



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una interfaz gráfica para la estimación de  
intensidad de campo eléctrico por onda de superficie en medios  
heterogéneos*

## Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO:

Juan Villahermosa Becerra

DIRECTORES:

Rubén Nocelo López

CURSO ACADÉMICO:

2025-2026

UniversidadeVigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Desarrollo de una interfaz gráfica para la estimación de  
intensidad de campo eléctrico por onda de superficie en medios  
heterogéneos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

UniversidadeVigo



# RESUMEN

La propagación electromagnética por onda de superficie en las bandas LF, MF y HF constituye un pilar estratégico para el entorno marítimo. En un contexto donde la dependencia de los sistemas satelitales presenta vulnerabilidades, la onda de superficie ofrece una alternativa de respaldo crítica para comunicaciones de tipo BLOS (*Beyond Line of Sight*), garantizando radioenlaces de gran alcance y estabilidad para sistemas de seguridad y defensa esenciales. Entre ellos destacan el sistema NAVTEX (*Navigational Telex*), el Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítimos (GMDSS), el sistema BRASS (*Broadcast and Ship Shore*), su versión mejorada BREITA (*BRASS Enhancements Increment 1 Target Architecture*) y las comunicaciones estratégicas con submarinos desde la Estación Radionaval de Guardamar.

Sin embargo, la estimación precisa de la intensidad de campo eléctrico en trayectos marinos y costeros es compleja debido a la naturaleza no homogénea del terreno. Aunque la Recomendación ITU-R P.368 (International Telecommunication Union) proporciona curvas de referencia, su aplicación manual en trayectos mixtos es ineficiente para el diseño de ingeniería moderno. El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una herramienta de software avanzada mediante MATLAB App Designer que automatice este proceso.

La aplicación permite al usuario extraer perfiles de trayecto reales mediante la integración de Google Earth, identificando con precisión las coordenadas y las distancias de cada tramo. Para el cálculo, la herramienta integra el motor numérico GRWAVE de la ITU, obteniendo datos base sobre terrenos homogéneos que luego son procesados mediante la implementación del Método de Millington. Este algoritmo permite modelar las discontinuidades en la conductividad ( $\sigma$ ) y permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) del suelo, prediciendo con exactitud fenómenos como el *recovery effect* (recuperación de campo) en la transición tierra-mar.

La herramienta final permite definir perfiles heterogéneos, ejecutar simulaciones automatizadas y representar gráficamente las curvas de intensidad de campo resultantes. Con ello, se facilita la planificación de coberturas para dichos servicios, optimizando la fiabilidad de las comunicaciones navales en escenarios de propagación reales y complejos.

## PALABRAS CLAVE

Onda de Superficie, Método de Millington, Propagación Electromagnética, App Designer



# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia por haberme ayudado a ser la mejor persona posible. En especial a mi madre, que ha sido mi mayor ejemplo durante todos estos años, y a mi padre, quien me ha inculcado los valores necesarios para ser la persona que soy hoy en día. También a mi hermano, que ha sido uno de mis mayores apoyos para llegar a donde estoy.

Agradezco haber pertenecido a la promoción 426-156 de la Escuela Naval Militar. Aquí, en la preciosa villa de Marín, he conocido a unos compañeros y amigos que mantendré toda la vida y que considero mi segunda familia. En especial, agradecerles su apoyo a Martín, Claudio, David, Manu, Dani, Miguel, Pablo, Alejandro y Lucas. Con ellos he pasado los mejores cinco años de mi vida.

También quiero expresar mi agradecimiento a todos los profesores y oficiales que han ayudado con mi formación, en especial, a mi comandante de brigada el TN Delgado Franco, cuya ayuda ha sido notable en este Trabajo de Fin de Grado. Sin él y el AN Novo Costas, del CEMEDEM, no hubiera sido posible haber ambientado este trabajo en la parte naval-militar.

Por último, agradecer a mi tutor Rubén Nocelo por todas las veces que me ha ayudado. Ha sido un gran guía durante estos meses y gracias a él se han obtenido tan buenos resultados. Sin sus ideas este trabajo no hubiera sido posible.



## CONTENIDO

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Contenido .....                                                           | 1  |
| Índice de Figuras .....                                                   | 4  |
| Índice de Tablas.....                                                     | 6  |
| 1    Introducción y objetivos.....                                        | 7  |
| 1.1   Contexto y motivación del trabajo .....                             | 7  |
| 1.2   Importancia de la propagación por onda de superficie LF/MF/HF ..... | 9  |
| 1.3   Aplicaciones en el entorno marítimo .....                           | 9  |
| 1.3.1   El Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima (GMDSS).....   | 10 |
| 1.3.2   Resiliencia Estratégica y Defensa: El Sistema BRASS .....         | 11 |
| 1.3.3   Necesidad de la herramienta de cálculo .....                      | 12 |
| 1.4   Planteamiento del problema.....                                     | 12 |
| 1.5   Objetivos del Trabajo Fin de Grado.....                             | 12 |
| 1.5.1   Objetivo general.....                                             | 12 |
| 1.5.2   Objetivos específicos .....                                       | 12 |
| 1.6   Estructura del documento.....                                       | 13 |
| 2    Estado del Arte.....                                                 | 15 |
| 2.1   Fundamentos de la propagación electromagnética .....                | 15 |
| 2.1.1   Ecuaciones de Maxwell y propagación de ondas.....                 | 15 |
| 2.1.2   Tipos de propagación radioeléctrica .....                         | 17 |
| 2.1.3   Características de la onda de superficie .....                    | 19 |
| 2.1.4   Influencia de la frecuencia y del medio de propagación.....       | 20 |
| 2.2   Propagación por onda de superficie en bandas LF, MF y HF.....       | 22 |
| 2.2.1   Comportamiento de la onda de superficie a baja frecuencia .....   | 22 |
| 2.2.2   Propiedades eléctricas del terreno .....                          | 23 |
| 2.2.3   Clasificación de terrenos según ITU-R.....                        | 24 |
| 2.2.4   Atenuación y pérdidas de propagación .....                        | 25 |
| 2.3   Curvas de intensidad de campo de la ITU-R .....                     | 28 |
| 2.3.1   Recomendaciones ITU-R relevantes.....                             | 28 |
| 2.3.2   Descripción de las curvas de intensidad de campo .....            | 29 |
| 2.3.3   Parámetros de entrada y condiciones de validez.....               | 30 |
| 2.3.4   Limitaciones de las curvas ITU-R en terrenos no homogéneos.....   | 30 |
| 2.4   Propagación sobre terrenos no homogéneos .....                      | 31 |
| 2.4.1   Problemática de la heterogeneidad del terreno .....               | 31 |

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2 | Métodos de aproximación existentes .....                               | 32 |
| 2.4.3 | Método de Millington .....                                             | 33 |
| 3     | Desarrollo del TFG .....                                               | 37 |
| 3.1   | Metodología de cálculo del campo eléctrico.....                        | 37 |
| 3.1.1 | Definición del escenario de propagación .....                          | 37 |
| 3.1.2 | Segmentación del trayecto en secciones homogéneas .....                | 38 |
| 3.1.3 | Aplicación de las curvas ITU-R a cada sección.....                     | 38 |
| 3.1.4 | Implementación del método de Millington.....                           | 39 |
| 3.1.5 | Obtención del campo eléctrico total.....                               | 39 |
| 3.1.6 | Consideraciones numéricas y supuestos adoptados .....                  | 40 |
| 3.2   | Desarrollo de la herramienta en MATLAB .....                           | 41 |
| 3.2.1 | Requisitos funcionales de la herramienta.....                          | 41 |
| 3.2.2 | Arquitectura general del software .....                                | 43 |
| 3.2.3 | Descripción de los módulos de cálculo.....                             | 44 |
| 3.2.4 | Implementación de las curvas ITU-R en MATLAB.....                      | 51 |
| 3.2.5 | Interfaz de usuario y visualización de resultados.....                 | 52 |
| 3.2.6 | Validación básica del código .....                                     | 55 |
| 4     | Resultados y Análisis .....                                            | 64 |
| 4.1   | Escenarios Operativos.....                                             | 64 |
| 4.1.1 | Enlace F-100 .....                                                     | 65 |
| 4.1.2 | Enlace S-80 .....                                                      | 70 |
| 4.2   | Limitaciones del modelo .....                                          | 78 |
| 4.2.1 | Simplificación del terreno en tramos homogéneos .....                  | 78 |
| 4.2.2 | Condiciones ideales del modelo de propagación .....                    | 78 |
| 4.2.3 | Incertidumbre en los parámetros eléctricos del terreno .....           | 78 |
| 4.2.4 | Incertidumbre en la caracterización topográfica del terreno.....       | 79 |
| 4.2.5 | Rango de validez del modelo .....                                      | 79 |
| 5     | Conclusiones y líneas futuras.....                                     | 80 |
| 5.1   | Conclusiones .....                                                     | 80 |
| 5.2   | Grado de cumplimiento de los objetivos.....                            | 81 |
| 5.3   | Líneas de mejora y trabajos futuros .....                              | 82 |
| 6     | Bibliografía .....                                                     | 83 |
|       | Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales ..... | 86 |
|       | Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....                          | 87 |
|       | Anexo III: Curvas ITU-R utilizadas .....                               | 88 |

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo IV: Código fuente de los módulos del software de simulación .....                      | 90  |
| Anexo V: Declaración sobre el uso de herramientas de Inteligencia Artificial generativa..... | 104 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1-1. Áreas del GMDSS [12].....                                                               | 11  |
| Figura 2-1. Propagación por onda directa [21].....                                                  | 17  |
| Figura 2-2. Propagación por onda ionosférica [9].....                                               | 18  |
| Figura 2-3. Propagación por onda de superficie [21].....                                            | 19  |
| Figura 2-4. Ejemplo de curvas ITU-R P.368 [4].....                                                  | 29  |
| Figura 3-1. Arquitectura general del software (IA).....                                             | 43  |
| Figura 3-2. Ejemplo de un archivo ex.inp. ....                                                      | 44  |
| Figura 3-3. Diagrama de flujo del módulo simulacion_millington.....                                 | 48  |
| Figura 3-4. Ejemplo de archivo KML. ....                                                            | 48  |
| Figura 3-5. Ejemplo de un archivo resultado.out. ....                                               | 52  |
| Figura 3-6. Interfaz desarrollada en la aplicación MATLAB App Designer. ....                        | 55  |
| Figura 3-7. Curvas sobre agua de mar según ITU-R P.368 [4].....                                     | 56  |
| Figura 3-8. Simulación sobre agua de mar (10 MHz, 900 km).....                                      | 56  |
| Figura 3-9. Simulación sobre agua de mar (100 kHz, 4000 km). ....                                   | 57  |
| Figura 3-10. Curvas sobre tierra seca según ITU-R P.368 [4]. ....                                   | 58  |
| Figura 3-11. Simulación sobre tierra seca (10 MHz, 200 km). ....                                    | 58  |
| Figura 3-12. Simulación sobre tierra seca (100 kHz, 1700 km).....                                   | 59  |
| Figura 3-13. Trayecto para el estudio de la transición entre diferentes tipos de terreno [37]. .... | 60  |
| Figura 3-14. Representación gráfica del método de Millington Figura 12 ITU-R P.368 [4].....         | 61  |
| Figura 3-15. Simulación para el trayecto analizado en el sentido mar-tierra (1 MHz). ....           | 62  |
| Figura 3-16. Representación gráfica del método de Millington Figura 13 ITU-R P.368 [4].....         | 62  |
| Figura 3-17. Simulación para el trayecto analizado en el sentido tierra-mar (1 MHz). ....           | 63  |
| Figura 4-1. Escenario del enlace entre la estación de Santorcaz/Bermeja y la F-100 [37]. ....       | 65  |
| Figura 4-2. Simulación para el trayecto Santorcaz - F-100 (4 MHz).....                              | 67  |
| Figura 4-3. Simulación para el trayecto F-100 – Bermeja (4.5 MHz). ....                             | 69  |
| Figura 4-4. Escenario del enlace entre la estación de Guardamar del Segura y el S-80 [37].....      | 71  |
| Figura 4-5. Simulación para el trayecto Guardamar del Segura – S-80 (150 kHz).....                  | 73  |
| Figura 4-6. Simulación para el trayecto Guardamar del Segura – S-80 (30 kHz).....                   | 74  |
| Figura 4-7. Antena OTAN Noviken-Gildeskal [37]. ....                                                | 75  |
| Figura 4-8. Simulación para el trayecto S-80 – Guardamar del Segura (4.5 MHz). ....                 | 77  |
| Figura A3-1. Curvas sobre agua de mar según ITU-R P.368 [4].....                                    | 88  |
| Figura A3-2. Curvas sobre tierra húmeda según ITU-R P.368 [4]. ....                                 | 88  |
| Figura A3-3. Curvas sobre tierra seca según ITU-R P.368 [4]. ....                                   | 89  |
| Figura A4-1. Oficial de la Armada Interfaz Inicial (IA). ....                                       | 104 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A4-2. Oficial de la Armada Interfaz Final (IA). .....       | 104 |
| Figura A4-3. Foto usada como fondo del resumen gráfico (IA). ..... | 105 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2-1. Valores típicos de conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) .....               | 23 |
| Tabla 2-2. Valores típicos de permitividad eléctrica ( $\epsilon_r$ ) .....            | 24 |
| Tabla 3-1. Valores conductividad y permitividad relativa según ITU-R P.832 [26]. ....  | 38 |
| Tabla 4-1. Parámetros empleados en el enlace Santorcaz - F-100 (fuente: CEMEDEM). .... | 66 |
| Tabla 4-2. Parámetros empleados en el enlace F-100 - Bermeja (fuente: CEMEDEM). ....   | 68 |
| Tabla 4-3. Parámetros empleados en el enlace Guardamar – S-80 (fuente: CEMEDEM). ....  | 71 |
| Tabla 4-4. Parámetros empleados en el enlace S-80 – Guardamar (fuente: CEMEDEM). ....  | 76 |

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Contexto y motivación del trabajo

Las comunicaciones constituyen en la actualidad uno de los pilares fundamentales de nuestra sociedad. El intercambio de información resulta esencial para el desarrollo de la humanidad y para el funcionamiento de las infraestructuras sobre las que se apoya. Desde el punto de vista del medio físico, dicho intercambio se sustenta en distintas tecnologías, que pueden clasificarse en función del medio de transmisión empleado, distinguiéndose fundamentalmente entre comunicaciones cableadas y comunicaciones inalámbricas.

En el contexto actual, la mayor parte del tráfico de información a escala global se soporta sobre redes cableadas, fundamentalmente mediante infraestructuras de fibra óptica de gran extensión. Sin embargo, este tipo de redes presenta una vulnerabilidad inherente asociada a su carácter físico, lo que las hace susceptibles a fallos, daños accidentales o acciones intencionadas. Un ejemplo reciente de esta fragilidad lo constituyen los incidentes registrados en cables submarinos de telecomunicaciones registrados en regiones como el Mar Rojo, que han provocado interrupciones significativas del tráfico de datos internacionales [1].

Gran parte de estas infraestructuras se encuentra desplegada en el fondo marino y, en numerosos casos, en aguas internacionales, lo que dificulta su protección y supervisión continua. A pesar de los esfuerzos realizados por los organismos responsables de la seguridad de infraestructuras críticas, resulta inviable garantizar una monitorización completa y permanente de redes de tal extensión.

Frente a las limitaciones inherentes a las infraestructuras cableadas, las comunicaciones inalámbricas por satélite han permitido alcanzar una cobertura prácticamente global, posibilitando la conectividad en entornos remotos y de difícil acceso, como regiones polares u oceánicas. En la actualidad, tanto sistemas satelitales de carácter gubernamental como constelaciones comerciales de nueva generación, entre las que destacan redes de órbita baja como Starlink, proporcionan servicios de comunicaciones en amplias zonas del planeta donde otras infraestructuras resultan inviables [2].

No obstante, este tipo de comunicaciones presenta una fuerte dependencia de infraestructuras espaciales y terrestres específicas, lo que las hace susceptibles a interferencias, fallos técnicos o determinadas limitaciones operativas. Estas características ponen de manifiesto que, pese a sus indudables ventajas, las comunicaciones por satélite no constituyen una solución completamente autónoma ni exenta de vulnerabilidades [3].

Como complemento a las comunicaciones por satélite, las comunicaciones radioeléctricas terrestres continúan desempeñando un papel esencial en el intercambio de información. Este tipo de

comunicaciones, basadas en la transmisión mediante ondas electromagnéticas a través del espacio, se apoyan en infraestructuras situadas en territorio propio o en áreas de fácil control, lo que les confiere un mayor grado de autonomía y una mayor capacidad de protección frente a fallos o acciones externas.

Si bien su cobertura y capacidad no alcanzan, en general, los niveles proporcionados por los sistemas satélites, las comunicaciones radioeléctricas ofrecen una elevada robustez y fiabilidad, así como un alcance significativo en función de bandas y mecanismos de propagación empleados. Por estas razones, no constituyen un sustituto del satélite, sino un complemento fundamental, permitiendo mantener la continuidad de las comunicaciones en escenarios en los que otros sistemas puedan verse degradados o no disponibles.

En este contexto, existe una necesidad real de evaluar el comportamiento de los enlaces radioeléctricos en escenarios complejos y realistas, donde las condiciones de propagación influyen de forma determinante en la calidad de la comunicación. Las aproximaciones simplificadas, basadas en modelos ideales u homogéneos del medio, resultan a menudo insuficientes para describir con precisión el comportamiento del campo electromagnético en situaciones reales.

En particular, la dependencia del enlace radioeléctrico con el medio de propagación y la presencia de terrenos o superficies heterogéneas introducen una complejidad adicional que dificulta la estimación de la intensidad de campo recibida. Esta circunstancia pone de manifiesto la necesidad de desarrollar herramientas que permiten analizar y evaluar de forma eficaz la viabilidad y el rendimiento de los enlaces radioeléctricos, sirviendo como apoyo a la planificación y al estudio de este tipo de comunicación [4].

En el ámbito naval y militar, y en particular para la Armada, las comunicaciones radioeléctricas mantienen una importancia estratégica fundamental. Esta relevancia queda reflejada en la modernización de la Estación Radionaval de Guardamar del Segura que opera en la banda de LF (30-300 kHz) con la instalación de transmisores de estado sólido, la revisión de la unidad de sintonía y la evolución del Centro de Comunicaciones de Submarinos [5]. En esta misma banda y en la de MF, se encuadran también servicios vitales para la seguridad en la mar como el sistema NAVTEX (Navigational Text Messages), esencial para la difusión automatizada de avisos náuticos y meteorológicos, integrándose este sistema dentro de la arquitectura global del Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítimos (GMDSS), el cual garantiza la coordinación de emergencias a nivel internacional.

Asimismo, destaca la significativa inversión realizada tanto por la OTAN como por el ministerio de Defensa en el sistema BRASS (*Broadcast and Ship-Shore System*), destinado a la modernización y sostenimiento de las capacidades de comunicaciones radioeléctricas empleadas por los buques de la Armada en la banda de HF (3-30 MHz) [6]. La doctrina operativa vigente insiste en la necesidad de preservar y emplear de forma continuada este tipo de capacidades como elemento clave para garantizar la continuidad y resiliencia de las comunicaciones [5]. Con el objetivo de incrementar las capacidades del sistema BRASS, la OTAN ha definido una serie de mejoras en su arquitectura técnica, agrupadas bajo la denominación BRE1TA (*BRASS Enhancements Increment 1 Target Architecture*). Entre las capacidades incorporadas en BRE1TA destacan diversas mejoras orientadas a la integración de servicios basados en IP sobre HF, el incremento de la eficiencia espectral y la optimización de los mecanismos de establecimiento y gestión de enlace [7].

Por último, el presente Trabajo Fin de Grado responde también a una motivación de carácter formativo y académico, orientada a afianzar e integrar los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación recibida en la Escuela Naval Militar, en el marco del Centro Universitario de la Defensa. El desarrollo de este trabajo permite aplicar de forma práctica conceptos fundamentales relacionados con el análisis de sistemas físicos, la modelización de fenómenos complejos y la interpretación de resultados, así como reforzar capacidades propias de la ingeniería tales como el razonamiento crítico, la resolución de problemas técnicos y la evaluación del comportamiento de sistemas en escenarios realistas.

## 1.2 Importancia de la propagación por onda de superficie LF/MF/HF

Las bandas LF (30-300 kHz), MF (300 kHz-3MHz) y HF (3-30 MHz) abarcan rangos específicos de frecuencia del espectro radioeléctrico, dando lugar a mecanismos de propagación distintos de los predominantes a frecuencias más elevadas. En este intervalo de frecuencias coexisten diversos modos de propagación radioeléctrica, entre los que destacan la propagación por onda de superficie y la propagación ionosférica, cuya contribución relativa depende de la frecuencia, de las condiciones del medio y de la distancia del enlace. La propagación ionosférica resulta predominante en el rango HF, especialmente para frecuencias comprendidas aproximadamente entre 3 y 30 MHz, permitiendo alcanzar grandes distancias mediante la interacción de las ondas electromagnéticas con las capas ionizadas de la atmósfera [8]. Por su parte, la onda de superficie adquiere mayor relevancia a frecuencias inferiores, siendo el mecanismo dominante en las bandas LF y MF, donde la onda se propaga guiada por la interfaz tierra-aire, permitiendo la transmisión de señales más allá del horizonte geométrico, sin requerir visión directa entre transmisor y receptor [4]. Este comportamiento posibilita alcances del orden de cientos o incluso miles de kilómetros, con un grado elevado de estabilidad en comparación con otros modos de propagación.

En las bandas de frecuencia más elevadas, a partir aproximadamente de VHF (frecuencias superiores a 30 MHz), el mecanismo dominante de propagación es la onda espacial en línea de vista, cuyo alcance queda limitado, en condiciones normales de operación, a la distancia de la visión óptica entre el transmisor y el receptor. A medida que aumenta la frecuencia y disminuye la longitud de onda asociada, la propagación radioeléctrica presenta una mayor dependencia de la geometría del enlace y de la presencia de obstáculos, lo que se traduce, en términos generales, en una reducción del alcance efectivo cuando no concurren mecanismos adicionales de propagación. Por el contrario, en las bandas LF, MF y HF, caracterizada por longitudes de onda significativamente mayores, las ondas electromagnéticas se ven menos afectadas por los obstáculos del entorno y pueden interactuar de forma más eficiente con el medio, favoreciendo mecanismos de propagación no limitados por la visión directa y permitiendo la transmisión de señales a mayores distancias [8].

En la onda de superficie, considerando que las antenas se encuentran electromagnéticamente próximas al terreno, la interacción entre el campo radiado y el suelo adquiere un papel determinante, dejando de ser apropiado analizar la propagación mediante trayectorias independientes. En este régimen, el terreno forma parte del propio mecanismo de propagación, influyendo en el comportamiento efectivo de la antena y, en consecuencia, en la atenuación y en la intensidad del campo recibido. Esta dependencia del medio se traduce en resultados significativamente distintos en función de las propiedades eléctricas de la superficie terrestre. La Recomendación ITU-R P.368 recoge esta influencia mediante modelos de predicción que tienen en cuenta parámetros como la conductividad y la permitividad del terreno, diferenciando el comportamiento de la onda de superficie según el tipo de medio atravesado [9] [4].

En escenarios reales, la propagación por onda de superficie se desarrolla a lo largo de trayectos heterogéneos, lo que introduce una complejidad adicional en la estimación del campo recibido. Para llevar a cabo una predicción adecuada de dicho campo, resulta necesario considerar las propiedades eléctricas de los distintos tipos de suelo que conforman el trayecto de propagación, así como las variaciones de atenuación y las posibles discontinuidades en el comportamiento del enlace asociadas a los cambios de medios [8]. En este contexto, se pone de manifiesto la necesidad de disponer de métodos capaces de evaluar enlaces radioeléctricos en condiciones reales y analizar su viabilidad, especialmente en las bandas de frecuencia LF, MF y HF.

## 1.3 Aplicaciones en el entorno marítimo

El entorno marítimo constituye un escenario exigente para las comunicaciones, debido a las grandes distancias involucradas, la ausencia de infraestructuras físicas intermedias y la necesidad de disponer de enlaces fiables y continuos en condiciones operativas muy variables. En este contexto, la propagación

por onda de superficie adquiere una relevancia particular en las bandas de frecuencia LF, MF y HF, al permitir el establecimiento de comunicaciones más allá de la línea de vista directa y con un elevado grado de estabilidad. Estas características se ven favorecidas por las propiedades eléctricas del medio marítimo, ya que el agua de mar presenta una conductividad eléctrica significativamente superior a la de la mayoría de los terrenos continentales, lo que reduce la atenuación de la onda de superficie y facilita su propagación a mayores distancias [8]. Por estas razones, la onda de superficie desempeña un papel fundamental en numerosas aplicaciones marítimas, constituyendo la base física sobre la que se apoyan distintos sistemas de interés tanto civil como militar.

