar, se realiza la lectura de cada uno de estos ficheros de texto de salida y los resultados se almacenan en un vector.

Por último, se realiza la representación gráfica de los vectores obtenidos teniendo en cuenta que el eje de abscisas es logarítmico. La llamada a esta función se realiza del siguiente modo:

```
function [datos_d,datos_E] = curva_grwave(IPOL,FREQ,sigma,epsilon)

%%
% Parámetros de entrada:
% IPOL:      tipo de polarización: vertical (1) u horizaontal (2).
% FREQ:      frecuencia de operación (MHz).
% epsilon:   permitividad dieléctrica (F/m).
% sigma:     conductividad del suelo (S/m).

%%
% Parámetros de salida:
% E: vector con el campo eléctrico en cada punto (dBu).
% d: vector con cada una de las distancias (Km).
```

La función "**norton.m**" calcula el campo eléctrico en un punto según el método de Norton. Este método considera una aproximación óptica-geométrica de la propagación de rayos para la representación de la onda. Considera la propagación asumiendo condiciones de Tierra plana, por lo que es un método orientado al cálculo para cortas distancias, en las que los efectos debidos a la curvatura de la Tierra pueden considerarse despreciables.

Se definen las constantes necesarias, como por ejemplo, radio de la Tierra (a), velocidad de la luz (c) o número de onda (k), entre otras, que servirán para calcular la atenuación debida a la curvatura de la Tierra.

Como corrección aplica la función de error complementario. Sin embargo, MATLAB solo acepta un argumento real, por lo que ha sido necesario crear nuestra propia función de error complementario aplicando la expansión en series de la misma que aparece en [35].

Por último, aplicamos está atenuación al campo eléctrico calculado al principio sin considerar el factor de atenuación. La llamada a la función se hace del siguiente modo:

```
function E = norton (eps_r, sigma, f, d, pot)

%%
% Parámetros de entrada:
% eps_r:   permitividad relativa de la superficie
% f:       frecuencia de operación (Hz)
% sigma:   conductividad eléctrica del suelo (S/m)
% d:       distancia al punto de cálculo (m)
% pot:     potencia del transmisor (kW)

%%Parámetros de salida:
% E: campo eléctrico en el punto de operación (dBu)
```

La función **"error\_comp.m"** calcula la función de error complementario de un argumento imaginario mediante el método de expansión en serie. Su invocación se realiza del siguiente modo:

```
function er_com = error_comp (z)

%%
% Parámetros de entrada:
% z:      argumento de la función error complementario

%%Parámetros de salida:
% er_com: error complementario
```

La función **"rohan.m"** calcula el campo eléctrico debido a onda de superficie en un punto determinado según la propagación mediante onda de superficie sobre Tierra plana. Este modelo es válido para el caso en que la altura de la antena sea mucho menor que la longitud de onda. Considera un modelo de Tierra plana, por lo que no tiene en cuenta la atenuación producida por la curvatura de la Tierra. La función se invoca del siguiente modo:

```
function E = rohan(f,eps,sigma,d,pot)

%%
% Parámetros de entrada:
% f:      frecuencia de operación (Hz)
% eps:    permitividad relativa de la superficie
% sigma:  conductividad eléctrica del suelo (S/m)
% d:      distancia al punto de cálculo (m)
% pot:    potencia del transmisor (kW)

%%Parámetros de salida:
% E:      campo eléctrico en el punto de operación (dBu)
```

La función **"millington.m"** [34] calcula el campo eléctrico cuando se tiene tipo un suelo inhomogéneo, es decir, existen discontinuidades en los que el terreno presenta diferentes características eléctricas. Este método ya ha sido explicado en detalle cómo funciona en el apartado 4.3. Por tanto, en este apartado sólo veremos cómo ha sido implementado.

El cálculo que este método realiza del campo eléctrico en cada uno de los tramos puede ser realizado según distintos modelos. En este caso, se ha elegido utilizar el programa GRWAVE debido a que es el programa que hemos utilizado como referencia para comparar los valores obtenidos en el resto de métodos, ya que presenta unos resultados más próximos a la realidad que el resto. La llamada a la función es la siguiente:

```
function Etotal= millington(HTT,HRR,MFREQ,MIPOL,MEPSLON,MSIGMA,MDIST,pot)

%% Parámetros de entrada:
    % HTT:          altura eficaz del transmisor. Dirección tx->rx.
    % HRR:          altura eficaz del receptor. Dirección rx->tx.
    % MFREQ:        frecuencia de operación (MHz).
    % MIPOL:        tipo de polarización: vertical (1) u horizontal
(2).
    % MEPSLON:      vector con los valores de permitividad dieléctrica.
    % MSIGMA:       vector con los valores de conductividad.
    % MDIST:        vector con las distancias de cada uno de los tramos
    % pot:          potencia radiada por la antena (W).

    % MEPSLON = [eps1 eps2 esp3...]
    % MSIGMA = [sigma1 sigma2 sigma3...]
    % MDIST = [d1 d2 d3...]
    % Etotal = millington(1200,900,1,1,[80 40],[0.003 0.03],[30 40])
%% Parámetros de salida:
    % Etotal: campo eléctrico resultante (en dBu).
```