### *1.3.1 El Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima (GMDSS)*

La onda de superficie es la base física del Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima GMDSS (Global Maritime Distress Safety System), que integra procedimientos operativos, equipos radioeléctricos y protocolos de comunicación destinados a garantizar la seguridad de la vida humana en el mar. Su objetivo principal es facilitar la transmisión rápida y fiable de alertas de socorro, así como la difusión de información de seguridad marítima y la coordinación de las operaciones de búsqueda y rescate [10].

Este sistema se encuentra regulado por el Convenio SOLAS (Convenio Internacional para la seguridad de la vida humana en el mar), aprobado por la Organización Marítima Internacional, organismo especializado de las Naciones Unidas. El GMDSS está plenamente operativo desde 1999 y permite a las embarcaciones en situación de peligro transmitir alertas mediante distintos sistemas de radiocomunicaciones, tanto terrestres como satelitales, en función de la zona de navegación [10].

En el marco del Convenio SOLAS, el GMDSS estructura las comunicaciones marítimas en función de la zona de navegación, definiendo distintos niveles de cobertura y requisitos técnicos según la disponibilidad de los sistemas de radiocomunicación. Para ello, se establecen cuatro áreas operativas, denominadas zonas A1, A2, A3 y A4, que determinan los medios de comunicación obligatorios a bordo en función del alcance de las estaciones costeras y de la cobertura satelital disponible [11].

A continuación, se describen las cuatro áreas operativas y sus respectivos medios de comunicación [11]:

- Área A1: Comprende aquellas áreas cubiertas por estaciones costeras de radiocomunicaciones VHF, donde las comunicaciones de socorro y seguridad se realizan fundamentalmente mediante este sistema de corto alcance.
- Área A2: Abarca las áreas situadas fuera de la zona A1, pero cubiertas por estaciones costeras que operan en MF. En esta zona adquiere especial relevancia el sistema NAVTEX, destinado a la difusión automática de avisos a los navegantes y de información de seguridad marítima en la banda MF.
- Área A3: Incluye las áreas marítimas situadas fuera de las zonas A1 y A2, pero cubiertas por sistemas de comunicaciones por satélites reconocidos por el GMDSS, complementados con equipos de radiocomunicación en HF como medio alternativo.
- Área A4: Corresponde a las regiones marítimas fuera de la cobertura satelital, principalmente las zonas polares, donde las comunicaciones de socorro y seguridad dependen fundamentalmente de sistemas de radiocomunicación en HF.

En la Figura 1-1 se muestran las distintas áreas del GMDSS y los distintos sistemas de comunicación utilizados en situaciones de emergencia:

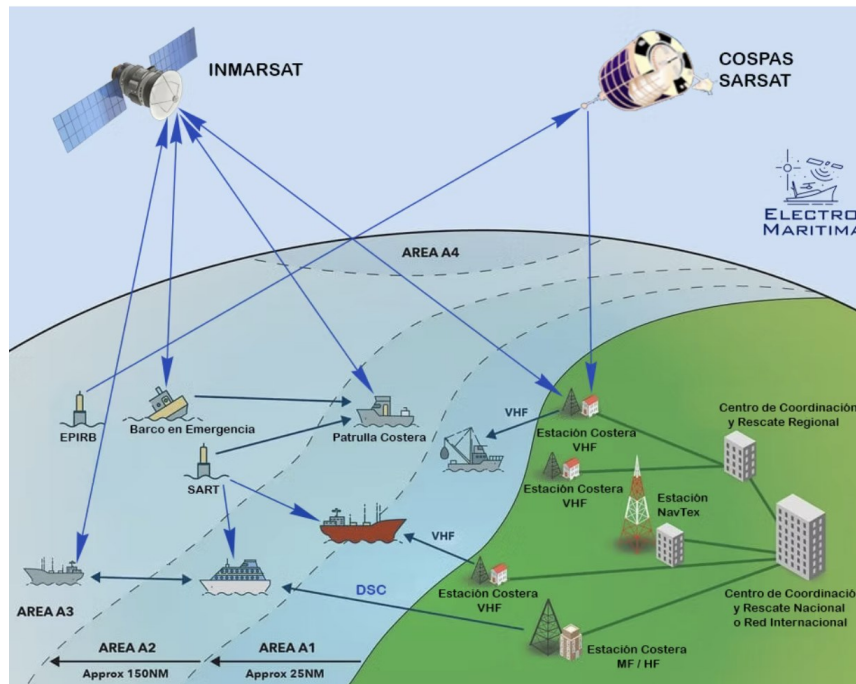


Figura 1-1. Áreas del GMDSS [12].

Esta clasificación en zonas permite al GMDSS establecer una arquitectura de comunicaciones escalonada y redundante, adaptada a las distintas áreas de navegación y basada en la complementariedad entre sistemas VHF, MF, HF y satelitales, con el objetivo último de garantizar la seguridad de la vida humana en el mar.

### 1.3.2 Resiliencia Estratégica y Defensa: El Sistema BRASS

La Armada es plenamente consciente de la importancia crítica de las comunicaciones para el mando y control de la fuerza naval. En la actualidad, estas capacidades se apoyan de forma prioritaria en sistemas satelitales, destacando los satélites SPAINSAT y SPAINSAT NG I, destinados a proporcionar enlaces seguros a las unidades desplegadas. Sin embargo, la experiencia reciente ha puesto de manifiesto las limitaciones inherentes a este tipo de sistemas. En particular, no ha sido posible la entrada en servicio operativo del satélite SPAINSAT NG II tras un impacto con una partícula espacial, lo que ha obligado a plantear soluciones alternativas para mantener la capacidad prevista [13]. Este hecho constituye un ejemplo significativo de la vulnerabilidad de las comunicaciones satelitales, que pueden verse afectadas por fallos técnicos o indisponibilidades imprevistas. En este contexto, y tal como se recoge en la *Revista Española de Defensa*, durante despliegues navales prolongados pueden producirse periodos puntuales de pérdida del servicio satelital, lo que refuerza la necesidad de disponer de sistemas de comunicaciones alternativos que garanticen la continuidad operativa [14].

Como respuesta a esta necesidad de redundancia y autonomía, la Armada mantiene sistemas específicos de comunicaciones radioeléctricas que actúan como respaldo frente a la indisponibilidad del satélite. Entre ellos destaca el Broadcast and Ship-Shore System (BRASS), concebido para el intercambio de mensajería formal entre los mandos en tierra y las unidades de la flota mediante enlaces en las bandas LF, MF y HF. Este sistema, plenamente operativo y alineado con los requisitos de interoperabilidad de la OTAN, permite sostener las comunicaciones buque-tierra y tierra-buque sin depender de infraestructuras espaciales [15]. La vigencia del BRASS y su evolución tecnológica ponen de manifiesto que las comunicaciones radioeléctricas continúan siendo un elemento esencial en la doctrina de la Armada, especialmente como sistema de respaldo en escenarios degradados o ante fallos de los enlaces satelitales.

### 1.3.3 Necesidad de la herramienta de cálculo

Dado que sistemas como el NAVTEX (GMDSS) y el BRASS operan en la interfaz entre la tierra y el mar, la precisión en la estimación del campo eléctrico es vital. Las variaciones de conductividad en la línea de costa y la transición entre diferentes medios pueden degradar la señal de forma impredecible. La herramienta desarrollada en este proyecto, mediante el uso de MATLAB App Designer, GRWAVE y el método de Millington, permite modelar con precisión estos trayectos heterogéneos, asegurando que la planificación de coberturas para estos sistemas críticos sea fiable ante cualquier escenario de fallo satelital.

## 1.4 Planteamiento del problema

El cálculo del campo eléctrico recibido por una antena en un enlace radioeléctrico constituye un problema de elevada complejidad, ya que depende de numerosos factores, como la frecuencia de operación, la geometría del enlace y las propiedades eléctricas del medio de propagación. Esta complejidad se incrementa de forma significativa cuando el trayecto de propagación se desarrolla sobre medios heterogéneos, en los que las características del terreno varían a lo largo del enlace, lo que dificulta la obtención de soluciones analíticas directas y hace necesario recurrir a métodos de cálculo numérico.

Con el objetivo de abordar esta problemática, en el presente Trabajo Fin de Grado se desarrolla una interfaz gráfica en MATLAB, utilizando el entorno App Designer, que permite la estimación del campo eléctrico recibido en función de la distancia, la frecuencia y las características del terreno. Como núcleo de cálculo se emplea el programa GRWAVE, una herramienta clásica de propagación por onda de superficie desarrollada para la implementación de los modelos descritos en la Recomendación ITU-R P.368 [4]. Dicho programa, concebido originalmente para entornos de ejecución tipo MS-DOS y escrito en el lenguaje de cálculo científico FORTRAN, permite obtener las curvas de intensidad de campo eléctrico para trayectos de propagación homogéneos.

A partir de los resultados proporcionados por GRWAVE, se implementa el método de Millington, que posibilita la estimación del campo eléctrico en escenarios reales con trayectos de propagación heterogéneos, combinando la contribución de distintos tipos de terreno a lo largo del enlace. De este modo, la herramienta desarrollada facilita el análisis de la viabilidad de enlaces radioeléctricos por onda de superficie, proporcionando una aproximación práctica y sistemática al comportamiento del campo eléctrico en condiciones operativas reales.

## 1.5 Objetivos del Trabajo Fin de Grado

### 1.5.1 Objetivo general

El objetivo general de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar una herramienta software para la estimación del campo eléctrico asociado a la propagación por onda de superficie en medios heterogéneos, basada en las curvas de propagación de la Recomendación ITU-R P.368 [4] y en la aplicación del método de Millington, orientada al análisis de enlaces radioeléctricos en entornos marítimos dentro de las bandas de frecuencia LF, MF y HF.

### 1.5.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general planteado, se definen los siguientes objetivos específicos:

- **Fundamentación Técnica:** Analizar los principios físicos de la propagación por onda de superficie en las bandas de frecuencia LF, MF y HF y el impacto de los parámetros electromagnéticos del suelo ( $\sigma$  y  $\epsilon_r$ ) en la estabilidad de los enlaces radioeléctricos.
- **Integración de motores de Cálculo:** Automatizar el uso del software GRWAVE, desarrollando una interfaz en MATLAB App Designer que permita la ejecución sistemática de este motor en FORTRAN y la captura eficiente de sus datos de salida.

- **Modelado de Heterogeneidad:** Formular e implementar el Algoritmo de Millington para procesar trayectos mixtos, permitiendo el cálculo preciso de la intensidad de campo en escenarios con múltiples transiciones de terreno (ej. tierra-mar-tierra).
- **Geolocalización y Perfiles de Terreno:** Integrar una funcionalidad de obtención de perfiles de trayecto basada en Google Earth, facilitando al usuario la definición de escenarios reales mediante coordenadas geográficas.
- **Visualización y Análisis Comparativo:** Desarrollar un entorno gráfico que represente las curvas de intensidad de campo, permitiendo comparar visualmente el comportamiento de la onda en medios homogéneos frente a heterogéneos y observar fenómenos como el *recovery effect*.
- **Aplicación a Sistemas Críticos:** Evaluar la herramienta mediante casos de estudio centrados en sistemas de seguridad y defensa, tales como NAVTEX, GMDSS y el sistema BRASS/BREITA, optimizando la planificación de sus coberturas.
- **Modernización Metodológica y Educativa:** Sustituir los métodos manuales de consulta de gráficas de la ITU-R, poco eficientes en ingeniería moderna, por una solución informática integrada que sirva tanto para el ámbito educativo como para el profesional naval, facilitando además la comprensión de los fenómenos de propagación mediante una interfaz gráfica interactiva.
- **Simulación de Enlaces Operativos:** Evaluar la herramienta mediante casos de estudio centrados en sistemas de seguridad y defensa, tales como la comunicación con submarinos durante su tránsito por el Estrecho de Gibraltar a partir de la Estación Radionaval de Guardamar, así como la comunicación entre fragatas y estaciones transmisoras/receptoras en tierra. Todo ello con el fin de optimizar la planificación de coberturas radioeléctricas y analizar la viabilidad de los enlaces en distintos escenarios operativos.

## 1.6 Estructura del documento

El presente Trabajo Fin de Grado se organiza en varios capítulos que permiten abordar de forma progresiva el estudio de la propagación por onda de superficie en medios heterogéneos y el desarrollo de la herramienta propuesta. La estructura de desarrollo del documento se resume en los siguientes puntos:

- **Capítulo 1. Introducción y objetivos:** se presenta la introducción al trabajo, contextualizando la problemática objeto de estudio, justificando su relevancia en el ámbito de las comunicaciones radioeléctricas y definiendo tanto el objetivo general como los objetivos específicos que se pretenden alcanzar.
- **Capítulo 2. Estado del arte:** recoge el estado del arte y los fundamentos teóricos necesarios para comprender el fenómeno de la propagación por onda de superficie. En primer lugar, se revisan los principios básicos de la propagación electromagnética y los distintos modos de propagación radioeléctrica. A continuación, se profundiza en las características de la onda de superficie en las bandas LF, MF y HF, analizando la influencia de la frecuencia y de las propiedades eléctricas del terreno. Asimismo, se describen las curvas por la ITU-R, sus condiciones de validez y sus limitaciones cuando el trayecto de propagación no es homogéneo. Finalmente, se estudian los métodos existentes para el tratamiento de medios heterogéneos, prestando especial atención al método de Millington.

- **Capítulo 3. Desarrollo del TFG:** integra la metodología de cálculo y el desarrollo de la herramienta software. En primer lugar, se define el escenario de propagación y el procedimiento de segmentación del trayecto en secciones homogéneas. A continuación, se detalla la aplicación de las curvas ITU-R y del método de Millington para la obtención del campo eléctrico total, incluyendo los supuestos adoptados y las consideraciones numéricas empleadas. Posteriormente, se describe la arquitectura de la herramienta implementada en MATLAB, la integración del programa GRWAVE como motor de cálculo y el diseño de la interfaz gráfica desarrollada mediante App Designer.
- **Capítulo 4. Resultados y análisis:** se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de distintos escenarios de simulación. En particular, se estudian enlaces operativos entre estaciones radio navales terrestres y unidades de la Armada, concretamente fragatas de la clase F-100 y submarinos de la clase S-80.
- **Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras:** recoge las conclusiones principales del trabajo, evaluando el grado de cumplimiento de los objetivos planteados. Además, se proponen posibles líneas de mejora y trabajos futuros que permitan ampliar o perfeccionar la herramienta desarrollada.
- **Capítulo 6. Bibliografía:** recoge las fuentes utilizadas en el desarrollo del trabajo.
- **Anexos I-V:** recogen las implicaciones sociales, económicas y ambientales del trabajo; las reflexiones éticas y sociales del mismo; las curvas de propagación de la ITU-R; el código fuente de los módulos del software de simulación; y la utilización de la Inteligencia Artificial.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Fundamentos de la propagación electromagnética

#### 2.1.1 Ecuaciones de Maxwell y propagación de ondas

Las ecuaciones de Maxwell constituyen el fundamento teórico del electromagnetismo clásico y la base física de la propagación de ondas electromagnéticas. Estas relaciones describen la dinámica de los campos eléctricos y magnéticos generados por cargas eléctricas y corrientes, permitiendo predecir su distribución espacial y su evolución temporal. En el ámbito científico, se consideran el marco axiomático esencial para el análisis tanto de campos estáticos como de fenómenos electromagnéticos variables en el tiempo [16].

En su forma diferencial, el conjunto se compone de cuatro ecuaciones fundamentales [17]:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico (2-1)

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2-1)$$

donde  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico (V/m),  $\rho$  es la densidad volumétrica de carga eléctrica (C/m<sup>3</sup>),  $\epsilon$  es la permitividad eléctrica del medio (F/m) y  $\nabla$  es el operador nabla que permite describir la variación de un campo en el espacio. Esta ecuación establece que las cargas eléctricas actúan como fuentes del campo eléctrico.

- Ley de Gauss para el campo magnético (2-2)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2-2)$$

donde  $\mathbf{B}$  es la densidad de flujo magnético (T). Esta expresión indica que no existen monopolos magnéticos aislados y que las líneas de campo magnético siempre se cierran sobre sí mismas.

- Ley de Faraday de la inducción electromagnética (2-3)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2-3)$$

donde  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  representa la variación temporal del campo magnético. Esta ley describe cómo un campo magnético variable genera un campo eléctrico inducido.

- Ley de Ampère-Maxwell (2-4)

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2-4)$$

donde  $\mathbf{H}$  es el campo magnético (A/m),  $J$  es la densidad de corriente eléctrica (A/m<sup>2</sup>) y  $D$  es el desplazamiento eléctrico (C/m<sup>2</sup>). El término  $\frac{\partial D}{\partial t}$ , conocido como corriente de desplazamiento, fue introducido por Maxwell y resulta esencial para garantizar la constancia de la teoría con el principio de conservación de la carga.

Estas ecuaciones se complementan mediante las relaciones constitutivas del medio, que en un material lineal, homogéneo e isótropo se expresan con las expresiones (2-5) y (2-6) [16]:

$$D = \epsilon E \quad (2-5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2-6)$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética del medio (H/m).

Para comprender la propagación electromagnética es necesario analizar el comportamiento de los campos en una región libre de cargas y corrientes, es decir, donde  $\rho = 0$  y  $J = 0$ . En estas condiciones, al aplicar el operador rotacional a la Ley de Faraday y sustituir la Ley de Ampère-Maxwell, se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden que adopta la forma (2-7) [16]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2-7)$$

y de forma análoga para el campo magnético (2-8):

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2-8)$$

donde  $\nabla^2$  es el operador laplaciano espacial. Estas expresiones constituyen la ecuación de onda electromagnética y demuestran que tanto el campo eléctrico como el magnético pueden propagarse como perturbaciones que se desplazan por el espacio sin necesidad de un soporte material.

A partir de la ecuación de onda se deduce que la velocidad de propagación viene dada por (2-9) [16]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (2-9)$$

En el vacío, donde  $\epsilon = \epsilon_0$  y  $\mu = \mu_0$ , esta velocidad coincide con la velocidad de la luz (2-10) [17]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2-10)$$

En medios materiales, la permitividad  $\epsilon$  y la permeabilidad  $\mu$  modifican dicha velocidad, lo que se expresa mediante el índice de refracción del medio. Además, en materiales conductores aparece la conductividad eléctrica  $\sigma$ , que introduce pérdidas por efecto Joule y provoca la atenuación progresiva de la onda conforme se propaga [16].

Este aspecto resulta especialmente relevante en el estudio de la propagación radioeléctrica, donde las características del entorno (como la permitividad y la conductividad del terreno o del agua de mar) influyen directamente en el alcance y la intensidad del campo recibido [16].

Las ondas radioeléctricas constituyen una manifestación particular de las soluciones ondulatorias de las ecuaciones de Maxwell dentro del rango de frecuencias utilizado en telecomunicaciones. La interacción de estas ondas con la atmósfera, la ionosfera y la superficie terrestre da lugar a distintos

mecanismos de propagación, cuya naturaleza depende tanto de la frecuencia como de las propiedades eléctricas del medio [18]. Entre estos mecanismos se encuentra la propagación por onda de superficie, que será objeto de análisis en los apartados siguientes.

### 2.1.2 Tipos de propagación radioeléctrica

Una vez establecida la naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos, es necesario analizar cómo se propagan en entornos reales. En aplicaciones radioeléctricas, la propagación tiene lugar en medios no homogéneos, donde la atmósfera, la ionosfera y la superficie terrestre influyen en la trayectoria y en la atenuación de la señal.

En función de la frecuencia y de la interacción con el entorno, la propagación radioeléctrica puede clasificarse en tres mecanismos principales: onda directa, onda ionosférica y onda de superficie. Cada uno de estos modos domina en determinados rangos de frecuencia y distancia, siendo especialmente relevantes en las bandas LF, MF y HF [4] [8].

En este apartado se describen los tres mecanismos fundamentales de propagación radioeléctrica:

- **Onda directa:** En sistemas de radiocomunicación que operan en bandas superiores a aproximadamente 30 MHz (VHF, UHF y microondas), el mecanismo dominante es la propagación en línea de visión (Line-of-Sight, LOS). En este modo, la onda electromagnética se transmite esencialmente en trayectoria rectilínea entre la antena transmisora y la receptora, sin intervención significativa de la ionosfera ni propagación guiada por la superficie terrestre [19]. Bajo condiciones ideales de espacio libre, la atenuación viene determinada por la expansión geométrica del frente de onda, de modo que la potencia recibida decrece proporcionalmente al cuadrado de la distancia. Este comportamiento se modela mediante la pérdida en espacio libre [20]:

$$L_b = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2 - 11)$$

donde  $d$  es la distancia entre antenas y  $\lambda$  la longitud de onda. Este modelo establece el límite teórico de propagación en ausencia de obstáculos y constituye la referencia básica para el análisis de enlaces en régimen de línea de vista. En la Figura 2-1 se muestra de forma esquemática el mecanismo de propagación por onda directa:

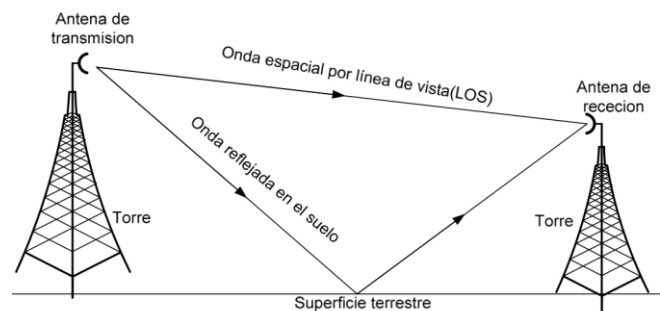


**Figura 2-1. Propagación por onda directa [21].**

- **Onda ionosférica:** La propagación ionosférica se produce cuando la onda electromagnética interactúa con las capas ionizadas de la atmósfera superior, situadas aproximadamente entre 60 y 500 km de altitud [8]. En esta región, parcialmente ionizada por la radiación solar, el índice de refracción depende de la densidad electrónica, lo que provoca una refracción progresiva de la onda y permite que determinadas frecuencias regresen a la superficie terrestre, posibilitando enlaces más allá del horizonte [19]. La estructura de la ionosfera se organiza en varias capas con características diferenciadas. La capa D, situada entre 60 y 90 km, existe principalmente durante el día y se caracteriza por producir absorción significativa, especialmente en frecuencias bajas y medias. La capa E, localizada entre 90 y 130 km, presenta mayor regularidad y resulta relevante para la

propagación HF en determinadas distancias; en ocasiones aparece una capa de ionización intensa denominada capa E esporádica (Es), que puede generar fenómenos de interferencia. Por encima de estas se encuentran las capas F1 (150-250 km), presente fundamentalmente durante el día, y F2 (300-450 km), que constituye la principal región responsable de la propagación HF a larga distancia. Durante la noche, las capas F1 y F2 tienden a fusionarse en una única capa situada en torno a los 300 km [8]. Este mecanismo predomina en la banda HF (3-30 MHz), donde la ionosfera actúa como medio refractante eficaz. Permite establecer comunicaciones a cientos o miles de kilómetros, logrando alcances de incluso 7000 km, mediante uno o varios saltos sucesivos entre la ionosfera y la superficie terrestre [20]. No obstante, la viabilidad del enlace depende de parámetros operativos como la frecuencia máxima utilizable (MUF), que representa el valor máximo de frecuencia que puede ser refractado por una capa ionosférica para una distancia determinada, y la frecuencia mínima utilizable (LUF), por debajo de la cual la absorción, especialmente en la capa D, impide la recepción adecuada de la señal. Entre ambos límites se define la ventana operativa óptima para la comunicación HF [8]. A pesar de su importancia en enlaces de larga distancia, la propagación ionosférica presenta una elevada variabilidad, condicionada por la hora del día, la estación del año y la actividad solar [19]. Aunque este mecanismo resulta fundamental en determinados escenarios HF, el presente trabajo centra su análisis en la propagación por onda de superficie, predominante en las bandas LF y MF y relevante bajo condiciones en HF. En la Figura 2-2 se muestra el mecanismo de propagación por onda ionosférica:

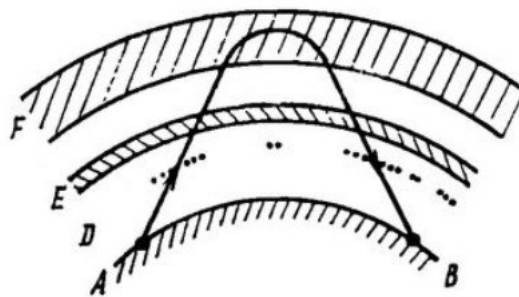


Figura 2-2. Propagación por onda ionosférica [9].

- Onda de superficie:** La onda de superficie es el mecanismo de propagación predominante en las bandas de muy baja, baja y media frecuencia, comprendidas entre 10 kHz - 3 MHz, donde la interacción entre la onda electromagnética y la superficie terrestre resulta especialmente significativa [4]. Desde el punto de vista físico, la onda de superficie se define como el modo de propagación electromagnética en el cual el campo se desplaza ligado a la interfaz aire-tierra, siguiendo la curvatura de la superficie terrestre [20]. Este fenómeno se produce como consecuencia del acoplamiento entre el campo electromagnético radiado por la antena transmisora y el medio conductor que constituye el terreno, generándose corrientes inducidas en la superficie que modifican la distribución espacial del campo [8]. Como resultado, la energía no se propaga únicamente por el espacio libre, sino que queda parcialmente guiada por el suelo. Una condición esencial para que este mecanismo sea eficiente es la utilización de la polarización vertical. En presencia de un terreno con conductividad finita, las componentes horizontales del campo eléctrico experimentan una fuerte atenuación debido a las corrientes inducidas, mientras que la componente vertical favorece el acoplamiento electromagnético necesario para sostener la propagación [8]. Por esta razón, la onda de superficie constituye el modo dominante en las bandas de baja frecuencia (LF) y frecuencia media (MF), donde la mayor longitud de onda facilita la interacción con el terreno y reduce la atenuación relativa [20]. En comparación con los otros mecanismos principales de propagación, la onda de superficie presenta características diferenciadoras relevantes. A diferencia de la onda directa, no requiere estrictamente una línea de visión entre transmisor y receptor, ya que puede adaptarse a la curvatura terrestre y superar el límite del horizonte óptico. Asimismo, no depende de procesos de refracción o reflexión en la ionosfera, como ocurre en la propagación ionosférica, lo que le confiere una mayor estabilidad frente a las variaciones diurnas, estacionales o asociadas a la actividad solar

[19]. Este modo de propagación depende de forma determinante de las propiedades eléctricas del medio sobre el que se desplaza [4]. La conductividad y la permitividad del terreno condicionan la magnitud de las corrientes inducidas y, en consecuencia, la atenuación de la onda a lo largo del trayecto. En medios altamente conductores, como el agua de mar, la onda de superficie puede mantener niveles apreciables de intensidad a distancias significativas mayores que sobre terrenos secos o de baja conductividad [9]. Estas particularidades hacen necesario analizar con mayor profundidad el comportamiento físico de este mecanismo de propagación, cuyas características específicas se desarrollan en el apartado siguiente. En la Figura 2-2 se muestra de forma esquemática el mecanismo de propagación de la onda de superficie:

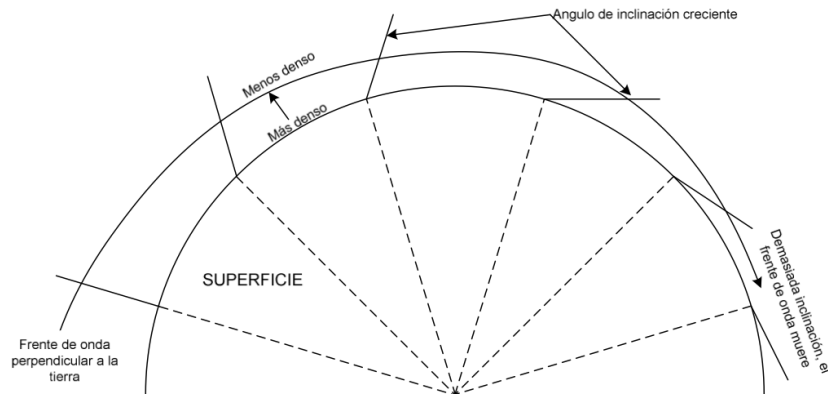


Figura 2-3. Propagación por onda de superficie [21].

### 2.1.3 Características de la onda de superficie

La propagación por onda de superficie presenta un comportamiento espacial que no puede describirse mediante una única ley simple válida para todo el trayecto. La distribución del campo eléctrico evoluciona conforme aumenta la distancia del transmisor, adoptando distintos regímenes que reflejan la interacción progresiva entre la onda y la geometría terrestre. En las proximidades de la antena, el campo mantiene características similares a las de una propagación en espacio libre, donde el campo varía de forma inversamente proporcional a la distancia ( $1/d$ ), aunque condicionado por la presencia inmediata del suelo [8]. A medida que la distancia aumenta, la influencia de la superficie terrestre se hace más evidente y el ritmo de atenuación del campo se incrementa, tendiendo habitualmente a seguir una ley de  $1/d^2$  [8]. Finalmente, en distancias suficientemente grandes, el comportamiento queda dominado por la curvatura global de la Tierra, produciéndose una transición hacia un régimen de pérdidas más acusado [9].

Una de las propiedades más significativas de este modo de propagación es su capacidad para extender la señal más allá del horizonte geométrico [8]. Mientras que la propagación en línea de visión queda limitada por la geometría directa entre transmisor y receptor, la onda de superficie puede seguir el contorno terrestre gracias a procesos de difracción asociados a la superficie esférica del planeta. Este fenómeno permite que la energía radioeléctrica alcance regiones situadas fuera de la zona de visibilidad óptica directa, ampliando de manera notable la cobertura potencial del sistema [8].

El decaimiento del campo eléctrico asociado a la onda de superficie se caracteriza por una atenuación progresiva que supera la simple expansión geométrica del frente de onda. A lo largo del trayecto, la energía transportada por la onda experimenta pérdidas adicionales que modifican su evolución con la distancia. Este comportamiento no es abrupto, sino continuo, y conduce a una reducción gradual de la intensidad de campo conforme la señal se aleja del transmisor. La tasa de atenuación aumenta especialmente cuando la propagación se produce en regiones donde la curvatura terrestre adquiere mayor relevancia, reflejando el carácter no ideal del medio de propagación [9].

Desde el punto de vista temporal, la onda de superficie se distingue por su elevada estabilidad en comparación con otros mecanismos de propagación. Dado que su mecanismo no se sustenta en fenómenos atmosféricos de carácter dinámico, la onda de superficie ofrece una respuesta temporal más uniforme y predecible que otros modos de propagación. Esta característica permite mantener niveles de señal relativamente constantes a lo largo del día. No obstante, en determinadas bandas y bajo condiciones específicas, pueden aparecer interferencias derivadas de la coexistencia con otros modos de propagación, lo que puede introducir fluctuaciones locales en la intensidad recibida [19].

A pesar de su capacidad para superar el horizonte óptico, la onda de superficie no presenta un alcance ilimitado. La combinación de la atenuación acumulada y la influencia de la curvatura terrestre conduce, a grandes distancias, a un régimen en el que la intensidad del campo decrece de forma muy acusada. Este comportamiento establece un límite práctico de cobertura, definido por el punto en el que la señal deja de ser utilizable para un sistema de comunicaciones determinado [8].

#### 2.1.4 Influencia de la frecuencia y del medio de propagación

La propagación de ondas radioeléctricas sobre medios reales se encuentra gobernada por las ecuaciones de Maxwell, considerando las condiciones de contorno impuestas por la interfaz aire-suelo. Dado que el terreno no constituye un conductor perfecto, la onda electromagnética experimenta simultáneamente atenuación y variación de fase durante su desplazamiento. Ambos efectos dependen de manera crítica de la frecuencia de operación y de las propiedades eléctricas del medio, lo que convierte a estos dos factores en los parámetros fundamentales que determinan la eficiencia de la propagación por onda de superficie.

Desde el punto de vista electromagnético, la propagación en un medio conductor se describe mediante la constante de propagación compleja (2-12), definida como [22] [23]:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2 - 12)$$

donde:

- $\gamma$  es la constante de propagación (1/m),
- $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular (rad/s), siendo  $f$  la frecuencia en Hz,
- $\mu$  es la permeabilidad magnética del medio (H/m),
- $\epsilon$  es la permitividad eléctrica (F/m),
- $\sigma$  es la conductividad eléctrica (S/m),
- $\alpha$  es la constante de atenuación (Np/m),
- $\beta$  es la constante de fase (rad/m).

La parte real de  $\gamma$ , representada por  $\alpha$ , cuantifica la disminución exponencial de la amplitud del campo eléctrico conforme la onda avanza. Este comportamiento puede expresarse mediante la ecuación (2-13) [17]:

$$E(x) = E_0 e^{-\alpha x} \quad (2 - 13)$$

donde:

- $E(x)$  es la amplitud del campo eléctrico a una distancia  $x$  (V/m),
- $E_0$  es la amplitud inicial en el punto de referencia (V/m),
- $x$  es la distancia recorrida (m).

La parte imaginaria,  $\beta$ , describe la evolución espacial de la fase y está relacionada con la longitud de onda mediante la expresión (2-14):

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2 - 14)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda (m) [23].

A medida que aumenta la frecuencia, se producen varios efectos físicos relevantes. En primer lugar, el incremento de  $\omega$  provoca un aumento de la constante de atenuación  $\alpha$ , lo que implica mayores pérdidas por unidad de distancia [23]. En segundo lugar, la corriente inducida en el terreno tiende a concentrarse en una capa superficial cada vez más delgada, fenómeno asociado al efecto pelicular (*skin effect*), lo que incrementa la resistencia efectiva del medio y, en consecuencia, las pérdidas por disipación térmica (efecto Joule) [23]. Finalmente, la reducción de la longitud de onda (2-15),

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2 - 15)$$

donde  $v$  es la velocidad de propagación de la onda en el medio (m/s), disminuye la capacidad de la onda para adaptarse a la curvatura terrestre mediante difracción [23]. Como resultado, el acoplamiento electromagnético con la superficie se debilita progresivamente al aumentar la frecuencia.

Estas consideraciones explican por qué en bandas de baja frecuencia (LF y parte de MF) la onda de superficie constituye el mecanismo dominante, mientras que al ascender en el espectro hacia la banda de HF su contribución se reduce significativamente, pasando a predominar otros modos de propagación.

Además de la frecuencia, la naturaleza eléctrica del medio desempeña un papel determinante. El terreno puede modelarse como un dieléctrico con pérdidas, caracterizado por una permitividad compleja que incorpora los efectos de la conductividad [24]. Esta se expresa con la siguiente ecuación (2-16):

$$\epsilon_c = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2 - 16)$$

donde:

- $\epsilon_c$  es la permitividad compleja del medio,
- $\epsilon$  es la permitividad eléctrica del material (F/m),
- $\sigma$  es la conductividad eléctrica (S/m),
- $\omega$  es la frecuencia angular.

La interacción entre la conductividad del terreno y la frecuencia determina la magnitud de las corrientes inducidas en el suelo y, por tanto, la tasa de absorción de energía [23]. En medios de alta conductividad, como el agua de mar ( $\sigma$  del orden de varios S/m), las pérdidas relativas asociadas a la propagación superficial son menores, permitiendo alcances considerablemente superiores. En contraste, en terrenos secos o rocosos, donde la conductividad puede descender a valores del orden de mS/m, la absorción es mucho más intensa y la cobertura se reduce de forma apreciable [4].

Un parámetro relevante en este contexto es la impedancia superficial del terreno, definida como la relación entre los campos tangenciales en la frontera aire-suelo. Para un medio conductor puede aproximarse por la siguiente expresión (2-17) [19] [22]:

$$Z_s \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (2 - 17)$$

Una impedancia superficial baja indica un comportamiento más próximo al de un conductor ideal, favoreciendo el guiado de la energía a lo largo de la superficie [19].

Otro concepto asociado es la profundidad de penetración o profundidad de piel, que cuantifica la distancia a la cual la amplitud del campo se reduce a  $1/e$  de su valor en la superficie. Se expresa con la siguiente ecuación (2-18) [19] [22]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2 - 18)$$

De esta expresión se deduce que, al aumentar la frecuencia o la conductividad, la onda penetra menos en el terreno y su energía queda más confinada en la región próxima a la superficie [19].

En conjunto, la frecuencia de operación y las propiedades eléctricas del medio determinan el equilibrio entre atenuación, fase y capacidad de acoplamiento con la superficie terrestre. Estas variables condicionan de forma directa la intensidad de campo alcanzable a una determinada distancia, tal como reflejan las curvas de predicción empleadas en normativa internacional, y constituyen la base física para el análisis detallado del comportamiento de la onda de superficie en los apartados posteriores.

## 2.2 Propagación por onda de superficie en bandas LF, MF y HF

### 2.2.1 Comportamiento de la onda de superficie a baja frecuencia

En las bandas de baja frecuencia (LF, 30-300 kHz) y en parte de la banda de frecuencia media (MF, 300 kHz-3 MHz), la propagación radioeléctrica próxima a la superficie terrestre está dominada por el modo de onda de superficie [4]. En este intervalo espectral, la contribución del campo superficial supera claramente a la componente de onda espacial en las proximidades del suelo, constituyendo el mecanismo principal de transporte de energía a largas distancias [23].

El análisis riguroso de este fenómeno se remonta a la formulación de Sommerfeld para una fuente situada sobre un plano conductor, posteriormente simplificada para aplicaciones prácticas por Norton, quien obtuvo expresiones de carácter ingenieril manejables para el cálculo del campo en presencia de un terreno real [25]. Dichos resultados muestran que, en bajas frecuencias, la atenuación adicional respecto al espacio libre es relativamente reducida, permitiendo coberturas significativamente superiores a las alcanzables en bandas más elevadas [23].

Uno de los factores determinantes en este comportamiento es la magnitud de la longitud de onda, que en LF alcanza valores del orden de kilómetros. Cuando la longitud de onda es comparable o superior a las irregularidades características del terreno, la dispersión por obstáculos locales se vuelve poco significativa. En consecuencia, la onda presenta una elevada capacidad de adaptación a la curvatura terrestre mediante procesos de difracción progresiva, lo que favorece la propagación más allá del horizonte geométrico [23].

Desde el punto de vista electromagnético, el régimen de bajas frecuencias se caracteriza por el predominio de la conductividad frente al término dieléctrico en la relación constitutiva del medio, verificándose en muchos terrenos la condición (2-19):

$$\sigma \gg \omega\epsilon \quad (2 - 19)$$

lo que aproxima el comportamiento del suelo al de un conductor relativamente bueno. En estas circunstancias, la constante de atenuación superficial resulta menor que en bandas superiores, reduciéndose las pérdidas por unidad de distancia [17].

Otra consecuencia relevante es el aumento de la profundidad de penetración, un concepto introducido en el apartado anterior (2-20):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2 - 20)$$

la cual crece al disminuir la frecuencia. Este efecto implica que la energía electromagnética no queda confinada a una capa extremadamente delgada, como ocurre en frecuencias altas, sino que puede penetrar varios metros en medios conductores como el agua de mar. En contraste, a frecuencias del orden

de 100 MHz, la penetración se reduce a milímetros, intensificándose el efecto pelicular y las pérdidas asociadas [19].

Estas propiedades físicas explican la utilización histórica de las bandas LF en sistemas que requieren elevada fiabilidad y cobertura extendida. La eficiencia de propagación sobre el mar convierte a esta banda en fundamental para comunicaciones navales de gran alcance. En particular, la estación radioeléctrica de Guardamar del Segura opera en baja frecuencia, en el entorno de los 150 kHz, dentro del rango LF, frecuencia que permite una penetración electromagnética apreciable en el agua de mar [5]. Considerando el océano como un medio conductor con  $\sigma \approx 5 \text{ S/m}$ , la profundidad de penetración resultante, de acuerdo con la expresión (2-21), es del orden de varios metros, lo que posibilita la recepción de señales por parte de submarinos en inmersión poco profunda sin necesidad de emerger completamente [14]. Esta característica constituye la base física de los enlaces estratégicos navales en baja frecuencia, caracterizados por su elevada robustez y limitada tasa de datos.

### 2.2.2 Propiedades eléctricas del terreno

Tras el análisis del comportamiento de la onda de superficie en el régimen de bajas frecuencias, resulta necesario profundizar en los parámetros físicos que gobiernan su interacción con el terreno. La propagación superficial depende de manera directa de las propiedades eléctricas del suelo, las cuales determinan el grado de acoplamiento electromagnético en la interfaz aire-tierra. Desde el punto de vista macroscópico, el terreno puede caracterizarse fundamentalmente mediante dos parámetros: la conductividad eléctrica  $\sigma$  y la permitividad relativa  $\epsilon_r$ .

La conductividad representa la capacidad del medio para permitir el paso de corriente eléctrica cuando se encuentra sometido a un campo eléctrico [22]. En el Sistema Internacional se expresa en siemens por metro (S/m), aunque en estudios de propagación terrestre es habitual emplear la unidad mili siemens por metro (mS/m). Desde el punto de vista energético, una conductividad finita implica la existencia de pérdidas por disipación, ya que parte de la energía transportada por la onda electromagnética se transforma en calor en el interior del medio, de acuerdo con la generalización de la ley de Joule [23].

Los valores de conductividad varían de forma significativa en función de la naturaleza del terreno. De acuerdo con los datos recopilados por la Recomendación ITU-R P.832, pueden considerarse como valores típicos los recogidos en la Tabla 2-1.

| Medio           | Conductividad típica ( $\sigma$ ) |
|-----------------|-----------------------------------|
| Agua de mar     | 5 S/m                             |
| Tierra húmeda   | 1 mS/m                            |
| Tierra media    | 0.3 mS/m                          |
| Tierra seca     | 0.03 mS/m                         |
| Tierra muy seca | 0.01 mS/m                         |

**Tabla 2-1. Valores típicos de conductividad eléctrica ( $\sigma$ )  
del terreno según la Recomendación ITU-R P.832 [26].**

Estas diferencias explican la notable variación en el comportamiento de la propagación superficial según el entorno geográfico. La conductividad no constituye una propiedad estrictamente constante, sino que depende de diversos factores ambientales. La humedad y la salinidad del terreno son los elementos más influyentes, pudiendo provocar variaciones estacionales apreciables en la intensidad de campo recibida [4]. Asimismo, la temperatura afecta a la movilidad de las cargas en el medio conductor, modificando su respuesta eléctrica [22].

Desde el punto de vista de la propagación, una mayor conductividad se traduce en menores pérdidas superficiales y, por tanto, en un mayor alcance de la señal. Este hecho explica la elevada eficiencia de la propagación sobre superficies marítimas frente a terrenos secos o rocosos, donde la absorción energética es significativamente más intensa [23].

Por otra parte, la permitividad eléctrica describe la capacidad del medio para almacenar energía eléctrica mediante la polarización inducida por un campo electromagnético. Aunque la permitividad absoluta se expresa en faradios por metro (F/m), en aplicaciones de ingeniería se emplea habitualmente la permitividad relativa  $\epsilon_r$ , magnitud adimensional que relaciona la permitividad del medio con la del vacío [23] [22]. Los valores típicos de permitividad relativa también dependen de la composición y contenido de agua del suelo. La Tabla 2-2 recoge valores de referencia comúnmente empleados en estudios de propagación terrestre [4].

| Medio           | Permitividad eléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) |
|-----------------|--------------------------------------------------|
| Agua de mar     | 70                                               |
| Tierra húmeda   | 30                                               |
| Tierra media    | 22                                               |
| Tierra seca     | 7                                                |
| Tierra muy seca | 3                                                |

**Tabla 2-2. Valores típicos de permitividad eléctrica ( $\epsilon_r$ ) del terreno según la Recomendación ITU-R P.832 [26].**

A diferencia de lo que se asume en modelos simplificados, la permitividad relativa no es estrictamente constante, sino que puede presentar dependencia de la frecuencia, especialmente en las bandas de MF y HF, donde los efectos dieléctricos comienzan a adquirir mayor relevancia frente al carácter conductor del suelo. En términos físicos, la permitividad influye en la propagación al modificar la impedancia efectiva de la superficie terrestre, afectando al acoplamiento entre el campo radiado y el medio y alterando la distribución de las corrientes inducidas en la interfaz [23].

En conjunto, la combinación de conductividad y permitividad define la respuesta electromagnética del terreno y constituye el conjunto de parámetros fundamentales empleados como entrada en los modelos de predicción de intensidad de campo utilizados en normativa internacional.

### 2.2.3 Clasificación de terrenos según ITU-R

El terreno natural presenta una variabilidad espacial continua condicionada por factores como la composición geológica, el contenido de humedad, la salinidad y la temperatura. Desde el punto de vista electromagnético, esta variabilidad se traduce en cambios locales de conductividad y permitividad que pueden alterar el comportamiento de la propagación por onda de superficie [27].

Sin embargo, los modelos analíticos de predicción requieren, para ser matemáticamente tratables, la adopción de hipótesis simplificadoras. Entre ellas, resulta fundamental la consideración de un medio homogéneo, caracterizado por parámetros eléctricos constantes a lo largo del trayecto de propagación. Esta necesidad conduce a la introducción del concepto de terreno electromagnéticamente equivalente, mediante el cual un medio real, potencialmente heterogéneo o estratificado, se representa a través de un conjunto reducido de parámetros efectivos [18].

En lugar de modelar cada variación local del suelo, la metodología adoptada en la normativa internacional, en particular en las Recomendaciones del Sector de Radiocomunicaciones de la Unión

Internacional de Telecomunicaciones, consiste en definir clases representativas de terreno [26]. Este proceso de discretización permite normalizar los valores de conductividad y permitividad empleados en los modelos de propagación, garantizando coherencia y reproducibilidad en los estudios de predicción.

La clasificación de los terrenos utilizada en estudios de propagación por onda de superficie se basa en las categorías definidas en la Recomendación ITU-R P.527, donde se establecen valores representativos de conductividad y permitividad para distintos tipos de superficie. Estas categorías agrupan terrenos con comportamientos electromagnéticos similares, tales como agua de mar, suelos húmedos, suelos de conductividad medio o terrenos secos [27].

Cada categoría se asocia a un par característico de parámetros eléctricos que sirve como entrada en los modelos de predicción. Esta normalización permite generar resultados comparables y sistemáticos, evitando la necesidad de caracterizar experimentalmente cada emplazamiento particular.

El procedimiento se apoya en el concepto de trayecto homogéneo, en el cual se asume que las propiedades eléctricas del terreno permanecen constantes a lo largo de la trayectoria entre transmisor y receptor. Bajo esta hipótesis, el comportamiento del campo eléctrico puede determinarse mediante modelos analíticos o numéricos desarrollados para medios uniformes [4].

Este enfoque constituye la base metodológica sobre la que se construyen las curvas normalizadas de intensidad de campo empleadas en la predicción de la propagación por onda de superficie.

La aplicabilidad de esta clasificación está condicionada por el cumplimiento de una serie de hipótesis físicas recogidas en la Recomendación ITU-R P.368. En primer lugar, se considera una Tierra esférica lisa, sin irregularidades topográficas significativas. Asimismo, el medio de propagación se supone homogéneo e isótropo en cada trayecto analizado [4].

El modelo está formulado para el intervalo de frecuencia comprendido entre 10 kHz y 30 MHz, rango en el cual la propagación por onda de superficie resulta relevante. Se asume igualmente que las antenas transmisora y receptora se encuentran situadas próximas al suelo, de modo que el acoplamiento electromagnético con la superficie sea representativo del régimen considerado [4].

Por último, la clasificación y los modelos asociados están definidos para polarización vertical, dado que esta configuración maximiza el acoplamiento con el terreno y permite sostener la propagación superficial. Las predicciones proporcionan el valor de la componente vertical de la intensidad de campo en región de campo lejano, magnitud de interés en aplicaciones de radiocomunicación [18].

En escenarios reales, los trayectos de propagación rara vez pueden considerarse estrictamente homogéneos. La transición entre distintos tipos de terrenos (por ejemplo, entre superficie continental y marítima) introduce cambios abruptos en los parámetros eléctricos efectivos, alterando el régimen de atenuación y la distribución del campo eléctrico [4].

La clasificación normalizada resulta adecuada siempre que el tramo analizado pueda aproximarse razonablemente como uniforme. No obstante, cuando el trayecto atraviesa regiones con propiedades eléctricas significativamente diferentes, el modelo de terreno único deja de describir con precisión el comportamiento del enlace [18].

Estas limitaciones ponen de manifiesto que, si bien la discretización en categorías normalizadas constituye un paso necesario para la modelización, no siempre es suficiente para representar trayectos reales complejos. En tales casos, se requiere la adopción de técnicas adicionales que permitan tratar la propagación sobre trayectos no homogéneos, cuestión que será abordada en apartados posteriores.

#### *2.2.4 Atenuación y pérdidas de propagación*

En el estudio de la propagación radioeléctrica resulta imprescindible diferenciar entre el comportamiento ideal en espacio libre y el régimen real asociado a la onda de superficie. Mientras que en el vacío la energía radiada se distribuye en frentes aproximadamente esféricos, en la propagación

sobre la superficie terrestre el medio material interviene activamente en el proceso. La señal se acopla electromagnéticamente a la interfaz aire-suelo, de modo que el terreno deja de ser un simple soporte geométrico para convertirse en un elemento determinante del mecanismo de transmisión [8].