La función **"parse\_kml.m"** [36] extrae las coordenadas de cada uno de los emplazamientos definidos en un archivo con extensión kml. Este tipo de archivos son generados por el programa Google Earth. La función se invoca del siguiente modo:

```
function [x,y,z] = parse_kml(fileName)

%%
% Parámetros de entrada:
    % fileName:     fichero de entrada en formato kml

%%Parámetros de salida:
    % x: coordenadas de latitud.
    % y: coordenadas de longitud.
    % z: coordenadas de altitud.
```

La función **"principal\_uno.m"** contiene el programa principal. Realiza el cálculo del campo eléctrico en cada uno de los puntos de un trayecto definido en un archivo con extensión kml.

El usuario crea este archivo con una ruta definida en su interior, se le proporciona una ayuda para tal fin, y lo introduce como argumento de entrada de esta función, así como las características eléctricas de cada tramo.

Una vez obtenidas las coordenadas de cada emplazamiento a partir del documento kml, se aplica el método de Millington para calcular el campo eléctrico resultante. Por último, se informa del error que se está tomando en el cálculo. La llamada a la función se realiza del siguiente modo:

```
function Etotal = principal_uno(fileName,HTT,HRR,MFREQ,MIPOL,MEPSLON,MSIGMA,pot)
```

```

%% Parámetros de entrada:
    % fileName:    fichero con extensión kml creado por el usuario.
    % HTT:         altura eficaz del transmisor. Dirección tx->rx.
    % HRR:         altura eficaz del receptor. Dirección rx->tx.
    % MFREQ:       frecuencia de operación (MHz).
    % MIPOL:       tipo de polarización: vertical (1) u horizontal
(2).
    % pot:         potencia radiada por la antena (W).

%% Parámetros de salida:
    % Etotal:      campo eléctrico resultante (en dBu).

```

La función "**principal\_dos.m**" contiene el programa principal que realiza el cálculo del campo eléctrico en cada uno de los puntos de un trayecto previamente definido por el usuario. Debe proporcionar las coordenadas de cada emplazamiento en formato de grados decimales (GD) así como las características eléctricas de cada tipo de suelo. Se proporciona una ayuda para determinar dichas características. Al tratarse de un trayecto no homogéneo, se hace uso del método de Millington para realizar el cálculo del campo eléctrico resultante.

El orden de los emplazamientos introducidos no tiene por qué ser de forma ordenada, ya que se ha creado una función "ordenar.m", descrita en el apartado 4.7, que dispone de forma ordenada dichos emplazamientos.

Se hace uso de la toolbox "googleearth" para interactuar con Google Earth y crear un archivo kml en el que colocamos los lugares definidos por el usuario, de modo que puedan verse situados en el mapa. Por último, se informa del error que se está tomando en el cálculo. La invocación de la función se realiza de la siguiente forma:

```

function Etotal = principal_dos(HTT,HRR,MFREQ,MIPOL,MEPSLON,MSIGMA,latitud,longitud,pot)
%% Parámetros de entrada:
    % HTT:         altura eficaz del transmisor. Dirección tx->rx.
    % HRR:         altura eficaz del receptor. Dirección rx->tx.
    % MFREQ:       frecuencia de operación (MHz).
    % MIPOL:       tipo de polarización: vertical (1) u horizontal
(2).

%% Parámetros de salida:
    % Etotal:      campo eléctrico resultante (en dBu).

```

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, 2017. Recomendaciones. [Consulta 29 junio 2017]. Disponible en: <http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [2] Rec. ITU-R P.527-3. *Características eléctricas de la superficie de la Tierra*, ITU, 1992.
- [3] Rec. ITU-R P.368-9. *Curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz*, ITU, 2007.
- [4] SOMMERFELD, A. Propagation of waves in wireless telegraphy. En: *Annalen Der Physik*. 1909, vol 28, pp. 665-736
- [5] NORTON, K.A. The propagation of radio waves over the surface of the earth and upper atmosphere – PART 1. En: *Proceeding of the institute of radio enginners*, 1936, vol.24, no.10, pp. 1367-1387
- [6] NORTON, K.A. The propagation of radio waves over the surface of the earth and upper atmosphere – PART 2. En: *Proceeding of the institute of radio enginners*, 1937, vol.25, no.9, pp. 1203-1236
- [7] KING, R. W. P. On the radiation efficiency and the electromagnetic field of a vertical electric dipole in the air above a dielectric or conducting half-space. En: *Progress in Electromagnetic Research*. 1990, vol. 4.
- [8] KING, R. W. P, SANDLER., S. S. The electromagnetic field of a vertical electric dipole over the Earth or sea. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1994, vol.42, no.3, pp. 382-389
- [9] KING, R. W. P., HARRISON, CHARLES W. Electromagnetic ground-wave field of vertical antennas for communication at 1 to 30 MHz. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1998, vol.40, no.4, pp. 337-342
- [10] WAIT, J. R. The ancient and modern history of EM ground-wave propagation. En: *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 1998, vol.40, no.5, pp. 7-24
- [11] MILLINGTON, G. Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. En: *Proceedings of the IEEE – Part III: Radio and Communication Engineering*, 1949, vol. 96, no.39, pp. 53-64
- [12] MILLINGTON, G., ISTED, A. Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. Part 2: Experimental evidence and practical implications. En: *Journal of the Institution of Electrical Engineers*. 1950, no.7, pp. 190-191
- [13] BREMMER, H. On the propagation of radio waves around the Earth. En: *Physica XIV*. 1948, no. 5, pp. 301-318