Esta interacción introduce pérdidas adicionales respecto al caso ideal, cuya magnitud depende de las propiedades eléctricas del suelo y de la frecuencia de operación. La caracterización rigurosa de estos mecanismos resulta esencial para comprender las limitaciones físicas del alcance en enlaces basados en onda de superficie.

El fenómeno dominante en la degradación de la señal es la disipación de energía en el terreno. La conductividad finita de la Tierra implica que el campo electromagnético incidente induce corrientes superficiales que, al circular por un medio no perfectamente conductor, generan pérdidas por efecto Joule. Parte de la energía transportada por la onda se transforma en calor, reduciendo progresivamente la amplitud del campo eléctrico [9].

La intensidad de esta disipación depende tanto de la conductividad como de la frecuencia. A frecuencias más elevadas, el acoplamiento con el terreno se traduce en mayores pérdidas por unidad de distancia. Asimismo, suelos de baja conductividad favorecen una mayor penetración del campo en el medio, incrementando la energía disipada volumétricamente [22].

Desde el punto de vista matemático, y como se expuso en el apartado 2.1.4 al analizar la propagación en medios con pérdidas, la amplitud del campo eléctrico decrece exponencialmente con la distancia según la siguiente expresión (2-21) [17]:

$$E(x) = E_0 e^{-\alpha x} \quad (2 - 21)$$

Esta expresión pone de manifiesto el carácter acumulativo de la atenuación en la onda de superficie, quedando su intensidad condicionada por la constante de atenuación del medio, la cual integra la influencia de la frecuencia y de las propiedades eléctricas del terreno.

La naturaleza exponencial del fenómeno implica que la pérdida es acumulativa a lo largo del trayecto, condicionando de manera decisiva el alcance máximo del enlace [17]. La dependencia de la constante de atenuación con la frecuencia explica el papel predominante de la onda de superficie en las bandas LF y MF. En estos rangos, los valores de  $\alpha$  son suficientemente reducidos como para permitir un alcance de gran extensión, especialmente sobre superficies de elevada conductividad como el mar [4].

En la banda HF, por el contrario, el incremento de las pérdidas en el terreno limita de forma significativa el alcance efectivo de la onda superficial, relegando este modo de propagación a distancias más reducidas frente a otros mecanismos como la reflexión ionosférica [4].

El tipo de terreno constituye igualmente un factor crítico. El agua de mar, caracterizada por una alta conductividad, reduce la disipación resistiva y favorece la propagación a largas distancias. En cambio, terrenos secos o rocosos presentan conductividades bajas, lo que incrementa la atenuación y acelera la caída de la intensidad de campo con la distancia. Esta fuerte dependencia justifica la clasificación normalizada de terrenos recogida en la Recomendación ITU-R P.527, empleada posteriormente en los modelos de predicción [4].

En la práctica de la ingeniería de radiocomunicaciones, las variaciones exponenciales de la señal se representan en escala logarítmica mediante el decibelio. Esta transformación convierte relaciones multiplicativas en sumas algebraicas, simplificando el análisis de balance de enlace y la evaluación de pérdidas acumuladas [22].

Cuando la comparación se realiza en términos de amplitud de campo eléctrico entre dos puntos  $E_1$  y  $E_2$ , la pérdida se expresa como (2-22) [8]:

$$L(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left( \frac{E_1}{E_2} \right) \quad (2 - 22)$$

El factor 20, en lugar de 10, responde a que el campo eléctrico es una magnitud de amplitud proporcional a la raíz cuadrada de la potencia.

En aplicaciones de propagación terrestre, la intensidad de campo se expresa habitualmente en  $\text{dB}\mu\text{V/m}$  según la siguiente expresión (2-23) [8]:

$$E(\text{dB}\mu\text{V/m}) = 20 \log_{10}(E[\text{V/m}]) + 120 \quad (2 - 23)$$

Esta es la magnitud adoptada en las curvas normalizadas de predicción de la Recomendación ITU-R P.368-10, donde la intensidad de campo se representa directamente en función de la distancia, la frecuencia y las características del terreno [4].

La utilización de esta formulación logarítmica permite describir de forma compacta el comportamiento de la atenuación con la distancia, facilitando el análisis de balances de enlace y la comparación entre distintos escenarios de propagación. No obstante, esta representación matemática no agota la interpretación física del fenómeno. La pérdida total experimentada por la señal puede descomponerse conceptualmente en una componente básica asociada a la expansión geométrica y en una serie de mecanismos adicionales vinculados a la interacción con el terreno y a la propia geometría terrestre.

En este sentido, se define la pérdida básica de propagación como la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida bajo condiciones ideales de referencia. En espacio libre, dicha pérdida depende exclusivamente de la expansión del frente de onda. Sin embargo, cuando la propagación se produce sobre la superficie terrestre, el medio introduce atenuaciones adicionales que modifican el nivel de intensidad de campo respecto al caso ideal. En la práctica, esta pérdida puede obtenerse a partir del valor de la intensidad de campo mediante relaciones logarítmicas que incorporan la frecuencia de operación, constituyendo la base del análisis cuantitativo del enlace [8].

A medida que la distancia de propagación aumenta, la hipótesis de superficie plana deja de ser válida y resulta necesario considerar la geometría esférica de la Tierra. La curvatura introduce un efecto adicional en el comportamiento del campo eléctrico, especialmente en trayectos que se aproximan o superan el horizonte radioeléctrico [4].

En este contexto se introduce el concepto de atenuación en exceso, entendido como la pérdida adicional experimentada por la señal más allá de la expansión geométrica ideal. Esta atenuación integra los efectos combinados de la absorción en el terreno y de la adaptación del frente de onda a la superficie esférica. En trayectos de gran extensión, estos mecanismos conducen a una caída progresivamente más acusada de la intensidad de campo, estableciendo un límite físico al alcance práctico del enlace [8].

Si bien el modelo de decaimiento exponencial proporciona una aproximación adecuada para trayectos homogéneos y distancias moderadas, la propagación real presenta un comportamiento más complejo. En enlaces extensos, la señal puede atravesar regiones con propiedades eléctricas diferentes, configurando trayectos no homogéneos en los que la atenuación no responde a una única ley simple [4].

Además, en las proximidades del transmisor intervienen componentes de campo cercano que no quedan representadas en el modelo de larga distancia. Por ello, la evaluación rigurosa del campo eléctrico en aplicaciones reales requiere métodos normalizados capaces de integrar simultáneamente los efectos de frecuencia, conductividad y geometría terrestre, proporcionando resultados coherentes y reproducibles para el diseño de sistemas de radiocomunicación.

## 2.3 Curvas de intensidad de campo de la ITU-R

### 2.3.1 Recomendaciones ITU-R relevantes

El Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) constituye el organismo internacional responsable de la elaboración de normas técnicas para la gestión y utilización eficiente del espectro radioeléctrico. Entre sus funciones principales se encuentra el desarrollo de Recomendaciones que establecen métodos normalizados de predicción de propagación radioeléctrica, empleados en planificación, coordinación y compatibilidad electromagnética a escala mundial. En el ámbito de la ingeniería de telecomunicaciones, la utilización de estos modelos estandarizados resulta preferible frente a formulaciones exclusivamente académicas, ya que garantizan coherencia técnica entre administraciones y permiten reproducibilidad en estudios de cobertura y coordinación internacional. Mientras que los modelos físicos rigurosos buscan la máxima fidelidad teórica, las Recomendaciones ITU-R proporcionan herramientas de ingeniería validadas, con hipótesis bien definidas y dominio de aplicación claramente delimitado [28].

En el rango de frecuencias bajas y medias, la referencia normativa fundamental es la Recomendación ITU-R P.368-10, titulada “*Ground-wave propagation prediction method for frequencies between 10 kHz and 30 MHz*”. Esta Recomendación establece el método de cálculo de la intensidad de campo eléctrico producida por propagación por onda de superficie sobre una Tierra esférica homogénea y lisa, para distancias comprendidas dentro del dominio de validez de la onda de superficie. El modelo proporciona como resultado la componente vertical del campo eléctrico en función de la distancia, frecuencia y constantes eléctricas del terreno. Su formulación se basa en la solución clásica del problema de Sommerfeld [29] para una superficie conductora imperfecta, desarrollada posteriormente por Norton [25] mediante aproximaciones prácticas para aplicaciones ingenieriles. El método adopta como configuración de referencia una antena vertical corta situada en la superficie terrestre o próxima a ella, asumiendo polarización vertical, condición necesaria para la existencia de onda de superficie eficiente en este rango espectral [4].

La aplicación del método definido en la P.368 requiere como parámetros de entrada las constantes eléctricas del terreno, en particular la conductividad ( $\sigma$ ) y la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ). Estos parámetros se encuentran normalizados en la Recomendación ITU-R P.527, que proporciona valores representativos para diferentes tipos de superficie, tales como agua salada, suelo húmedo, terreno agrícola o áreas urbanizadas [27]. Adicionalmente, cuando no se dispone de medidas locales, la Recomendación ITU-R P.832 ofrece un atlas mundial de conductividad del suelo, con valores efectivos referidos a 1 MHz, permitiendo asignar parámetros realistas en estudios de planificación internacional [26]. La correcta selección de estas constantes resulta determinante, ya que la atenuación de la onda de superficie depende de forma directa de la impedancia superficial compleja del terreno.

La elección de la Recomendación P.368 como base metodológica en el presente trabajo se justifica por el mecanismo de propagación y el rango de frecuencias considerado. Otras recomendaciones de la serie P, como la ITU-R P.1546 (orientada a servicios terrenales en VHF y UHF) [30] o la ITU-R P.1812 (predicción punto-zona para frecuencias superiores a 30 MHz) [31], no resultan aplicables al estudio de la propagación por onda de superficie en bandas LF, MF y parte de HF.

La P.368 establece un procedimiento normalizado para la estimación de la intensidad de campo sobre una Tierra esférica homogénea, basado en la formulación clásica de la onda de superficie desarrollada a partir de los trabajos de Sommerfeld y Norton. Aunque históricamente la aplicación del método se realizaba mediante la consulta de curvas gráficas incluidas en anexos técnicos, la Recomendación proporciona también la formulación matemática necesaria para su implementación mediante procedimientos de cálculo numérico equivalentes, garantizando coherencia con el marco normativo internacional [4].

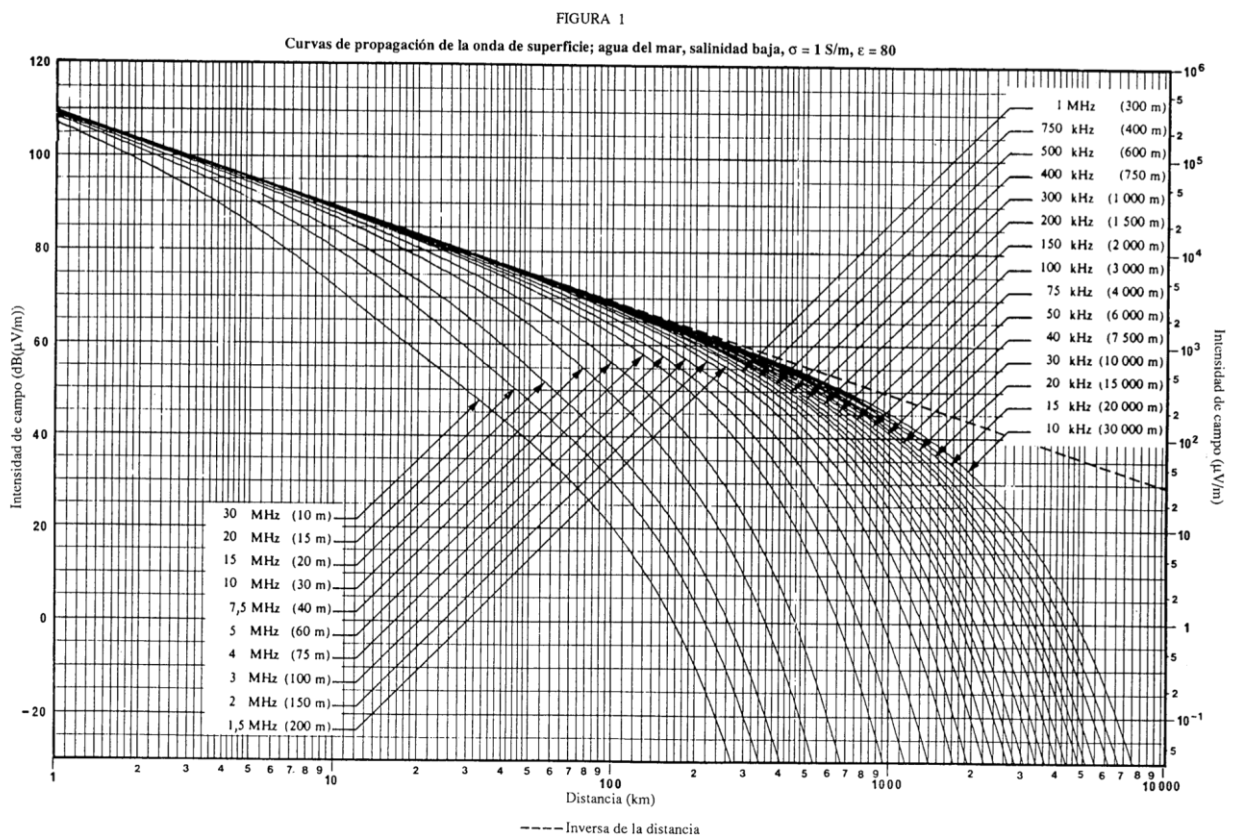
En consecuencia, la herramienta desarrollada en este trabajo no constituye un modelo alternativo, sino una implementación computacional del estándar ITU-R bajo las hipótesis explícitas de Tierra

esférica homogénea y polarización vertical, asegurando trazabilidad normativa y consistencia con los procedimientos internacionales de planificación radioeléctrica.

### 2.3.2 Descripción de las curvas de intensidad de campo

Las curvas incluidas en la Recomendación ITU-R P.368 representan la intensidad de la componente vertical del campo eléctrico asociada a la propagación por onda de superficie. Esta magnitud se expresa en dB $\mu$ V/m y se representa en función de la distancia recorrida sobre el trayecto considerado, medida a lo largo del círculo máximo entre transmisor y receptor [4].

Cada familia de curvas corresponde a una frecuencia específica y a un conjunto determinado de parámetros eléctricos del terreno. La representación gráfica permite visualizar de forma directa la evolución del campo eléctrico conforme aumenta la distancia, constituyendo una herramienta práctica para la estimación de cobertura en sistemas que operan en bandas LF, MF y parte de HF [4].



0368-01

**Figura 2-4. Ejemplo de curvas ITU-R P.368 [4].**

En la Figura 2-1 se muestra un ejemplo representativo de las curvas normalizadas de intensidad de campo para distintas frecuencias. En el eje horizontal se dispone la distancia en kilómetros, mientras que el eje vertical recoge la intensidad de campo en dB $\mu$ V/m. La separación entre curvas evidencia la fuerte dependencia del mecanismo de onda de superficie con la frecuencia de operación.

Desde el punto de vista interpretativo, la pendiente de las curvas no es constante. En las proximidades del transmisor se observa una región de variación relativamente rápida del campo, seguida de un régimen de atenuación progresiva dominado por las pérdidas asociadas al medio conductor. A medida que aumenta la frecuencia o disminuye la conductividad del terreno, la caída de la intensidad de campo se vuelve más acusada, reflejando el incremento de la absorción energética en la superficie terrestre.

Es importante señalar que estas curvas describen directamente la intensidad de campo y no la potencia recibida. No obstante, a partir del valor de campo eléctrico obtenido puede determinarse la pérdida básica de transmisión mediante las relaciones normalizadas correspondientes. De este modo, la representación gráfica constituye una herramienta intermedia que conecta el modelo físico con los cálculos de planificación radioeléctrica.

El empleo de estas curvas permite una evaluación rápida y coherente del comportamiento de la onda de superficie bajo las hipótesis de validez del modelo, facilitando comparaciones entre frecuencias y tipos de terreno sin necesidad de resolver explícitamente las expresiones analíticas completas.

### *2.3.3 Parámetros de entrada y condiciones de validez*

La aplicación del método establecido en la Recomendación ITU-R P.368 requiere la definición precisa de un conjunto de parámetros que caracterizan el escenario de propagación considerado [4]. En particular, deben especificarse la frecuencia de operación (restringida al intervalo comprendido entre 10 kHz y 30 MHz), la distancia entre transmisor y receptor medida sobre el círculo máximo, y las constantes eléctricas del terreno, expresadas mediante su conductividad efectiva ( $\sigma$ ) y su permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ). Asimismo, el modelo adopta como configuración radiadora de referencia un monopolo vertical corto situado en la superficie terrestre o próximo a ella, que garantiza la excitación eficiente del modo de onda de superficie.

Los valores de las constantes eléctricas deben seleccionarse conforme a las clasificaciones normalizadas recogidas en la Recomendación ITU-R P.527 [27], pudiendo emplearse, cuando no se dispone de medidas locales, los valores representativos incluidos en el atlas mundial de conductividad de la Recomendación ITU-R P.832 [26]. En su formulación básica, el método supone que estos parámetros permanecen constantes a lo largo del trayecto analizado, lo que equivale a considerar un medio homogéneo desde el punto de vista electromagnético.

Bajo esta formulación idealizada, el modelo se formula bajo la hipótesis de una Tierra esférica homogénea y lisa, sin irregularidades topográficas ni discontinuidades superficiales significativas [4]. La superficie terrestre se idealiza como una frontera continua entre el aire y un medio conductor uniforme, condición necesaria para la validez de la solución analítica en la que se fundamenta la Recomendación. Se asume igualmente que las antenas transmisora y receptora se encuentran a alturas eléctricamente pequeñas en comparación con la longitud de onda, de modo que el acoplamiento con la superficie sea representativo del régimen de propagación por onda de superficie.

El cálculo de la intensidad de campo se realiza para la región de campo lejano, donde la estructura del campo radiado puede considerarse estabilizada y dominada por el modo superficial. En este régimen, la distribución espacial del campo responde a la solución normativa adoptada y permite una estimación determinista de la componente vertical del campo eléctrico en función de la distancia y de las características del medio [4].

En consecuencia, la validez del método queda condicionada al cumplimiento simultáneo de estas hipótesis geométricas, electromagnéticas y espectrales. La coherencia de los resultados obtenidos mediante las curvas o formulaciones asociadas a la Recomendación depende directamente del grado de adecuación del escenario real a este marco idealizado.

### *2.3.4 Limitaciones de las curvas ITU-R en terrenos no homogéneos*

La metodología recogida en la Recomendación ITU-R P.368 se fundamenta en la hipótesis de un medio homogéneo, caracterizado por parámetros eléctricos constantes a lo largo del trayecto de propagación [4]. Bajo esta premisa, la solución analítica derivada de los trabajos clásicos de Sommerfeld y Norton permite obtener expresiones normalizadas de la intensidad de campo en función de la distancia y de las propiedades del terreno.

Sin embargo, la superficie terrestre real presenta una variabilidad espacial significativa en conductividad y permitividad, especialmente en trayectos costeros o mixtos tierra-mar, donde las

diferencias entre medios pueden alcanzar varios órdenes de magnitud [26], [27]. En tales condiciones, la impedancia superficial deja de ser uniforme y la hipótesis de medio único pierde validez estricta.

La aplicación directa de una única familia de curvas homogéneas a trayectos definidos por regiones con propiedades eléctricas diferenciadas puede introducir desviaciones apreciables en la estimación del campo eléctrico. Esta limitación ha sido señalada en estudios especializados sobre modelado de onda de superficie, donde se pone de manifiesto que las soluciones analíticas cerradas resultan estrictamente válidas únicamente bajo condiciones de homogeneidad [18].

En consecuencia, aunque las curvas normalizadas constituyen una herramienta robusta y coherente dentro de su dominio de aplicación, su empleo en escenarios con variaciones espaciales significativas del terreno requiere precaución y justifica el análisis de métodos específicos para el tratamiento de trayectos no homogéneos.

## 2.4 Propagación sobre terrenos no homogéneos

### 2.4.1 Problemática de la heterogeneidad del terreno

En enlaces radioeléctricos de gran extensión, el trayecto real raramente puede aproximarse como electromagnéticamente homogéneo. Aunque la modelización normativa parte de parámetros constantes del terreno, la realidad geofísica presenta variaciones espaciales significativas en conductividad y permitividad, especialmente en entornos costeros y marítimos. Las transiciones tierra-mar, la presencia de islas o zonas con distinta composición geológica introducen cambios abruptos en la respuesta electromagnética del medio [26] [27].

Desde el punto de vista de la propagación por onda de superficie, estas variaciones implican que la impedancia superficial efectiva no puede considerarse constante a lo largo de toda la trayectoria, sino que depende de la posición [22]. En consecuencia, el trayecto deja de ser un problema de medio uniforme para convertirse en un sistema definido por regiones con propiedades eléctricas diferenciadas.

La onda de superficie se sustenta en el acoplamiento continuo entre el campo radiado y la interfaz aire-suelo [9]. Cuando la onda atraviesa una región en la que cambian las constantes eléctricas del terreno, la impedancia superficial experimenta una variación local que altera el equilibrio entre campo eléctrico y corrientes inducidas [19].

Este cambio no produce una transición del régimen de propagación, sino un proceso de adaptación del campo a las nuevas condiciones del medio. La distribución espacial del campo eléctrico en cada punto depende, por tanto, no solo de las propiedades locales del suelo, sino también de la evolución previa del campo en los tramos anteriores. Estas características introducen un comportamiento acumulativo y no lineal en la atenuación, incompatible con una descripción basada en una única ley de decaimiento válida para todo el trayecto [18].

La formulación recogida en la Recomendación ITU-R P.368 se apoya en la hipótesis de medio homogéneo, bajo la cual la impedancia superficial puede tratarse como constante y la solución del problema de propagación resulta matemáticamente manejable [4]. Sin embargo, cuando la conductividad y la permitividad pasan a depender explícitamente de la coordenada de propagación, el sistema deja de ser invariante y la ecuación diferencial asociada pierde su carácter separable [18].

En tales condiciones, no existe una solución analítica cerrada general que permita describir de forma directa la intensidad de campo sobre trayectos definidos por tramos con parámetros eléctricos distintos [18]. La aplicación directa de las curvas normalizadas de medio único deja entonces de ser estrictamente válida desde el punto de vista matemático [4].

Desde la perspectiva de la planificación radioeléctrica, la simplificación consistente en asignar un único “terreno equivalente” a todo el trayecto puede introducir desviaciones significativas en la

estimación del campo eléctrico. Este efecto es particularmente relevante en trayectos mixtos tierra-mar, donde las diferencias de conductividad entre ambos medios son de varios órdenes de magnitud [9].

Además, la atenuación acumulada no depende únicamente de la proporción de cada tipo de suelo, sino también del orden en el que se atraviesan los distintos tramos. Dos trayectos con igual longitud total de mar y tierra pueden producir distribuciones de campo distintas si la secuencia de medios es diferente, reflejando el carácter histórico del proceso de propagación superficial [18].

En consecuencia, aunque el modelo homogéneo constituye una aproximación robusta bajo sus hipótesis de validez [4], la heterogeneidad real del terreno introduce un problema físico y matemático adicional que exige un tratamiento específico en el cálculo de la intensidad de campo.

#### *2.4.2 Métodos de aproximación existentes*

La modelización de la propagación por onda de superficie sobre terrenos no homogéneos ha sido abordada mediante diferentes aproximaciones, cuya elección depende del equilibrio entre rigor físico, complejidad matemática y aplicabilidad práctica. En términos generales, los métodos propuestos en la literatura técnica pueden agruparse en enfoques simplificados basados en terrenos equivalentes, correcciones empíricas derivadas de observaciones experimentales, formulaciones analíticas rigurosas basadas en integrales electromagnéticas y métodos que tratan explícitamente la heterogeneidad del trayecto mediante su división en secciones homogéneas.

La aproximación más sencilla consiste en el denominado enfoque de terreno equivalente único. En este modelo se asigna un conjunto único de parámetros eléctricos efectivos (conductividad ( $\sigma$ ) y permitividad relativa ( $\epsilon_r$ )) representativos de todo el trayecto de propagación, permitiendo así la aplicación directa del método homogéneo recogido en la Recomendación ITU-R P.368 [4]. Este procedimiento es ampliamente utilizado en estudios preliminares de cobertura debido a su simplicidad y bajo coste computacional. Sin embargo, supone implícitamente que el medio responde de manera uniforme a lo largo de toda la trayectoria, ignorando la dependencia histórica del campo electromagnético respecto a los tramos previamente recorridos. Como consecuencia, no contempla la influencia del orden de los medios atravesados ni los efectos acumulativos derivados de cambios abruptos de impedancia superficial. Su validez práctica queda, por tanto, limitada a escenarios en los que un tipo de terreno predomina claramente o cuando la longitud del trayecto es suficientemente reducida como para que las discontinuidades no introduzcan errores apreciables en la predicción [9], [18].

Con el objetivo de mejorar la precisión de estas estimaciones sin recurrir a formulaciones analíticas completas, se desarrollaron métodos empíricos y correcciones heurísticas basadas en ajustes aplicados a las curvas de propagación homogéneas. Estas técnicas introducen factores correctivos asociados a transiciones tierra-mar o a variaciones moderadas de las propiedades eléctricas del suelo, apoyándose en resultados experimentales obtenidos en campañas de medida y en estudios clásicos de propagación superficial. Los trabajos pioneros de Norton sobre la propagación de ondas electromagnéticas sobre superficies conductoras imperfectas sentaron las bases para muchas de estas aproximaciones prácticas [25]. Aunque estos métodos permiten capturar de forma aproximada ciertos efectos de transición, siguen estando limitados por su carácter semiempírico y por la ausencia de un tratamiento completamente consistente de las condiciones de contorno en interfaces múltiples.

Desde el punto de vista electromagnético riguroso, el tratamiento más completo del problema se obtiene mediante formulaciones analíticas integrales derivadas de la solución de Sommerfeld para la radiación sobre una superficie conductora imperfecta [29]. En estas representaciones, el campo electromagnético se expresa como una superposición continua de ondas planas obtenida a partir de integrales espectrales cuya evaluación requiere técnicas avanzadas de análisis complejo, como la integración de contorno o los métodos asintóticos de punto de silla [32]. Trabajos posteriores en teoría electromagnética aplicada, como los desarrollados por Felsen y Marcuvitz en el estudio general de radiación y dispersión de ondas, han ampliado este marco matemático para abordar problemas de

propagación en medios estratificados o con propiedades variables. Asimismo, investigaciones más recientes sobre modelado adaptado al problema han destacado la importancia de seleccionar representaciones matemáticas acordes con la estructura física del entorno de propagación [18]. Aunque estos métodos proporcionan una descripción físicamente rigurosa del fenómeno, su elevada complejidad matemática y su coste computacional limitan su utilización directa en estudios sistemáticos de planificación radioeléctrica, siendo empleados principalmente como soluciones de referencia o para la validación de modelos aproximados.

Entre los enfoques que buscan equilibrio entre rigor físico y viabilidad operativa destacan los métodos basados en la segmentación del trayecto de propagación. En este planteamiento, el enlace radioeléctrico se divide en una sucesión de tramos individualmente homogéneos, cada uno caracterizado por sus propios parámetros eléctricos del terreno [4]. Sobre cada sección se aplica la solución correspondiente al medio local, mientras que el desafío fundamental consiste en establecer un procedimiento coherente para combinar las contribuciones de los distintos segmentos sin violar las condiciones de continuidad del campo electromagnético en las interfaces. Este tipo de aproximación permite capturar fenómenos característicos de los trayectos mixtos, como la degradación progresiva del campo en medios de baja conductividad o la posible recuperación parcial de la señal al atravesar regiones más conductoras. En consecuencia, la segmentación del trayecto constituye el marco conceptual sobre el que se desarrollan los métodos de integración por tramos capaces de preservar propiedades físicas fundamentales, como la reciprocidad del enlace y la coherencia global del campo propagado [9], [18].

Desde una perspectiva comparativa, puede observarse que cada uno de estos enfoques responde a diferentes compromisos entre precisión física y complejidad de cálculo. El modelo de terreno equivalente destaca por su simplicidad y aplicabilidad inmediata, aunque a costa de una representación física limitada. Las correcciones empíricas introducen mejoras prácticas en determinados escenarios, pero carecen de una fundamentación electromagnética completamente general. Por otro lado, las formulaciones integrales exactas representan el máximo rigor teórico, aunque su aplicación directa resulta poco viable en problemas de planificación extensiva. En este contexto, los métodos basados en la segmentación del trayecto ofrecen una solución intermedia especialmente adecuada para el tratamiento de trayectos definidos por múltiples medios homogéneos. Esta aproximación constituye la base conceptual de diversos procedimientos de cálculo desarrollados para la propagación sobre terrenos no uniformes, entre los cuales destaca el método de Millington, cuyo fundamento teórico y formulación matemática se analizan en el apartado siguiente.

### *2.4.3 Método de Millington*

El método de Millington constituye una de las soluciones prácticas más utilizadas para abordar el problema de la propagación por onda de superficie sobre trayectos no homogéneos. Fue introducido por G. Millington en 1949 con el objetivo de estimar la intensidad de campo sobre una tierra lisa compuesta por regiones con diferentes propiedades eléctricas del terreno [33]. Este método fue desarrollado específicamente para situaciones en las que la onda electromagnética atraviesa múltiples medios con constantes dieléctricas distintas, permitiendo integrar de forma coherente las discontinuidades presentes en el terreno.

Su relevancia es especialmente notable en el diseño de sistemas que operan en las bandas de LF, MF y parte de HF, donde la propagación por onda de superficie constituye el mecanismo dominante de transmisión [9]. En particular, el método resulta fundamental en la planificación de enlaces radioeléctricos en entornos costeros, donde las transiciones tierra-mar introducen variaciones bruscas en la conductividad del suelo y, por tanto, en la impedancia superficial del medio de propagación [18]. Una de sus principales virtudes técnicas es que, a diferencia de aproximaciones más simples, permite mantener la coherencia física del enlace y garantizar el cumplimiento del principio de reciprocidad.

### 2.4.3.1 Fundamento teórico

El problema fundamental que aborda el método de Millington surge de la limitación inherente a los modelos homogéneos de propagación, como el descrito en la Recomendación ITU-R P.368, que asumen una Tierra lisa caracterizada por parámetros eléctricos constantes a lo largo de todo el trayecto [4]. Sin embargo, en escenarios reales el terreno presenta una variabilidad significativa en sus propiedades electromagnéticas, especialmente en trayectos costeros o marítimos donde se alternan regiones de tierra, estuarios o mar abierto. Estas variaciones se manifiestan principalmente en cambios de la conductividad ( $\sigma$ ) y de la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ), lo que impide representar el trayecto completo mediante una única curva de propagación homogénea [18].

Un concepto clave en este contexto es la denominada dependencia histórica del campo electromagnético. La intensidad de campo en un punto determinado no depende únicamente de las características locales del medio, sino también de los medios atravesados previamente por la onda durante su propagación [9]. Como consecuencia, el orden en el que se suceden los distintos tipos de terreno adquiere una importancia fundamental. Por ejemplo, un trayecto mar-tierra no produce la misma distribución de campo que un trayecto tierra-mar, aun cuando la distancia total y los medios involucrados sean idénticos. Este comportamiento puede dar lugar a fenómenos característicos como la recuperación parcial de la señal cuando la onda pasa de un medio pobremente conductor a un altamente conductor, efecto comúnmente asociado al método Millington [9].

La idea central propuesta por Millington consiste en calcular la propagación considerando ambos sentidos del trayecto y combinar posteriormente los resultados obtenidos [33]. Este procedimiento garantiza que el enlace radioeléctrico cumpla el principio de reciprocidad, según el cual la intensidad de campo producida en un punto B por una fuente situada en A debe ser igual a la que se obtendría en A si la fuente se situara en B. Para aplicar este método, el trayecto de propagación se divide en una sucesión de tramos individualmente homogéneos, cada uno caracterizado por su longitud  $d_i$  y por los parámetros eléctricos del terreno correspondientes ( $\sigma_i, \epsilon_i$ ).

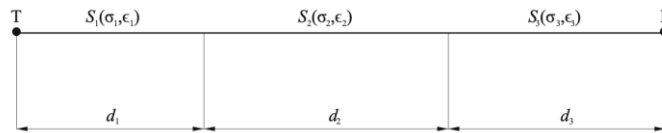


**Figura 2-2. Ejemplo de trayecto de propagación sobre terreno no homogéneo según la Recomendación ITU-R P.368 [4].**

De forma general, si el trayecto total se compone de  $n$  segmentos homogéneos, su longitud puede expresarse como (2-24):

$$d = \sum_{i=1}^n d_i \quad (2 - 24)$$

Esta segmentación permite aplicar el modelo de propagación homogénea a cada tramo individual y posteriormente combinar los resultados para estimar la intensidad de campo a lo largo de todo el trayecto.

### 2.4.3.2 Formulación matemática

La implementación matemática del método de Millington se basa en el cálculo de la intensidad de campo que se obtendría si el trayecto completo estuviera formado por un único tipo de terreno. Para cada tramo  $i$ , se define la función  $E_i(d)$ , que representa la intensidad de campo a una distancia  $d$  suponiendo que todo el trayecto desde el transmisor hasta ese punto estuviera compuesto por un medio homogéneo con las características eléctricas del segmento  $i$ . Estos valores se obtienen a partir de las curvas de intensidad de campo definidas en la Recomendación ITU-R P.368 [4].

El cálculo de campo eléctrico sobre un trayecto heterogéneo se realiza mediante dos evaluaciones independientes. En primer lugar, se calcula la intensidad de campo considerando el sentido directo de propagación, desde el transmisor hacia el receptor. Para ilustrar el procedimiento, puede considerarse un trayecto compuesto por tres tramos homogéneos de longitudes  $d_1, d_2, d_3$ . En este caso, el campo eléctrico calculado desde el transmisor se expresa como (2-25):

$$E_T = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) \quad (2 - 25)$$

Posteriormente se realiza el cálculo inverso, considerando el trayecto en sentido contrario, es decir, desde el receptor hacia el transmisor. En este caso el orden de los medios se invierte, obteniéndose la expresión (2-26):

$$E_R = E_3(d_3) - E_2(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_1(d_3 + d_2) + E_1(d_3 + d_2 + d_1) \quad (2 - 26)$$

Finalmente, la intensidad de campo sobre el trayecto heterogéneo se obtiene como el promedio aritmético de ambos resultados (2-27):

$$E_X = \frac{E_T + E_R}{2} \quad (2 - 27)$$

Dado que los valores de intensidad de campo se manejan habitualmente en decibelios, este promedio se realiza directamente en escala logarítmica. Desde el punto de vista físico, esta operación permite compensar las discrepancias generadas por el orden de los medios atravesados, proporcionando una estimación más consistente con el comportamiento real de la onda de superficie sobre terrenos no homogéneos [33]. Cabe mencionar que en este trabajo se buscará validar la intensidad de campo en ambos sentidos y la ecuación (2-27) no se aplicará.

#### 2.4.3.3 Aplicación práctica al cálculo del campo eléctrico

En aplicaciones de ingeniería radioeléctrica, la implementación del método Millington se realiza mediante una secuencia de pasos claramente definida. En primer lugar, se determina el trayecto de propagación entre el transmisor y el receptor utilizando cartografía geográfica o bases de datos digitales del terreno. A continuación, el trayecto se divide en segmentos homogéneos en función de la naturaleza del suelo, identificando regiones con propiedades eléctricas similares.

Una vez realizada esta segmentación, se asignan a cada tramo los valores correspondientes de conductividad y permitividad relativa del terreno, obtenidos a partir de las clasificaciones normalizadas o del atlas de conductividad del suelo [26], [27]. Posteriormente, se emplean las curvas de intensidad de campo definidas en la Recomendación ITU-R P.368 para calcular los valores  $E_i(d)$  necesarios en cada uno de los segmentos [4]. Finalmente, se aplican las expresiones del método de Millington para obtener el campo eléctrico resultante sobre el trayecto completo.

Este procedimiento constituye una herramienta fundamental en la planificación radioeléctrica de servicios que operan en bandas de baja frecuencia, como sistemas de radiodifusión en onda media, comunicaciones marítimas o enlaces costeros de gran alcance [9]. Entre las principales ventajas del método destacan su consistencia física, su capacidad para incorporar la influencia de diferentes tipos de terreno y su relativa simplicidad de implementación en algoritmos de cálculo.

No obstante, el método presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas en su aplicación práctica. Al basarse en el modelo de propagación homogénea de la Recomendación ITU-R P.368, se asume implícitamente una Tierra lisa, por lo que no se tienen en cuenta efectos asociados al relieve del terreno o a la difracción producida por obstáculos geográficos [4]. Asimismo, la precisión final del cálculo depende en gran medida de la calidad de los datos de conductividad del suelo y de una segmentación adecuada del trayecto, ya que una discretización demasiado grosera podría omitir transiciones relevantes en las propiedades electromagnéticas del terreno [18].

Finalmente, el procedimiento descrito constituye la base conceptual del algoritmo implementado en la herramienta desarrollada en el presente trabajo, la cual automatiza el método de Millington combinado con las curvas de propagación de la Recomendación ITU-R P.368.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Metodología de cálculo del campo eléctrico

#### 3.1.1 Definición del escenario de propagación

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una herramienta gráfica que permita estimar el campo eléctrico recibido en enlaces radioeléctricos que emplean propagación por onda de superficie. En particular, el estudio se centra en escenarios situados en la península ibérica y los archipiélagos de Baleares y Canarias, donde este tipo de propagación resulta especialmente relevante en las comunicaciones marítimas entre estaciones situadas en tierra y unidades desplegadas en la mar.

Dentro de este contexto destacan las estaciones radionavales de la Armada, distribuidas a lo largo del territorio nacional para proporcionar cobertura radioeléctrica a las unidades navales. Entre ellas se encuentran las estaciones de Ferrol, Rota, Guardamar del Segura, Cartagena, Canarias y Bermeja, que permiten establecer enlaces radioeléctricos con buques a distintas distancias de la costa.

La metodología desarrollada en este trabajo permite realizar simulaciones de enlaces radioeléctricos asociados a cualquiera de estas estaciones radionavales, lo que permite analizar la cobertura radioeléctrica generada por las mismas y estimar el campo eléctrico recibido por unidades navales desplegadas en la mar. Como ejemplo representativo, puede considerarse el caso de una comunicación entre la estación de Bermeja y una fragata de la clase F-100, analizando cómo varía la intensidad de campo eléctrico recibida por el buque a medida que aumenta la distancia a la estación transmisora.

Además, el modelo desarrollado no se limita únicamente al análisis de comunicaciones desde tierra hacia el mar. Debido a la naturaleza del fenómeno de propagación considerado, también es posible estudiar el caso inverso, es decir, comunicaciones desde unidades navales hacia estaciones situadas en tierra. De este modo, la herramienta permite analizar tanto enlaces tierra-mar como mar-tierra, lo que resulta de gran utilidad para el estudio de la cobertura radioeléctrica en ambos sentidos de la comunicación.

Por otra parte, aunque el estudio se centra en estaciones radionavales de la Armada, la metodología desarrollada puede aplicarse igualmente a otras estaciones radioeléctricas que operan en bandas VLF, LF, MF y HF dentro del territorio español, incluyendo estaciones costeras utilizadas en comunicaciones marítimas civiles. De este modo, el modelo planteado permite analizar distintos escenarios de comunicación marítima tanto en el ámbito militar como en el civil.

La localización geográfica de España refuerza la relevancia de este tipo de estudios. La península ibérica presenta una extensa línea de costa que se extiende a lo largo del océano Atlántico, el mar Cantábrico y el mar Mediterráneo, a lo que se suman los archipiélagos de Baleares y Canarias. Esta

configuración geográfica favorece la existencia de numerosos enlaces radioeléctricos entre estaciones situadas en tierra y unidades desplegadas en la mar, lo que hace que el análisis de propagación por onda de superficie resulte especialmente pertinente en el contexto español.

No obstante, aunque el presente trabajo toma como referencia escenarios situados en el territorio español, la herramienta desarrollada no se limita a esta región geográfica. El simulador permite incorporar distintos tipos de terreno y definir nuevos escenarios de propagación, lo que posibilita su aplicación a cualquier zona geográfica. Mediante la inclusión de nuevos mapas y la definición de terrenos adicionales, es posible adaptar el modelo a diferentes entornos y realizar simulaciones de enlaces radioeléctricos en cualquier región del mundo.

### 3.1.2 Segmentación del trayecto en secciones homogéneas

Para el cálculo del campo eléctrico mediante los modelos de propagación considerados, el trayecto entre transmisor y receptor se representa como una sucesión de secciones homogéneas, cada una caracterizada por unas propiedades eléctricas del terreno constantes. Esta representación permite modelar adecuadamente la propagación de la onda de superficie teniendo en cuenta las características del medio sobre el que se produce la propagación.

Considerando las características geográficas del territorio español y los escenarios de comunicaciones marítimas analizados en este trabajo, se han seleccionado tres tipos de terreno representativos: mar, tierra húmeda y tierra seca. Estos tipos de superficie permiten describir la mayoría de las situaciones de propagación presentes en enlaces entre estaciones costeras y unidades desplegadas en la mar. Cada terreno se caracteriza mediante dos parámetros eléctricos fundamentales: la permitividad relativa del medio y su conductividad eléctrica, cuyos valores se muestran en la tabla 3-1.

| Medio         | Conductividad ( $\sigma$ ) | Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) |
|---------------|----------------------------|----------------------------------------|
| Mar           | 5 S/m                      | 70                                     |
| Tierra húmeda | 1 mS/m                     | 30                                     |
| Tierra seca   | 0.03 mS/m                  | 7                                      |

**Tabla 3-1. Valores conductividad y permitividad relativa según ITU-R P.832 [26].**

### 3.1.3 Aplicación de las curvas ITU-R a cada sección

El cálculo del campo eléctrico se realiza a partir de las curvas de propagación por onda de superficie recogidas en la Recomendación ITU-R P.368, que permiten estimar la intensidad de campo eléctrico en función de la distancia para diferentes tipos de terreno en las bandas VLF, LF, MF y HF [4]. En este trabajo, los valores de campo eléctrico se obtienen mediante el programa GRWAVE, una herramienta desarrollada para el cálculo de propagación por onda de superficie que implementa los modelos descritos en dicha recomendación [34].

GRWAVE es un programa desarrollado originalmente en FORTRAN y diseñado para su ejecución en entornos MS-DOS, ampliamente utilizado en estudios de propagación radioeléctrica para el cálculo preciso de la intensidad de campo sobre superficies terrestres o marítimas. Para la obtención de los resultados, el programa requiere como parámetros de entrada la frecuencia de operación, la distancia entre transmisor y receptor, la altura de las antenas transmisora y receptora, así como las propiedades eléctricas del terreno, definidas mediante su conductividad y permitividad relativa.

Las curvas proporcionadas por la Recomendación ITU-R P.368 se encuentran definidas para unas condiciones de referencia normalizadas. En particular, se considera un transmisor representado por un monopolo vertical corto situado sobre la superficie terrestre y una potencia radiada de 1 kW. Bajo estas

condiciones, el campo eléctrico de referencia a una distancia de 1 km del transmisor es de 300 mV/m, lo que permite establecer una base común para el análisis de la propagación [4].

Dado que estas curvas están normalizadas para una potencia radiada de 1 kW, los valores de campo eléctrico obtenidos representan la intensidad de campo correspondiente a dicha potencia de referencia. En caso de considerar transmisores con potencias diferentes, el campo eléctrico puede ajustarse posteriormente en función de la potencia radiada efectiva del sistema transmisor.

En el modelo desarrollado en este trabajo, las curvas de propagación se aplican para cada uno de los tipos de terreno considerados en el apartado anterior, permitiendo obtener la variación del campo eléctrico en función de la distancia para cada superficie analizada. Estos resultados constituyen la base para el cálculo del campo eléctrico en trayectos donde el medio de propagación presenta diferentes características a lo largo del recorrido.

Los valores de campo eléctrico obtenidos a partir de las curvas de propagación ITU-R para cada tipo de terreno constituyen los datos de entrada utilizados en la aplicación del método de Millington [33], que se describe en el apartado siguiente.

### *3.1.4 Implementación del método de Millington*

El método de Millington permite estimar la intensidad de campo en trayectos heterogéneos combinando los resultados correspondientes a las distintas secciones homogéneas del recorrido.

En el modelo desarrollado se utiliza la formulación del método de Millington en sentido transmisor-receptor para representar la evolución del campo eléctrico a lo largo del trayecto. Esta formulación se aplica utilizando la expresión del método previamente introducida en la ecuación (2-25) [4]. El uso de esta expresión permite representar con claridad cómo varía el campo eléctrico con la distancia y observar directamente el efecto de los cambios de terreno sobre la propagación.

En los escenarios analizados se estudian tanto el trayecto transmisor-receptor como el trayecto receptor-transmisor, lo que permite comparar los resultados obtenidos en ambos sentidos de propagación. A partir de este análisis es posible evaluar las condiciones del enlace radioeléctrico y determinar la potencia radiada necesaria en las antenas para que se puedan establecer las comunicaciones entre las estaciones consideradas.

### *3.1.5 Obtención del campo eléctrico total*

Una vez aplicado el método de Millington, se obtiene la evolución del campo eléctrico a lo largo del trayecto de propagación teniendo en cuenta las diferentes secciones de terreno consideradas en el enlace. Los valores obtenidos mediante este procedimiento se encuentran normalizados para las condiciones de referencia empleadas en las curvas de propagación de la Recomendación ITU-R P.368, las cuales están definidas para una Potencia Radiada Aparente Vertical Corta (PRAVC) de 1 kW [4].

Sin embargo, en un sistema de transmisión real la potencia radiada por el transmisor puede diferir de esta condición de referencia. Para obtener una estimación más representativa del campo eléctrico correspondiente al sistema considerado, es necesario ajustar el resultado en función de la potencia radiada efectiva del transmisor.

En el modelo desarrollado, la potencia introducida por el usuario se expresa en términos de Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE), que incluye tanto la potencia suministrada al transmisor como la ganancia de la antena [22]. La relación aproximada entre la PIRE y la potencia de referencia utilizada en las curvas de propagación puede expresarse mediante la siguiente relación (3-1):

$$PRVAC = \frac{PIRE}{3} \quad (3-1)$$

Dado que los valores de campo eléctrico se expresan en dBμV/m, la corrección correspondiente a la potencia radiada se aplica mediante una relación logarítmica [35]. De este modo, el campo eléctrico total puede obtenerse a partir del campo calculado mediante el método de Millington aplicando la siguiente expresión (3-2):

$$E_{total} = E_{Millington} + 10 \log_{10} \left( \frac{PIRE}{3} \right) \quad (3 - 2)$$

donde  $E_{Millington}$  representa el campo eléctrico obtenido tras la aplicación del método de Millington, expresado en dBμV/m y PIRE es la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente del transmisor expresada en kW.

De este modo se obtiene finalmente una estimación del campo eléctrico total recibido en el receptor, teniendo en cuenta tanto los efectos de propagación asociados al terreno como la potencia efectiva radiada por el sistema transmisor.

### 3.1.6 Consideraciones numéricas y supuestos adoptados

El modelo desarrollado en este trabajo considera exclusivamente la propagación por onda de superficie como mecanismo de transmisión de la señal radioeléctrica. Por tanto, los resultados obtenidos se basan en los modelos descritos en la Recomendación ITU-R P.368, siendo válidos para el estudio de enlaces en bandas VLF, LF, MF y HF donde este tipo de propagación resulta dominante [4]. No se tienen en cuenta otros mecanismos posibles de propagación, como la propagación ionosférica o la propagación por onda espacial.

Para la definición de los escenarios de simulación se ha considerado el territorio español como área de estudio. El mapa utilizado corresponde a una circunferencia de aproximadamente 2500 km de radio centrada en Madrid, lo que permite cubrir el alcance típico de las comunicaciones en bandas VLF, LF, MF y HF empleadas por la Armada [14]. De este modo, los escenarios analizados en este trabajo representan simulaciones de comunicaciones utilizadas por la Armada, incluyendo enlaces entre estaciones situadas en tierra y unidades navales desplegadas en la mar.

El mapa del terreno ha sido obtenido a partir de modelos digitales de elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) descargados a través de la plataforma EarthExplorer del U.S. Geological Survey (USGS) [36]. Esta plataforma permite acceder a datos topográficos de diferentes regiones del mundo, lo que facilita la obtención de perfiles de terreno necesarios para el cálculo de la propagación. Gracias a ello, el modelo desarrollado puede adaptarse fácilmente a otros escenarios geográficos, descargando nuevos mapas SRTM desde la misma plataforma y sustituyendo el área de estudio utilizada en este trabajo.

El terreno se representa mediante secciones homogéneas discretizadas, de forma que cada tramo del trayecto se caracteriza por unas propiedades eléctricas constantes. En el modelo desarrollado se han considerado tres tipos de superficie representativos: mar, tierra húmeda y tierra seca. La clasificación del terreno se realiza a partir de la información de elevación obtenida del mapa utilizado en el programa. En particular, cuando la altura del terreno es inferior a 5 metros sobre el nivel del mar se considera que la propagación se realiza sobre el mar, mientras que el resto de valores se clasifican como tierra seca. Adicionalmente, se considera una franja de 20 kilómetros de terreno antes de la costa como tierra húmeda, con el objetivo de representar de forma aproximada la transición entre la superficie terrestre y el medio marino. Estas condiciones han sido adoptadas para el estudio de los escenarios considerados en este trabajo, aunque el modelo permite modificar estos criterios o introducir nuevos tipos de terreno en función del escenario de propagación analizado.