- [14] BREMMER, H. The extension of Sommerfeld's formula for the propagation of radio waves over a flat earth to different conductivities of the soil. En: *Physica XX*. 1954, pp. 441-460
- [15] KAHAN, T., ECKART, G. On the existence of a surface wave in dipole radiation over a plane earth. En: *Proceedings of the I.R.E.* 1950, pp. 807-812
- [16] JOHN A. RICHARDS. *Radiowave propagation. An introduction for the non specialist*. Australia: Springer. 2008
- [17] MILSOM, J. *Surface wave and sky waves below 2 MHz*. En *Propagation of Radiowaves*. Tercera edición. London: The Institution of Engineering and Technology, 2013, pp. 235-260
- [18] BOURLIER C., KUBICKÉ, G. Ground wave propagation along an inhomogeneous rough surface in the HF band: Millington effect for a flat Earth. En: *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 2011, vol. 49, no. 4, pp. 1374-1382
- [19] ZHOU, L., XI, X., LIU, J., YU, N. LF Ground-Wave Propagation Over Irregular Terrain. En: *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 2011, vol. 59, no. 4, pp. 1254-1260
- [20] MANUEL BARRERO RIPOLL, M<sup>a</sup> LUISA CASADO FUENTE, M<sup>a</sup> ÁNGELES CASTEJÓN SOLANAS y LUIS SEBASTIÁN LORENTE. *Trigonometría esférica. Fundamentos*. Madrid: E.T.S.I en Topografía, Geodesia y Cartografía, 2008.
- [21] Rec. ITU-R P.525-2. *Cálculo de la atenuación en el espacio libre*, ITU, 1994.
- [22] P. ROHAN. *Introduction to Electromagnetic Wave Propagation*. Boston: Artech. 1991.
- [23] YASUHIRO, N., YOSHIO, I., HIROAKI, M. *Comparison of measured and theoretically predicted results of ground-wave propagation characteristics at MF band*. En: *Proceedings of the "2013 International Symposium on Electromagnetic Theory"*. 2013, no. 5, pp. 182-186.
- [24] Rec. ITU-R P.453-13. *The radio refractive index: its formula and refractivity data*, ITU, 2016.
- [25] Rec. ITU-R P.341-6. *Noción de pérdidas de transmisión en los enlaces radioeléctricos*, ITU, 2016.
- [26] Rec. ITU-R P.1321-5. *Factores de propagación que afectan a los sistemas con técnicas de modulación digital en ondas kilométricas y hectométricas*, ITU, 2015.
- [27] R. S. GILL. *Ground-wave propagation program GRWAVE, version 2*. En: *Tech. Rep. MTR 85/45*. Chelmsford. 1985.
- [28] ROTHERAM. S. *Ground-wave propagation. Part 1: Theory for short distances*. En: *IEE Proceedings*. 1981, vol. 128, no. 5, pp. 275-284.

- [29] ROTHERAM. S. *Ground-wave propagation. Part 2: Theory for medium and long distances and reference propagation curves*. En: *IEE Proceedings*. 1981, vol. 128, no. 5, pp. 285-295.
- [30] HOLM, P. D. *Efficient Methods for Computing Wave Propagation Over a Spherical Earth With an Exponential Refraction Index*. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017, vol. 65, no. 4, pp. 1903-1911.
- [31] LI, S., MA, H., WANG, Z. Simplified Accurate New Method for the Calculation of the Ground-Wave in the Exponential Atmosphere. En: *Third International Conference on Information Science and Technology. China, March 23-25, 2013*.
- [32] Rec. ITU-R P.832-4. *Atlas mundial de la conductividad del suelo*, ITU, 2015.
- [33] MAHMOUD, H., AKKARI, Ni. Shortest Path Calculation: A Comparative Study for Location-Based Recommender System. En: *World Symposium on Computer Applications & Research*. 2016
- [34] CREGO GARCÍA, M. (2009). *Calculation of radio electrical coverage in Medium-Wave Frequencies*. Proyecto Final de Carrera. Barcelona: Universitat de Vic (UVic).
- [35] MILTON ABRAMOWITZ, IRENE A. STEGUN. *Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. Washington D.C.: U.S. Government printing office, 1970.
- [36] AMY FARRIS. *read\_kml*. <<https://goo.gl/k6nfTB>> [Consulta: 25 de febrero de 2017]