En el programa desarrollado se definen además una serie de parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del modelo de cálculo implementado mediante GRWAVE [34]. En particular, se establece una distancia mínima de cálculo de 10 kilómetros, mientras que la distancia máxima considerada se fija como 1,1 veces la distancia total del enlace, valores necesarios para garantizar el

correcto funcionamiento del algoritmo de cálculo del programa. Asimismo, la polarización de la antena se considera vertical, de acuerdo con las condiciones de referencia utilizadas en las curvas de propagación por onda de superficie [4]. No obstante, el modelo permite modificar este parámetro para considerar polarización horizontal, lo que posibilita la realización de estudios comparativos entre ambos tipos de polarización.

Para la definición del escenario de propagación, el usuario debe introducir determinados parámetros de entrada en el programa. En primer lugar, se requiere un archivo KML procedente de Google Earth, que permita definir el trayecto del enlace radioeléctrico entre el transmisor y el receptor. A partir de este archivo se obtiene el perfil del terreno y la información necesaria para segmentar el trayecto en las distintas secciones homogéneas utilizadas en el modelo. Además, el usuario debe introducir la frecuencia de operación, la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) del transmisor y las alturas de las antenas transmisora y receptora. A partir de estos parámetros, el resto del proceso de cálculo se realiza de forma automática mediante el algoritmo implementado en el programa.

Finalmente, el modelo desarrollado constituye un modelo determinista de predicción de la intensidad de campo eléctrico, basado en los modelos de propagación descritos en la Recomendación ITU-R P.368. Como consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como estimaciones del comportamiento del enlace radioeléctrico bajo las condiciones consideradas. El modelo no tiene en cuenta factores adicionales que puedan influir en la propagación real de la señal, como irregularidades del terreno, variaciones atmosféricas, estado de la superficie marina o presencia de obstáculos en el trayecto de propagación. A pesar de estas limitaciones, el modelo resulta adecuado para analizar la influencia del terreno y de la distancia en la propagación por onda de superficie y para estimar el campo eléctrico recibido en escenarios de comunicaciones marítimas.

## 3.2 Desarrollo de la herramienta en MATLAB

### 3.2.1 Requisitos funcionales de la herramienta

Con el objetivo de analizar enlaces radioeléctricos mediante propagación por onda de superficie sobre trayectos reales, se ha desarrollado una herramienta de simulación en MATLAB capaz de integrar información geográfica del terreno, modelos de propagación electromagnética y el método de Millington para trayectos mixtos.

A partir de este objetivo, se definieron los siguientes requisitos funcionales que debía cumplir la herramienta desarrollada.

- **Definición del trayecto de enlace:** La herramienta debe permitir definir el trayecto del enlace radioeléctrico entre transmisor y receptor mediante coordenadas geográficas. Para ello se utiliza un archivo KML, generado mediante Google Earth, que contiene la trayectoria del enlace definida mediante una serie de puntos geográficos [37]. Este formato permite representar fácilmente trayectos reales y facilita la integración de datos geográficos en el proceso de simulación.
- **Introducción de parámetros del enlace:** El simulador debe permitir al usuario introducir los parámetros radioeléctricos principales que caracterizan el enlace de comunicaciones. En particular, la herramienta permite definir:
  - la frecuencia de transmisión,
  - la altura de la antena transmisora,
  - la altura de la antena receptora,
  - la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE).

Estos parámetros son necesarios para calcular la intensidad de campo eléctrico mediante los modelos de propagación utilizados.

- **Obtención automática del perfil del terreno:** El modelo de propagación por onda de superficie depende fuertemente de las propiedades eléctricas del terreno, especialmente de su conductividad y permitividad relativa. Por este motivo, el simulador debe identificar automáticamente el tipo de terreno presente a lo largo del trayecto. En la herramienta desarrollada se consideran tres tipos principales de terreno:

- mar,
- tierra húmeda,
- tierra seca.

Cada uno de estos tipos de terreno se asocia a valores característicos de conductividad y permitividad, que se utilizan posteriormente en el cálculo de la propagación.

- **Cálculo de propagación sobre terrenos homogéneos:** La herramienta debe ser capaz de calcular la intensidad de campo eléctrico correspondiente a cada tipo de terreno considerado de forma homogénea. Para ello se emplea el programa GRWAVE [34], que permite calcular la propagación de onda de superficie sobre una Tierra esférica teniendo en cuenta las propiedades eléctricas del suelo.
- **Cálculo de propagación en trayectos mixtos:** Cuando el trayecto del enlace atraviesa diferentes tipos de terreno, el simulador debe ser capaz de estimar el campo eléctrico resultante teniendo en cuenta dichas variaciones. Para ello se implementa el método de Millington, ampliamente utilizado para estimar la propagación de ondas de superficie en trayectos compuestos por varios medios con propiedades eléctricas distintas [33]. Este método combina las curvas de propagación correspondientes a cada terreno homogéneo para obtener una estimación del campo eléctrico a lo largo del trayecto completo.
- **Obtención del campo eléctrico real del enlace:** El campo eléctrico calculado mediante los modelos de propagación se obtiene inicialmente para una potencia de referencia. Para ello, la herramienta debe permitir ajustar el resultado a la potencia real de transmisión del sistema. Para este propósito se aplica una corrección basada en la PIRE introducida por el usuario. De esta forma se obtiene una estimación del campo eléctrico real esperado en el receptor para las condiciones de transmisión especificadas.
- **Visualización de resultados:** La herramienta debe proporcionar una representación gráfica de los resultados obtenidos, permitiendo visualizar tanto la evolución del campo eléctrico como las características del terreno a lo largo del trayecto. En particular, el simulador debe mostrar:
  - las curvas de propagación correspondientes a cada tipo de terreno homogéneo,
  - la curva de campo eléctrico obtenida mediante el método Millington,
  - la curva de campo eléctrico corregida según la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE),
  - el perfil de elevación del terreno a lo largo del trayecto,
  - el valor del campo eléctrico estimado en el receptor mediante el método Millington,
  - el valor del campo eléctrico en el receptor corregido según la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE),
  - la distancia total del enlace entre el transmisor y el receptor.

Esta representación gráfica facilita el análisis del comportamiento del enlace radioeléctrico.

- **Almacenamiento de resultados:** Finalmente, la herramienta debe permitir almacenar los resultados de cada simulación para su posterior análisis. Para ello se guardan los datos relevantes del cálculo,

incluyendo las curvas de campo eléctrico, el perfil del terreno y los parámetros del enlace. Esto permite recuperar simulaciones previas sin necesidad de repetir el proceso completo de cálculo.

### 3.2.2 Arquitectura general del software

El software desarrollado para la simulación de la propagación por onda de superficie se ha estructurado siguiendo una arquitectura modular, como se muestra en la Figura 3-1. Esta organización permite separar las diferentes tareas del proceso de simulación, tales como la obtención de los datos geográficos del trayecto, el cálculo de las curvas de propagación y la visualización de los resultados. De este modo, cada módulo del programa se encarga de realizar una función específica dentro del sistema.

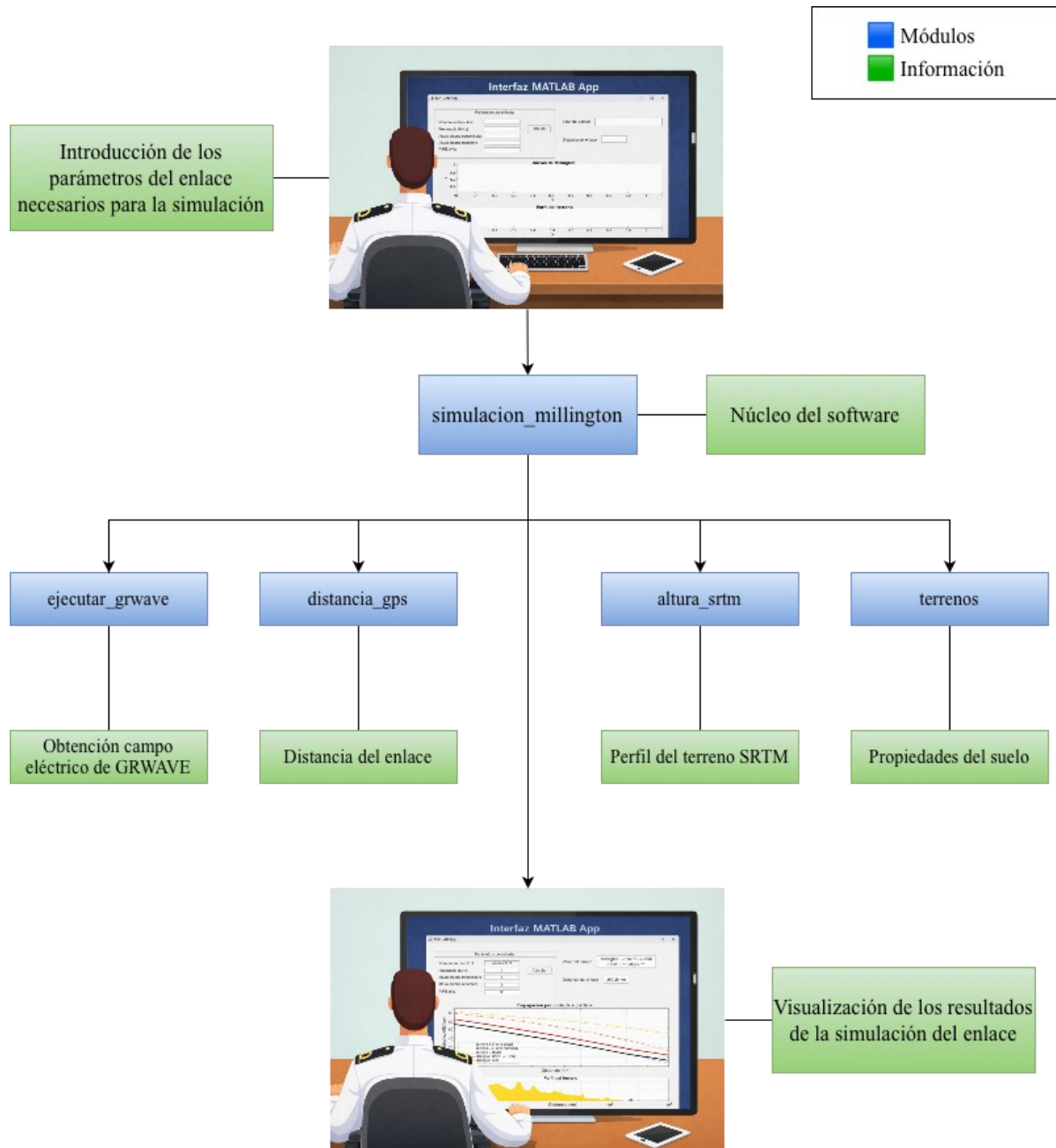


Figura 3-1. Arquitectura general del software (IA).

El núcleo del software está constituido por la función *simulacion\_millington*, que actúa como elemento central del simulador. Esta función coordina la ejecución de los distintos módulos auxiliares encargados de procesar la información necesaria para el cálculo del campo eléctrico y su representación.

El funcionamiento del programa comienza con la introducción de los parámetros del enlace a través de la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB App Designer. A partir de estos datos, el sistema genera el trayecto geográfico del enlace, obtiene el perfil de elevación del terreno y determina las propiedades del suelo a lo largo del recorrido. Posteriormente se calculan las curvas de propagación mediante el programa GRWAVE y se aplica el método de Millington para obtener el campo eléctrico correspondiente al enlace considerado [31] [32]. Finalmente, los resultados de la simulación se representan gráficamente en la interfaz de usuario.

### 3.2.3 Descripción de los módulos de cálculo

En este apartado se describen los distintos módulos que componen la herramienta de simulación desarrollada. En primer lugar, se analizan las funciones auxiliares encargadas de realizar tareas específicas del proceso de cálculo, como la obtención de datos geográficos, el cálculo de distancias o la ejecución del modelo de propagación. Finalmente, se describe la función principal *simulacion\_millington*, que actúa como núcleo del simulador e integra el funcionamiento de los módulos anteriores.

#### 3.2.3.1 Módulo de cálculo de la propagación

La función *ejecutar\_grwave* constituye el módulo encargado de realizar el enlace entre el código desarrollado en este trabajo y el programa externo GRWAVE, utilizado para el cálculo de la propagación por onda de superficie [34]. Concretamente, esta función se encarga de generar de forma automática el archivo de entrada requerido por el programa, denominado *ex.inp*, para cada uno de los terrenos presentes a lo largo del enlace radioeléctrico considerado.

El archivo *ex.inp* contiene los parámetros necesarios para definir el escenario de propagación que será procesado por GRWAVE. En este caso, la función construye dicho archivo dinámicamente en función de los segmentos de terreno que aparecen en el trayecto entre el transmisor y el receptor. De este modo, para cada tipo de terreno presente en el enlace se genera un archivo de entrada específico que permite calcular la intensidad de campo asociada a dicho medio.

En la Figura 3-2 se muestra un ejemplo del archivo de entrada *ex.inp* utilizado por el programa GRWAVE para realizar el cálculo de la propagación por onda de superficie.

```
/ Example input file
HTT 9
HRR 2.5
IPOLRN 1
FREQ 6
SIGMA 0.01
EPSLON 30
dmin 1
dmax 200
dstep 5
go
stop
```

Figura 3-2. Ejemplo de un archivo *ex.inp*.

En primer lugar, se definen las alturas de las antenas transmisora y receptora mediante los parámetros *HTT* y *HRR*, que corresponden a la altura de la antena transmisora y de la antena receptora sobre el terreno en metros, respectivamente.

A continuación, se indica el tipo de polarización de la onda mediante el parámetro *IPOLRN*, cuyo valor permite seleccionar entre polarización vertical (1) u horizontal (2) dependiendo del escenario de simulación.

El parámetro *FREQ* establece la frecuencia de operación del enlace, expresada en MHz, mientras que *SIGMA* representa la conductividad eléctrica del terreno (S/m) y *EPSLON* la permitividad relativa del suelo, parámetros fundamentales para caracterizar las propiedades eléctricas del medio por el que se propaga la onda.

También se definen los parámetros relacionados con el rango de distancias del cálculo. El parámetro *dmin* indica la distancia mínima considerada a partir de la cual el programa comienza a evaluar la intensidad de campo. Este valor se establece para evitar la región próxima al transmisor, donde los efectos de campo cercano y los fenómenos de propagación no se ajustan al modelo de onda de superficie utilizado por el programa.

El parámetro *dmax* representa la distancia máxima considerada en el cálculo del radioenlace, mientras que *dstep* define el incremento de distancia empleado para obtener los distintos valores de intensidad de campo a lo largo del trayecto.

El archivo incluye además instrucciones de control como *go*, que indican al programa que ejecute el cálculo con los parámetros definidos, y *stop*, que marca el final del archivo de entrada.

Una vez generado el archivo *ex.inp*, la función ejecuta el programa GRWAVE, que procesa los parámetros definidos y calcula la evolución de la intensidad de campo eléctrico en función de la distancia. El resultado de esta ejecución se redirige a un archivo de salida denominado *resultado.out*, en el que se almacenan los valores calculados por el modelo.

El archivo *resultado.out* contiene fundamentalmente la relación campo eléctrico-distancia obtenida para el terreno considerado. A partir de este archivo, la función extrae los valores numéricos correspondientes a cada punto de cálculo y los almacena en una matriz de datos, lo que permite su posterior tratamiento dentro del programa principal. Esta matriz constituye la base para el procesamiento posterior del modelo, incluyendo la combinación de resultados para trayectos mixtos y la representación gráfica de la intensidad de campo a lo largo del enlace.

Cabe destacar que el programa GRWAVE dispone de numerosos parámetros adicionales asociados al modelo atmosférico, al control interno del cálculo y a opciones de depuración del programa. Dichos parámetros poseen valores por defecto predefinidos, los cuales son utilizados automáticamente cuando no se especifican explícitamente en el archivo de entrada. Entre ellos se incluyen variables relacionadas con la refractividad troposférica o configuraciones internas del algoritmo de cálculo. Dado que estos parámetros no influyen de forma significativa en el escenario de simulación considerado en este trabajo, se mantienen los valores predeterminados definidos por el propio programa.

De este modo, la función *ejecutar\_grwave* permite automatizar completamente el proceso de generación de los archivos de entrada, ejecución del modelo de propagación y extracción de resultados, facilitando la integración del programa GRWAVE dentro del entorno de simulación desarrollado para el análisis de la propagación por onda de superficie.

### 3.2.3.2 Módulo de cálculo de la distancia del radioenlace

El módulo *distancia\_gps* es el encargado de calcular la distancia geográfica existente entre dos puntos de la superficie terrestre a partir de sus coordenadas geográficas. Este cálculo resulta necesario para determinar la distancia geográfica del enlace radioeléctrico entre el transmisor y el receptor, así como para poder discretizar posteriormente el trayecto de propagación a lo largo del terreno.

Las coordenadas geográficas utilizadas en el programa se obtienen a partir de archivos KML, en los que las posiciones se encuentran expresadas en grados decimales. Sin embargo, para poder utilizar funciones trigonométricas en el cálculo de la distancia geodésica es necesario trabajar en radianes, por lo que las coordenadas de latitud y longitud se convierten previamente de grados a radianes.

Dado que la superficie terrestre puede aproximarse mediante una esfera de radio medio constante, la distancia entre dos puntos sobre la Tierra no puede calcularse mediante una relación euclídea en un plano. En su lugar, es necesario determinar la distancia geodésica, es decir, la distancia correspondiente al arco de circunferencia máxima que une ambos puntos sobre la superficie de la esfera.

Para este cálculo se emplea la conocida fórmula de Haversine, ampliamente utilizada en navegación y geolocalización para determinar la distancia entre dos puntos definidos por sus coordenadas

geográficas [38]. Esta formulación permite calcular el ángulo central entre los dos puntos sobre la esfera terrestre a partir de sus latitudes y longitudes.

Las expresiones utilizadas son las siguientes (3-3) (3-4):

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (3-3)$$

$$c = 2 \arcsin(\sqrt{a}) \quad (3-4)$$

donde:

- $\varphi_1, \varphi_2$  representan las latitudes de los dos puntos en radianes.
- $\lambda_1, \lambda_2$  representan las longitudes de los dos puntos en radianes
- $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  es la diferencia de latitud.
- $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  es la diferencia de longitud.
- $c$  es el ángulo central entre los dos puntos sobre la esfera terrestre en radianes.

Una vez obtenido este ángulo central, la distancia geodésica entre ambos puntos se calcula mediante la relación:

$$d = R \cdot c \quad (3-5)$$

donde:

- $d$  es la distancia entre los dos puntos sobre la superficie terrestre en metros
- $R$  es el radio medio de la Tierra, considerado aproximadamente igual a 6371000 m.
- $c$  es el ángulo central obtenido mediante la fórmula de Haversine en radianes.

Esta expresión corresponde a la longitud del arco de circunferencia máxima que conecta ambos puntos sobre la esfera terrestre, proporcionando una estimación muy precisa de la distancia real entre ellos.

El valor de distancia obtenido mediante este procedimiento se expresa en kilómetros y representa la longitud geográfica del enlace radioeléctrico entre el transmisor y el receptor. Este parámetro constituye una referencia fundamental dentro del programa, ya que permite relacionar las coordenadas geográficas de ambos emplazamientos con la distancia real de propagación de la señal sobre la superficie terrestre.

De este modo, el módulo *distancia\_gps* proporciona la base geométrica necesaria para el análisis del enlace radioeléctrico, permitiendo relacionar las coordenadas geográficas de los emplazamientos con la distancia real de propagación de la señal sobre la superficie terrestre.

### 3.2.3.3 Módulo de cálculo de la altura del terreno

El módulo *altura\_srtm* es el encargado de obtener la altitud del terreno en un punto geográfico determinado a partir de sus coordenadas de latitud y longitud. Esta información se obtiene a partir de los datos del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) procedentes de la SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [36], que proporciona datos de elevación de cobertura global mediante medidas de radar interferométrico.

Los datos de elevación obtenidos a partir de la SRTM se distribuyen en archivos raster en formato GeoTIFF, donde cada píxel representa la altitud del terreno respecto al nivel medio del mar en una posición geográfica concreta. Estos archivos se organizan en tiles, es decir, en teselas geográficas que dividen la superficie terrestre en áreas regulares para facilitar su almacenamiento y procesamiento. Cada tile corresponde a una región concreta del terreno y contiene la información de elevación de dicha zona. En este trabajo se utilizan los datos con resolución 1 arc-second, lo que corresponde aproximadamente a una resolución espacial de 30 metros.

El DEM se organiza en tiles geográficos, donde cada archivo cubre un área de  $1^\circ$  de latitud por  $1^\circ$  de longitud sobre la superficie terrestre. Por este motivo, el primer paso del algoritmo consiste en identificar el tile que contiene el punto geográfico solicitado. Para ello se calcula el entero inferior de la latitud y la longitud mediante la función *floor*, lo que permite determinar el cuadrado de  $1^\circ \times 1^\circ$  dentro del cual se encuentra el punto.

Una vez identificado el tile correspondiente, se construye el nombre del archivo GeoTIFF asociado siguiendo la nomenclatura estándar de estos datos. Esta nomenclatura incluye el hemisferio y la coordenada entera del tile mediante prefijo N/S para latitud y E/W para la longitud. A partir de estos valores se genera el nombre del archivo y se construye la ruta completa dentro del directorio donde se almacenan los datos de la SRTM. Si el archivo correspondiente no se encuentra disponible, la función devuelve una altura igual a cero, interpretando dicha situación como una zona correspondiente al mar.

En caso de que el archivo exista, se procede a leer el raster de elevaciones mediante la función *readgeoraster*, que devuelve tanto la matriz de alturas como la referencia espacial geográfica asociada al archivo. Esta referencia permite transformar las coordenadas geográficas de latitud y longitud en la posición correspondiente dentro de la matriz del raster.

Para realizar esta conversión se utiliza la función *geographicToDiscrete*, que determina la fila y columna del píxel que corresponde al punto geográfico solicitado. Finalmente, la altitud del terreno se obtiene extrayendo el valor de elevación almacenado en la matriz del raster en dicha posición.

El valor obtenido representa la altura del terreno en metros sobre el nivel del mar, que es devuelto como resultado de la función. De este modo, el módulo *altura\_srtm* permite obtener de forma automática la altitud del terreno para cualquier punto del trayecto considerado, proporcionando la información topográfica necesaria para el análisis del enlace radioeléctrico.

#### 3.2.3.4 Módulo de cálculo del tipo de terreno

El módulo *terrenos* es el encargado de proporcionar las propiedades eléctricas del terreno necesarias para el cálculo de la propagación por onda de superficie. En particular, el programa requiere conocer la permitividad relativa del terreno ( $\epsilon_r$ ) y su conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), parámetros que determinan el comportamiento de la onda electromagnética durante su propagación sobre la superficie terrestre.

La función recibe como entrada un identificador numérico (id) que representa el tipo de terreno considerado. A partir de este identificador, el módulo devuelve una estructura de datos que contiene el nombre del terreno y sus correspondientes parámetros electromagnéticos: permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) y conductividad ( $\sigma$ ).

En la implementación actual del programa se contemplan tres tipos de terreno: mar, tierra húmeda y tierra seca. A cada uno de ellos se le asignan valores característicos de permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) y conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), que se emplean posteriormente en los cálculos de propagación. Los valores utilizados se han tomado de la Tabla 3-1.

La selección del terreno se realiza mediante una estructura condicional *switch*, que permite asignar de forma directa los parámetros correspondientes a cada tipo de superficie. Si el identificador introducido no corresponde a ninguno de los terrenos definidos, la función genera un error, evitando así el uso de valores no definidos dentro del modelo.

De este modo, el módulo *terrenos* actúa como un repositorio de propiedades electromagnéticas del terreno, proporcionando los parámetros necesarios para los cálculos de propagación y permitiendo que el resto del programa utilice estos valores de forma estructurada y consistente.

#### 3.2.3.5 Módulo de cálculo de propagación heterogénea

El módulo *simulacion\_millington* constituye el núcleo del software de simulación, ya que integra todos los módulos auxiliares y coordina el proceso completo de cálculo de la propagación por onda de

superficie. A partir de la información del trayecto definida en un archivo KML y de los parámetros del enlace introducidos por el usuario, el algoritmo obtiene el perfil del terreno, clasifica los tipos de suelo presentes a lo largo del enlace y calcula el campo eléctrico mediante el método de Millington. Finalmente, se aplica una corrección en función de la  $f$  (PIRE) para obtener el valor real del campo eléctrico en el receptor.

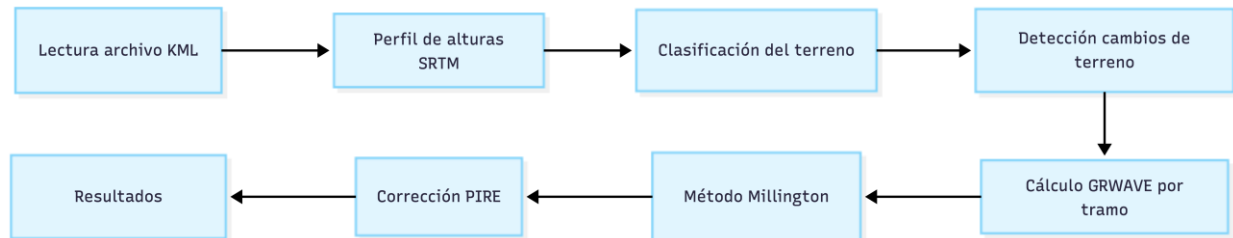


Figura 3-3. Diagrama de flujo del módulo simulacion\_millington.

### Lectura del archivo KML

El proceso de simulación comienza con la lectura del archivo KML que define el trayecto entre el transmisor y el receptor. Este archivo, generado mediante Google Earth, contiene la información geográfica del enlace en formato XML [37]. En particular, las coordenadas que describen la trayectoria del enlace se encuentran dentro de las etiquetas `<coordinates>` del archivo.

El programa analiza el contenido completo del archivo KML y recorre su estructura hasta localizar los elementos asociados a la etiqueta `<coordinates>`. Una vez identificados, se extrae la cadena de texto que contiene las coordenadas geográficas y se separa en los distintos pares de valores correspondientes a la longitud y la latitud. De este modo se obtiene la secuencia de puntos que define el recorrido del enlace radioeléctrico.

Posteriormente, a partir de estas coordenadas se calcula la distancia entre cada par de puntos consecutivos utilizando el módulo *distancia\_gps*, basado en la fórmula de Haversine [38]. La suma de estas distancias permite obtener la longitud total del enlace entre el transmisor y el receptor.

```

<?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="http://www.opengis.net/kml/2.2" xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">
  <Document>
    <name>enlace.kml</name>
    <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">
      <IconStyle>
        <scale>1.1</scale>
        <Icon>
          <href>http://maps.google.com/mapfiles/kml/pushpin/ylw-pushpin.png</href>
        </Icon>
        <hotSpot x="20" y="20" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
      </IconStyle>
    </Style>
    <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="20" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
      </IconStyle>
    </Style>
    <Placemark>
      <name>Ruta sin título</name>
      <styleUrl>#m_ylw-pushpin</styleUrl>
      <LineString>
        <coordinates>
          -4.756737993515111,39.43078511443129,0 -0.009444036941714806,37.12302599091562,0
        </coordinates>
      </LineString>
      <atom:link rel="app" href="https://www.google.com/earth/about/versions/#earth-pro" title="Google Earth Pro 7.3.6.10441"/>
    </Placemark>
  </Document>
</kml>
  
```

Figura 3-4. Ejemplo de archivo KML.

### Perfil de alturas SRTM

Una vez obtenida la distancia total del enlace, el siguiente paso consiste en determinar el perfil topográfico del terreno a lo largo del trayecto entre el transmisor y el receptor. Para ello, el algoritmo

genera un conjunto de puntos intermedios distribuidos a lo largo del enlace con una resolución espacial fija. En la implementación desarrollada se emplea una resolución de 0,5 km, lo que permite obtener un número suficiente de muestras del terreno para caracterizar adecuadamente la topografía del trayecto.

La generación de estos puntos se realiza calculando la trayectoria de gran círculo entre las coordenadas del transmisor y del receptor mediante el modelo geodésico WGS-84 [39]. Este procedimiento permite obtener una secuencia de coordenadas intermedias espaciadas a lo largo del enlace, representadas mediante sus correspondientes valores de latitud y longitud.

Una vez obtenidas estas coordenadas, el programa recorre secuencialmente cada punto del trayecto y consulta su elevación utilizando el módulo *altura\_srtm*. Este módulo proporciona la altura del terreno asociada a cada coordenada geográfica a partir de los datos del modelo digital de elevaciones SRTM [36].

El conjunto de alturas obtenido para todos los puntos generados permite construir el perfil topográfico del enlace, es decir, la variación de la elevación del terreno a lo largo de toda la trayectoria de propagación. Con el fin de evitar irregularidades puntuales en los datos de elevación, el perfil se suaviza posteriormente mediante una media móvil simple.

El resultado final de este proceso es el perfil de alturas del terreno entre el transmisor y el receptor, el cual constituye la base para la posterior clasificación automática de los distintos tipos de terreno presentes a lo largo del enlace.

### **Clasificación del terreno**

Una vez obtenido el perfil de alturas del terreno a lo largo del enlace, el siguiente paso consiste en clasificar automáticamente el tipo de terreno presente en cada punto del trayecto. Esta clasificación es necesaria para asignar a cada tramo del enlace las propiedades eléctricas del suelo, concretamente su conductividad eléctrica y su permitividad relativa, parámetros que intervienen en el cálculo de la propagación de la onda de superficie.

El procedimiento comienza analizando las alturas contenidas en el vector *h\_profile*, que representa la elevación del terreno en cada punto del perfil. En primer lugar, el algoritmo realiza una clasificación inicial basada únicamente en la altura del terreno. Aquellos puntos cuya elevación es muy próxima al nivel del mar se clasifican como mar, mientras que el resto de puntos se consideran inicialmente tierra seca.

Posteriormente, el algoritmo identifica las posiciones correspondientes a zonas de mar y calcula la distancia horizontal entre cada punto del perfil y el punto de mar más cercano. Si la distancia entre un punto de tierra y la zona de mar más próxima es inferior a 20 km, dicho punto se reclasifica como tierra húmeda.

Este procedimiento permite modelar de forma aproximada el efecto de las zonas costeras, donde la presencia de humedad en el suelo provoca que las propiedades eléctricas del terreno difieran de las de la tierra seca. Como resultado del proceso de clasificación, cada punto del perfil queda asociado a uno de los tres tipos de terreno considerados en el modelo: mar, tierra húmeda o tierra seca.

### **Detección de cambios de terreno**

Una vez clasificado el tipo de terreno en cada punto del perfil, el siguiente paso consiste en identificar las posiciones del trayecto donde se produce un cambio en el tipo de suelo. Estos puntos permiten dividir el enlace radioeléctrico en una serie de tramos homogéneos, en los que las propiedades eléctricas se mantienen constantes.

Para realizar esta detección, el algoritmo analiza el vector *tipo\_terreno*, que contiene el tipo de suelo asociado a cada punto del perfil. En MATLAB, la identificación de los cambios se realiza mediante la función *diff*, que calcula la diferencia entre elementos consecutivos de un vector. Cuando el resultado de

esta operación es distinto de cero, significa que entre dos puntos consecutivos se ha producido un cambio en el tipo de terreno.

Posteriormente, se utiliza la función *find* para localizar las posiciones exactas donde se producen estas diferencias. De esta forma se obtienen los índices que marcan las transiciones entre los distintos tipos de suelo presentes a lo largo del trayecto.

A partir de estas posiciones, el enlace se divide en una serie de tramos consecutivos en los que el terreno se mantiene constante. Cada uno de estos tramos se modela posteriormente como un medio homogéneo en el cálculo de la propagación mediante el modelo GRWAVE [34].

### **Cálculo GRWAVE por tramo**

Una vez identificados los tramos homogéneos del enlace, el siguiente paso consiste en calcular la propagación de la onda de superficie para cada uno de ellos. Para ello, el módulo *simulacion\_millington* utiliza el módulo *ejecutar\_grwave*, que actúa como enlace entre el código desarrollado en MATLAB y el programa de propagación GRWAVE.

El módulo *simulacion\_millington* llama al módulo *ejecutar\_grwave* para cada uno de los tipos de terreno presentes en el enlace. A partir de los datos del enlace mencionados anteriormente, *ejecutar\_grwave* realiza el cálculo de propagación mediante el modelo GRWAVE y obtiene la variación del campo eléctrico en función de la distancia.

En cada ejecución se obtiene un archivo *resultado.out* con los datos del campo eléctrico cada 10 km recorridos en el trayecto. Esta información se devuelve a MATLAB en forma de una matriz numérica.

Dentro del módulo *simulacion\_millington*, estas matrices se almacenan en una estructura del tipo *cell array* denominada *data*. Cada elemento de esta estructura contiene la curva completa de propagación calculada por GRWAVE para un tipo de terreno determinado. En cada matriz *data{i}* se almacena la relación distancia-campo eléctrico para todo el rango de distancias considerado en la simulación. Por ejemplo, *data{1}* contendría la curva de propagación correspondiente al primer tipo de terreno presente en el enlace, mientras que *data{2}* almacenaría la curva asociada al segundo terreno identificado.

De esta forma, el algoritmo dispone de las curvas de propagación asociadas a cada tipo de terreno presente en el enlace. Estas curvas se utilizan posteriormente para calcular el campo eléctrico del enlace real mediante el método de Millington.

### **Método de Millington**

Una vez obtenidas las curvas de propagación correspondientes a cada tipo de terreno mediante el modelo GRWAVE, el siguiente paso consiste en calcular el campo eléctrico del enlace real teniendo en cuenta la presencia de distintos tipos de terreno a lo largo del trayecto. Para ello se emplea el método de Millington, que permite estimar la propagación de la onda de superficie en trayectos formados por varios medios con propiedades eléctricas diferentes [33].

En primer lugar, el algoritmo comprueba si el enlace atraviesa un único tipo de terreno o si existen varios tramos con propiedades eléctricas distintas. En el caso de que el trayecto esté formado únicamente por un tipo de suelo, el cálculo se simplifica considerablemente. El campo eléctrico del enlace coincide directamente con la curva de propagación obtenida mediante GRWAVE para ese terreno homogéneo. El algoritmo toma dicha curva y obtiene el valor del campo eléctrico correspondiente a la distancia total del enlace mediante interpolación.

Cuando el enlace atraviesa varios tipos de terreno, es necesario aplicar el método de Millington para combinar las curvas de propagación asociadas a cada medio. Para ello, el algoritmo utiliza las distancias a las que se producen los cambios de terreno a lo largo del trayecto. Estas distancias se obtienen a partir de la longitud de cada tramo homogéneo y se expresan como distancias acumuladas desde el transmisor. De esta forma se determina la posición exacta de los límites entre los distintos terrenos presentes en el enlace.

A partir de esta información, el algoritmo calcula el campo eléctrico a lo largo de un conjunto de distancias distribuidas entre el transmisor y el receptor. Para cada punto considerado se identifica en qué tramo del enlace se encuentra, es decir, qué tipo de terreno corresponde a esa posición. Esta identificación permite determinar qué curvas de propagación deben utilizarse en el cálculo del campo eléctrico.

El campo eléctrico se obtiene aplicando la suma alternante característica del método Millington. Para cada distancia del eje de cálculo se combinan las contribuciones de los distintos terrenos mediante sucesivas operaciones de suma y resta de los campos eléctricos evaluados en las distancias correspondientes a los cambios de terreno. Este procedimiento corresponde a la aplicación directa de la ecuación (2-25), descrita en el capítulo teórico.

Mediante este procedimiento se obtiene la variación del campo eléctrico a lo largo de todo el trayecto considerando la sucesión de terrenos presentes en el enlace. El resultado final es una curva de campo eléctrico en función de la distancia que representa la propagación de la onda de superficie entre transmisor y receptor en condiciones de terreno mixto.

### **Corrección PIRE**

Una vez obtenido el campo eléctrico del enlace mediante el método de Millington, se aplica una corrección que permite adaptar el resultado a la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) real del transmisor. El modelo GRWAVE proporciona las curvas de propagación referidas a una PIRE de 3 kW, por lo que es necesario ajustar el valor del campo eléctrico cuando se emplea una PIRE diferente.

Para realizar esta corrección se aplica la expresión indicada en la ecuación (3-2), que permite calcular la variación del campo eléctrico en función de la PIRE introducida por el usuario. De esta forma, el campo eléctrico obtenido mediante el método de Millington se corrige añadiendo el incremento correspondiente en decibelios.

Como resultado de este proceso se obtienen dos curvas principales: la curva de campo eléctrico calculada mediante el método de Millington para la PIRE de referencia de 3 kW y la curva de campo eléctrico corregida en función de la PIRE especificada. Ambas curvas, junto con las curvas de propagación correspondientes a cada terreno homogéneo, se representan posteriormente en la interfaz gráfica desarrollada, cuya descripción se presenta en el apartado siguiente.

#### **3.2.4 Implementación de las curvas ITU-R en MATLAB**

Las curvas de propagación publicadas en la Recomendación ITU-R P.368 se obtuvieron a partir de cálculos numéricos realizados mediante el programa GRWAVE, desarrollado originalmente para el estudio de la propagación por onda de superficie sobre una Tierra curva con índice de refracción atmosférico decreciente [4] [34]. Este programa permite calcular la intensidad de campo producida por un transmisor en función de la distancia y de las propiedades eléctricas del terreno, constituyendo la base para la generación de las curvas normalizadas utilizadas en la recomendación.

En el simulador desarrollado en este trabajo se utiliza el mismo programa como motor de cálculo para obtener las curvas de propagación correspondientes a distintos tipos de terreno. Para ello, MATLAB genera automáticamente un archivo de entrada que contiene los parámetros necesarios para el cálculo, tales como la frecuencia de operación, las alturas de las antenas transmisora y receptora, el rango de distancias considerado y las propiedades eléctricas del terreno.

Una vez ejecutado el programa, GRWAVE genera un archivo de salida denominado *resultado.out*, que contiene los resultados del cálculo en forma tabulada. En este archivo se muestran, para cada distancia considerada, los valores de la intensidad de campo eléctrico expresados en dB $\mu$ V/m junto con la pérdida básica de transmisión correspondiente. La Figura 3-3 muestra un ejemplo del formato de salida generado por el programa.

```

*****GRWAVE (RELEASE 2 AT 23/10/1985 )*****
*****COPYRIGHT (C) GEC PLC 1985 *****
CCIR Personal Computer| Version 1989 Study Group 5 IWPS/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 = 70.000
      CONDUCTIVITY =5.0000D+00 SIEMENS/METRE

      VERTICAL POLARISATION

      MINIMUM DISTANCE = 10.000 KILOMETRES
      MAXIMUM DISTANCE = 108.012 KILOMETRES
      DSTEP = 10.000 KILOMETRES

      FREQUENCY = 1.000 MHZ

      TRANSMITTER HEIGHT = 8.0 METRES
      RECIEVER HEIGHT = 5.0 METRES

      DISTANCE      FIELD STRENGTH      BASIC TRANSMISSION LOSS
      KM            DB(UV/M)            DB (F)

      10.00         89.44                52.51
      20.00         83.36                58.59
      30.00         79.75                62.20
      33.76         78.70                63.25
                                           (R)

      33.76         78.75                63.20
      38.01         77.69                64.26
      48.01         75.55                66.40
      58.01         73.80                68.15
      68.01         72.29                69.66
      78.01         70.96                70.99
      88.01         69.77                72.18
      98.01         68.68                73.27
      108.01        67.68                74.27

```

**Figura 3-5. Ejemplo de un archivo resultado.out.**

En el simulador implementado, MATLAB lee automáticamente este archivo de salida y extrae las columnas correspondientes a distancia y campo eléctrico, almacenando esta información en una matriz numérica. A partir de estos datos se generan las curvas campo-distancia asociadas a cada tipo de terreno homogéneo, que constituyen la base para el cálculo posterior de la propagación en trayectorias que atraviesan distintos tipos de terreno.

Con el objetivo de representar los resultados de forma equivalente a las curvas publicadas en la Recomendación ITU-R P.368, la representación gráfica se realiza utilizando escala logarítmica en el eje de distancias. Para ello se genera un eje de distancias espaciado logarítmicamente y se interpola el campo eléctrico obtenido de GRWAVE sobre dicho eje. Este procedimiento permite mantener una distribución de puntos similar a la utilizada en las curvas originales de la ITU-R, facilitando la comparación visual entre los resultados del simulador y las curvas de referencia.

### 3.2.5 Interfaz de usuario y visualización de resultados

Con el fin de facilitar la utilización del modelo desarrollado, se implementó una interfaz gráfica de usuario en MATLAB mediante App Designer. Esta interfaz permite introducir los parámetros necesarios para la simulación del enlace radioeléctrico y visualizar de forma directa los resultados del cálculo de propagación por onda de superficie. La interfaz actúa como un entorno de interacción entre el usuario y el módulo de cálculo previamente descrito, simplificando la ejecución de simulaciones y la representación de los resultados obtenidos.

La Figura 3-4 muestra el aspecto inicial de la interfaz antes de ejecutar la simulación. En ella se dispone de un panel de parámetros de entrada donde el usuario introduce la información necesaria para definir el enlace radioeléctrico. En primer lugar, se especifica el nombre del archivo KML que contiene la trayectoria geográfica del enlace entre transmisor y receptor. A continuación, se introducen la frecuencia de operación del sistema, la altura de la antena transmisora, la altura de la antena receptora y la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) del transmisor. Una vez definidos estos parámetros,

el cálculo se ejecuta mediante el botón “Calcular”, que lanza el proceso de simulación y genera automáticamente las representaciones gráficas correspondientes.

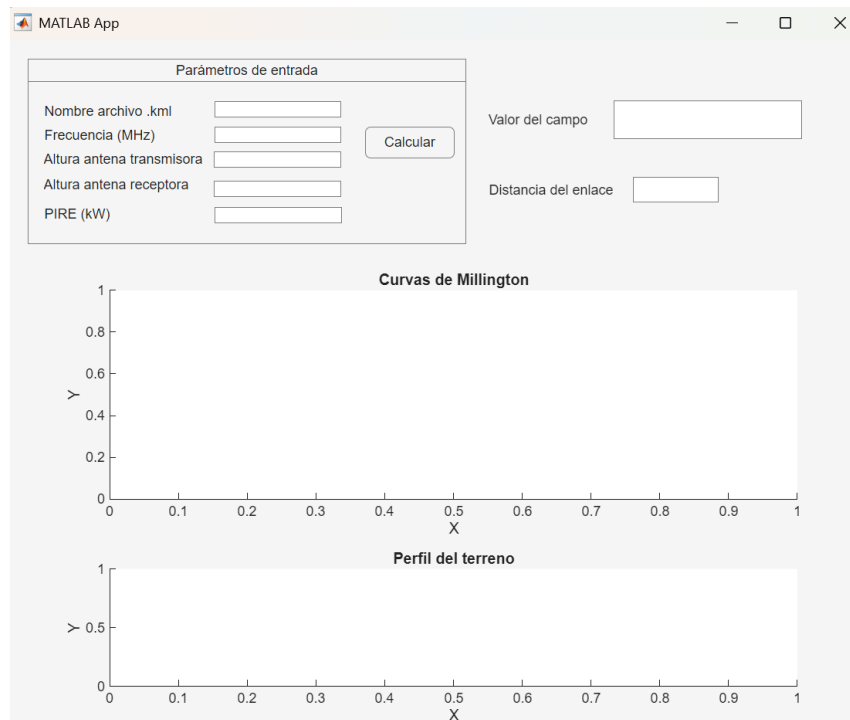


**Figura 3-4. Interfaz diseñada en MATLAB App Designer.**

Tras ejecutar la simulación, los resultados se muestran en la interfaz tal y como se observa en la Figura 3-5. En la parte central se representa la intensidad de campo eléctrico en función de la distancia a lo largo del trayecto. En esta gráfica se incluyen las curvas correspondientes a cada tipo de terreno considerado en el modelo, junto con la curva resultante obtenida mediante la aplicación del método Millington y la curva final ajustada a la PIRE real introducida por el usuario. Asimismo, se indican mediante líneas verticales discontinuas las posiciones donde se producen cambios de terreno a lo largo del enlace.

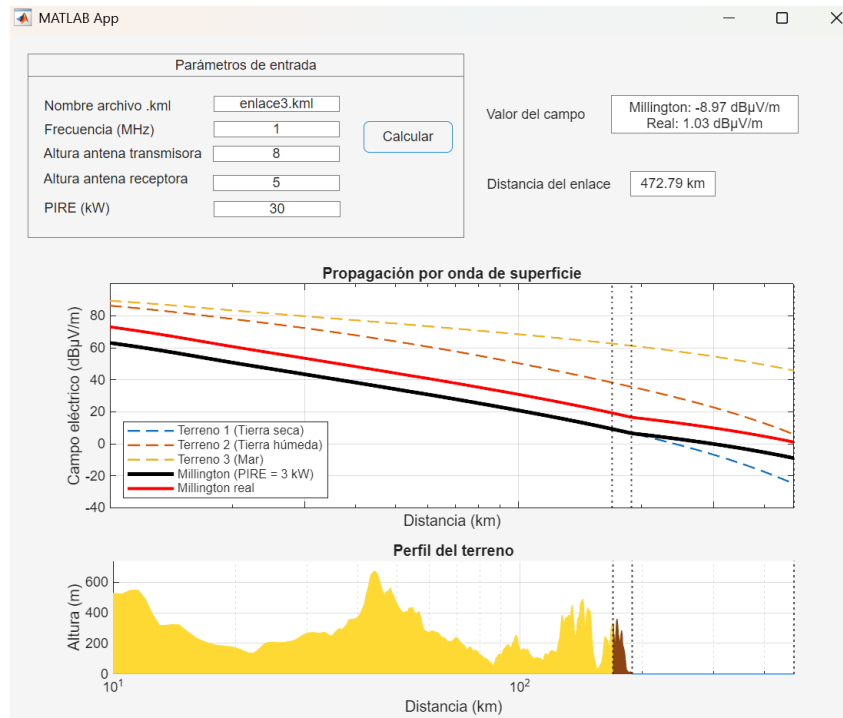


**Figura 3-5. Ejemplo de simulación de transmisión.**

Debajo de la gráfica de propagación se muestra el perfil topográfico del terreno a lo largo del trayecto. Este perfil permite visualizar la orografía del enlace y el tipo de superficie presente en cada tramo, facilitando la interpretación de los resultados representados en la gráfica superior. Para ello se emplea un código de colores que identifica el tipo de terreno considerado en el modelo: amarillo para tierra seca, marrón para tierra húmeda y azul para el mar.

Además de las representaciones gráficas, la interfaz muestra dos valores numéricos relevantes para el análisis del enlace: la distancia total entre transmisor y receptor obtenida a partir del archivo KML y el valor de la intensidad de campo eléctrico en el punto de recepción, tanto para la curva de referencia del método de Millington como para el valor corregido teniendo en cuenta la PIRE introducida por el usuario.

Finalmente, cada simulación realizada se guarda automáticamente mediante la función *save* de MATLAB, generando un archivo que contiene todas las variables relevantes del cálculo. Esto permite almacenar los resultados obtenidos y recuperarlos posteriormente para su representación, análisis o comparación entre diferentes escenarios de propagación.

Adicionalmente, en la Figura 3-6 se muestra el entorno de desarrollo de la aplicación en MATLAB App Designer, donde puede observarse la disposición de los distintos componentes utilizados para construir la interfaz. La aplicación se ha desarrollado empleando elementos gráficos estándar de App Designer, entre los que destacan los campos de texto (*Edit Field*) para la introducción de los parámetros de entrada, un botón de ejecución (*Button*) que activa el cálculo de la simulación y áreas de visualización (*UIAxes*) destinadas a la representación de las gráficas de resultados. Asimismo, se utilizan componentes de tipo *Text Area* para mostrar los valores numéricos calculados, como la distancia total del enlace y el valor del campo eléctrico en el receptor. La organización de estos elementos dentro de la ventana de la aplicación permite estructurar de forma clara tanto la introducción de datos como la visualización de resultados, facilitando el uso de la herramienta desarrollada.

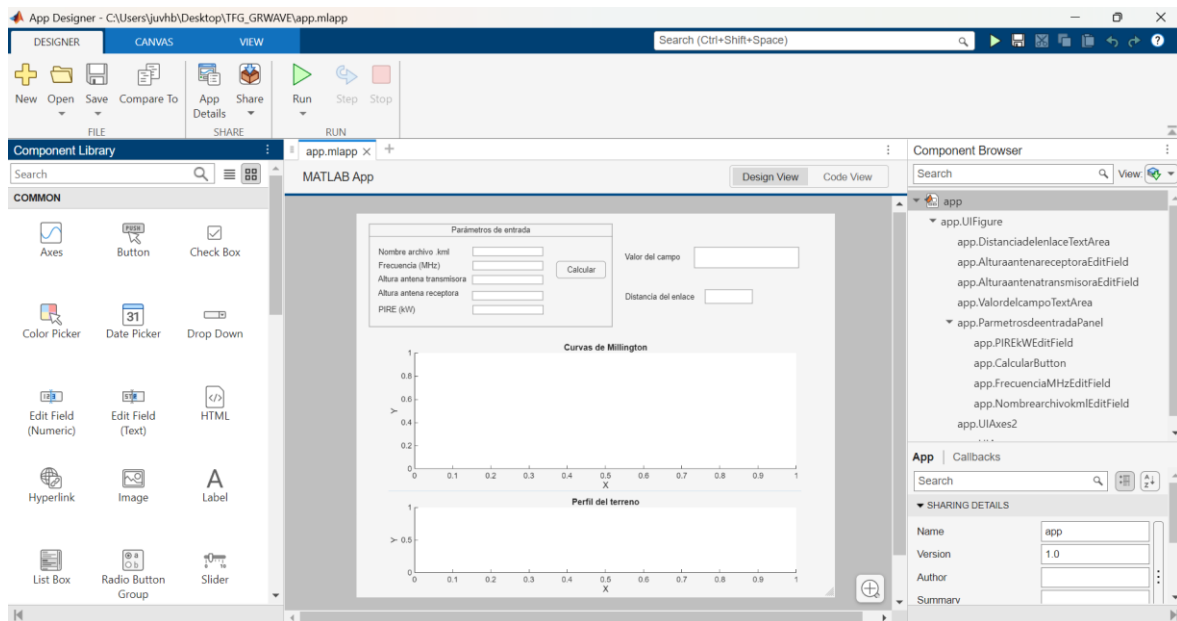


Figura 3-6. Interfaz desarrollada en la aplicación MATLAB App Designer.

### 3.2.6 Validación básica del código

Con el objetivo de verificar la correcta implementación del modelo de propagación por onda de superficie desarrollado en este trabajo, se ha realizado un proceso de validación basado en la comparación de los resultados obtenidos mediante el programa con referencias teóricas ampliamente aceptadas.

En primer lugar, se comparan las curvas generadas por el modelo con las curvas de propagación publicadas en la Recomendación ITU-R P.368 [4]. Esta comparación permite comprobar que el modelo reproduce correctamente el comportamiento esperado para trayectos homogéneos.

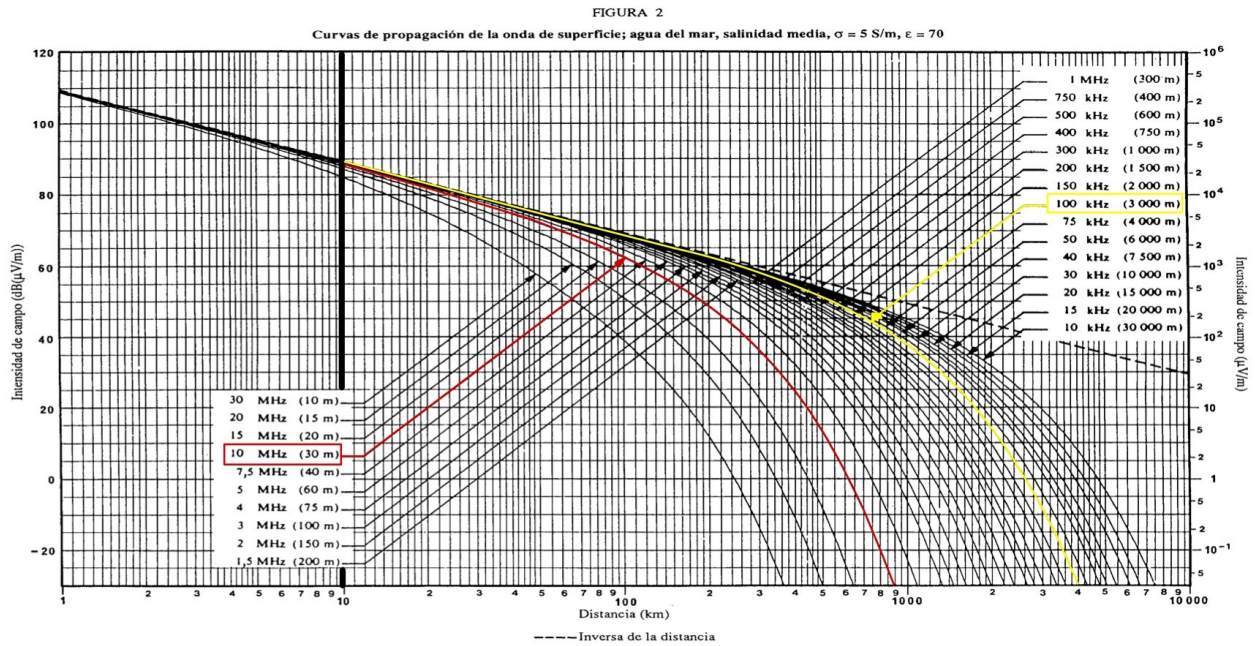
Posteriormente, se analiza un trayecto compuesto por varios tipos de terreno con el fin de demostrar la capacidad del modelo para representar adecuadamente los cambios en la propagación cuando varían las características eléctricas del suelo. Este caso permite observar cómo las variaciones en la conductividad y permitividad del terreno afectan a la evolución a lo largo del enlace.

#### 3.2.6.1 Comparación con curvas ITU para trayectos homogéneos

Para esta validación se han seleccionado dos tipos de terreno representativos, mar y tierra seca, así como dos frecuencias pertenecientes a las bandas LF y HF, concretamente 100 kHz y 10 MHz. Esta selección permite analizar el comportamiento del modelo bajo condiciones de propagación claramente diferenciadas, poniendo de manifiesto la influencia tanto del tipo de terreno como de la frecuencia en la propagación de la onda de superficie.

Las simulaciones realizadas para la validación del modelo se han llevado a cabo considerando trayectos homogéneos cuya longitud se ha ajustado al alcance máximo representado en las curvas de referencia de la Recomendación ITU-R P.368, ampliando ligeramente dicha distancia con un margen adicional de algunos kilómetros con el fin de asegurar que se cubre completamente el rango de interés. Asimismo, para reproducir las condiciones empleadas en la elaboración de las curvas de la ITU, se ha considerado que tanto la antena transmisora como la receptora se encuentran situadas a una altura nula respecto a la superficie del terreno, de modo que ambas se sitúan lo más próximas al suelo. Por último, la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) utilizada en todas las simulaciones se ha fijado en 3 kW, lo que permite mantener condiciones de referencia constantes y obtener una única curva representativa en cada gráfica, facilitando así la comparación directa con las curvas publicadas por la ITU.

En primer lugar, se realiza la comparación entre las curvas de propagación correspondientes al caso de agua salada publicadas en la Recomendación ITU-R P.368 y los resultados obtenidos mediante el modelo implementado.



0368-02

Figura 3-7. Curvas sobre agua de mar según ITU-R P.368 [4].

En la Figura 3-7 se muestran las curvas de propagación por onda de superficie sobre agua de mar, en las que se han destacado las frecuencias 10 MHz (rojo) y 100 kHz (amarillo). A partir de estas curvas se comparan los resultados obtenidos mediante simulación con el modelo implementado, analizando la evolución del campo eléctrico con la distancia.

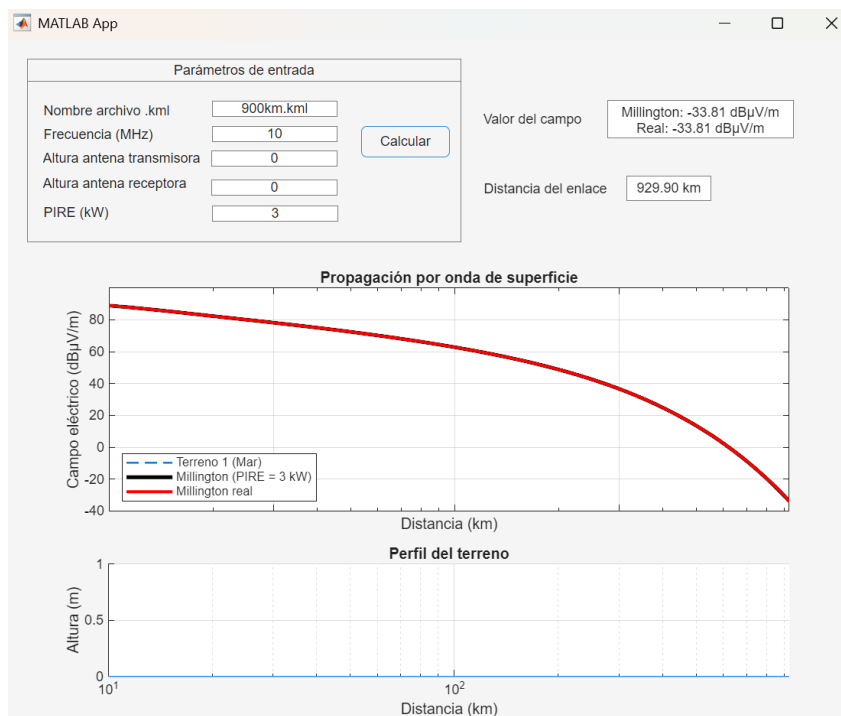


Figura 3-8. Simulación sobre agua de mar (10 MHz, 900 km).

En la Figura 3-8 se muestra una simulación realizada con el software desarrollado para un trayecto de aproximadamente 900 km sobre el océano Atlántico a una frecuencia de 10 MHz. Comparando estos resultados con la curva correspondiente de la Recomendación ITU-R P.368, se observa que los valores del campo eléctrico presentan una concordancia adecuada. Asimismo, la evolución del campo con la distancia muestra una atenuación muy similar en ambas representaciones, reproduciendo correctamente la tendencia de la curva de referencia. Aunque la distribución de los ejes en ambas gráficas no es exactamente la misma, debido a diferencias en la representación y escala utilizadas, el comportamiento general de la curva es equivalente, lo que confirma la validez de los resultados obtenidos mediante el modelo implementado.

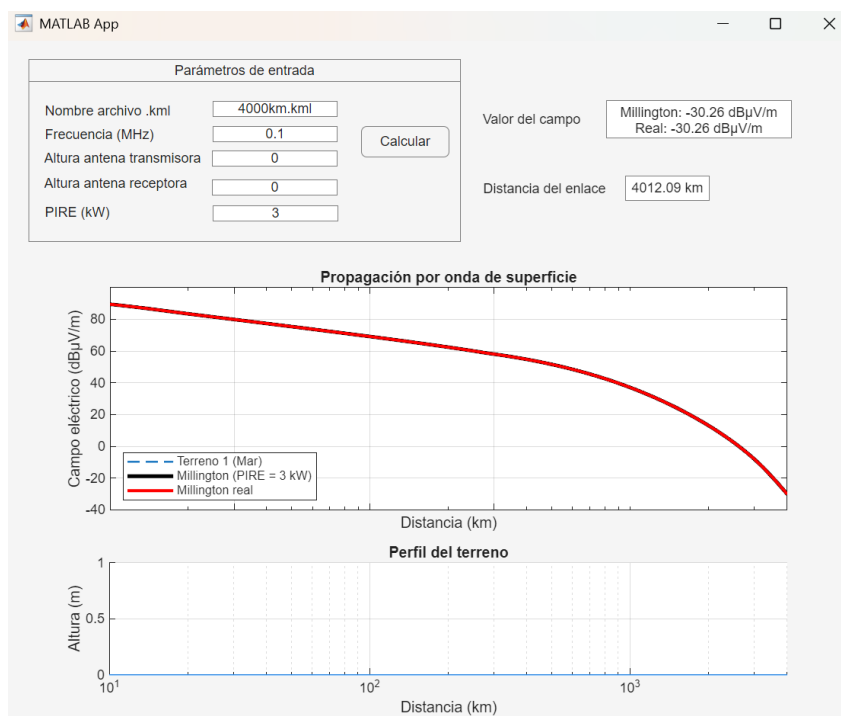


**Figura 3-9. Simulación sobre agua de mar (100 kHz, 4000 km).**

En la Figura 3-9 se muestra una simulación realizada con el software desarrollado para un trayecto de aproximadamente 4000 km sobre el océano Atlántico a una frecuencia de 100 kHz. Al igual que en el caso anterior, la evolución del campo eléctrico obtenida mediante simulación presenta una tendencia coherente con la curva correspondiente de la Recomendación ITU-R P.368, mostrando una atenuación similar con la distancia. En este caso, al tratarse de una frecuencia perteneciente a la banda LF, la propagación por onda de superficie resulta más eficiente, lo que se traduce en un mayor alcance y una menor atenuación del campo eléctrico en comparación con el caso de 10 MHz. Este comportamiento coincide con lo esperado teóricamente para este tipo de frecuencias, lo que refuerza la validez del modelo implementado.

Una vez analizado el caso correspondiente a la propagación sobre agua de mar, se procede a realizar la misma comparación para el caso de tierra seca. Este tipo de terreno presenta unas propiedades eléctricas significativamente diferentes, especialmente en lo relativo a su menor conductividad, lo que provoca una mayor atenuación de la onda de superficie durante su propagación. Por este motivo, el análisis de este escenario permite evaluar nuevamente el comportamiento del modelo y comprobar que reproduce adecuadamente el efecto que las características del terreno tienen sobre la evolución del campo eléctrico con la distancia.

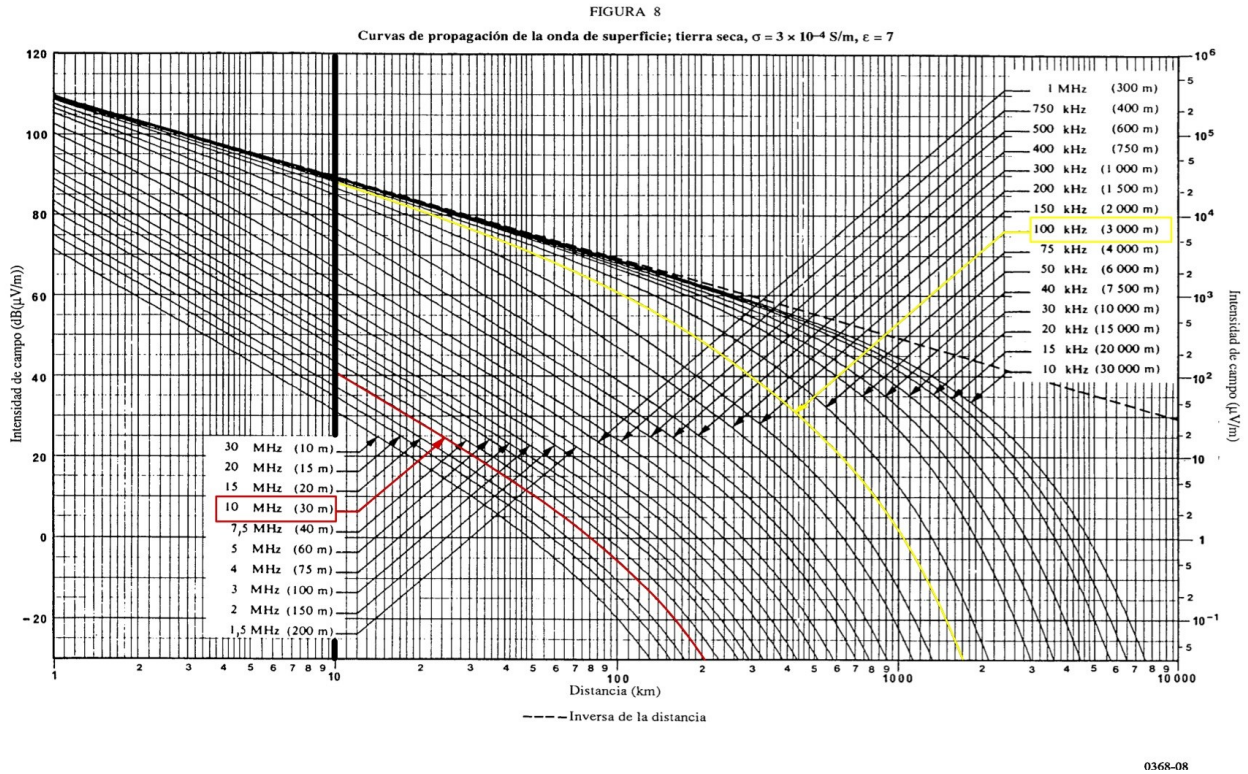


Figura 3-10. Curvas sobre tierra seca según ITU-R P.368 [4].

De forma análoga a la Figura 3-7, donde se muestran las curvas de propagación sobre agua de mar, en la Figura 3-10 se presentan las curvas de propagación por onda de superficie sobre tierra seca obtenidas de la Recomendación ITU-R P.368. En esta figura se han destacado nuevamente las frecuencias utilizadas en la validación del modelo, 10 MHz (rojo) y 100 kHz (amarillo), que se emplearán para comparar las curvas de referencia con los resultados obtenidos mediante simulación.

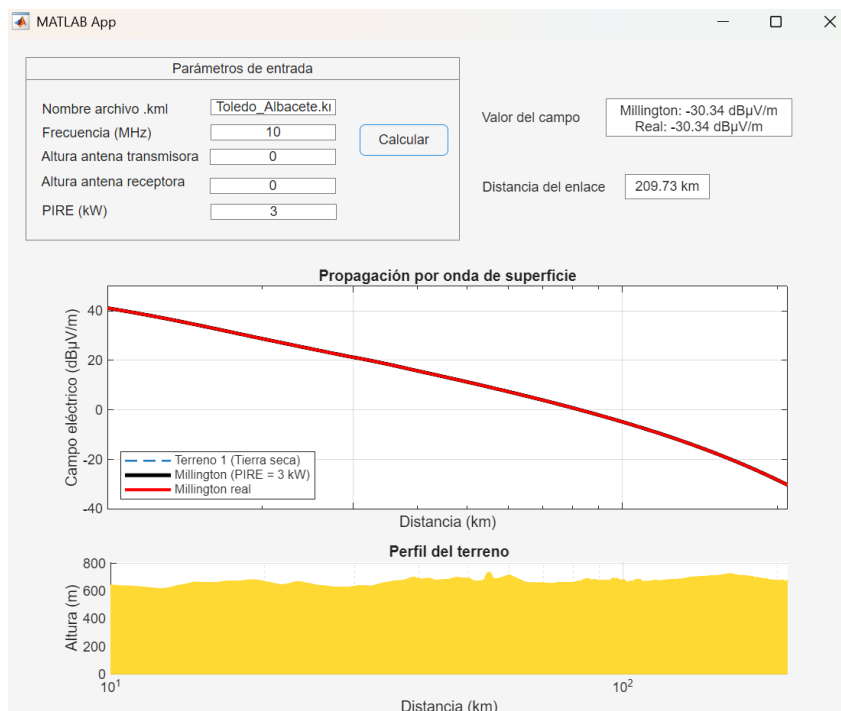


Figura 3-11. Simulación sobre tierra seca (10 MHz, 200 km).

En la Figura 3-11 se muestra una simulación realizada con el software desarrollado para un trayecto de aproximadamente 200 km sobre tierra seca, correspondiente al recorrido Toledo-Albacete, a una frecuencia de 100 kHz. Comparando esta simulación con las curvas de referencia de la Recomendación ITU-R P.368, se observa nuevamente una buena concordancia en los valores obtenidos. Además, puede apreciarse que la pendiente de la curva es mayor que en el caso del agua de mar para la frecuencia, lo que indica una atenuación más elevada del campo eléctrico con la distancia. Este comportamiento es coherente con lo esperado teóricamente, ya que la menor conductividad de la tierra seca provoca mayores pérdidas durante la propagación de la onda de superficie, reduciendo el alcance efectivo de la señal.

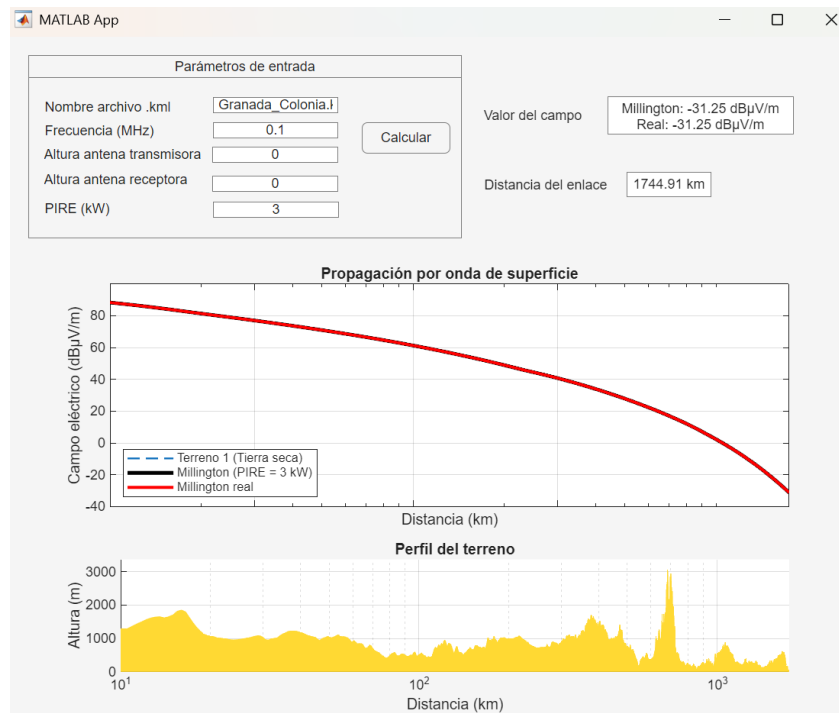


**Figura 3-12. Simulación sobre tierra seca (100 kHz, 1700 km).**

En la Figura 3-12 se muestra una simulación realizada con el software desarrollado para un trayecto de aproximadamente 1700 km sobre tierra seca, correspondiente al recorrido Granada-Colonia, a una frecuencia de 100 kHz. Comparando estos resultados con las curvas de referencia de la Recomendación ITU-R P.368, se observa nuevamente una buena concordancia entre los valores obtenidos mediante simulación y los valores teóricos. Asimismo, al tratarse de una frecuencia perteneciente a la banda LF, la propagación por onda de superficie resulta más eficiente que en el caso de frecuencias más altas, lo que permite alcanzar distancias mayores incluso en terrenos con menor conductividad. No obstante, puede apreciarse que el alcance sigue siendo inferior al observado en el caso del agua de mar para la misma frecuencia, lo que pone de manifiesto nuevamente la influencia de la conductividad del terreno en la propagación de la onda de superficie. Estos resultados refuerzan tanto la validez del modelo implementado como la correcta funcionalidad del software desarrollado.

En conjunto, los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones muestran una buena concordancia con las curvas de referencia de la Recomendación ITU-R P.368, tanto para los distintos tipos de terreno analizados como para las frecuencias consideradas. Asimismo, se observa que el modelo reproduce correctamente los efectos esperados de la frecuencia y de las propiedades eléctricas del terreno sobre la propagación por onda de superficie, reflejando una mayor atenuación en terrenos de menor conductividad y un mayor alcance a frecuencias más bajas. Estos resultados permiten validar el modelo implementado y confirmar la correcta funcionalidad del software desarrollado, constituyendo una base fiable para el análisis de escenarios más complejos con trayectos que atraviesan distintos tipos de terreno.

### 3.2.6.2 Validación del modelo para trayectos con múltiples tipos de terreno

Una vez validado el modelo para trayectos homogéneos, se procede a analizar un escenario en el que la propagación se produce a través de varios tipos de terreno, con el objetivo de evaluar el comportamiento del modelo ante cambios en las propiedades eléctricas del medio. Para ello se realiza una comparación entre el comportamiento teórico ilustrado en las Figura 12 y 13 de la Recomendación ITU-R P.368 [4], que muestra la evolución del campo eléctrico cuando la onda de superficie atraviesa terrenos con diferente conductividades, y los resultados obtenidos mediante simulación de trayectos reales utilizando el software desarrollado. Estas figuras representan respectivamente la transición desde un medio con mejores propiedades de propagación hacia otro menos favorable, y el caso inverso, en el que la onda de superficie pasa a un terreno con mayor conductividad. A partir de esta comparación se pretende verificar que el modelo implementado reproduce correctamente el comportamiento previsto por el método de Millington cuando se producen cambios en las características eléctricas del terreno [33].

Para realizar esta comparación se ha seleccionado un trayecto real que presenta una transición entre terreno continental y mar. Este enlace se ha analizado en ambos sentidos con el fin de reproducir los dos comportamientos descritos en la Recomendación ITU-R P.368: la transición desde un terreno con mejores propiedades de propagación hacia otro menos favorable y el caso inverso. En particular, se ha elegido este trayecto debido a que permite considerar aproximadamente 100 km de propagación sobre mar, seguidos de unos 20 km de tierra húmeda y finalmente cerca de 100 km de tierra seca. La inclusión de este tramo de tierra húmeda se debe a la forma en que el software desarrollado gestiona la transición entre medios, introduciendo automáticamente una zona intermedia de transición entre mar y tierra. No obstante, al tratarse de una distancia relativamente reducida, su influencia en el comportamiento global de la propagación resulta limitada, permitiendo apreciar con claridad el efecto de cambio hacia el siguiente terreno. En la Figura 3-13 se muestra una foto del enlace en la aplicación de Google Earth [37]:

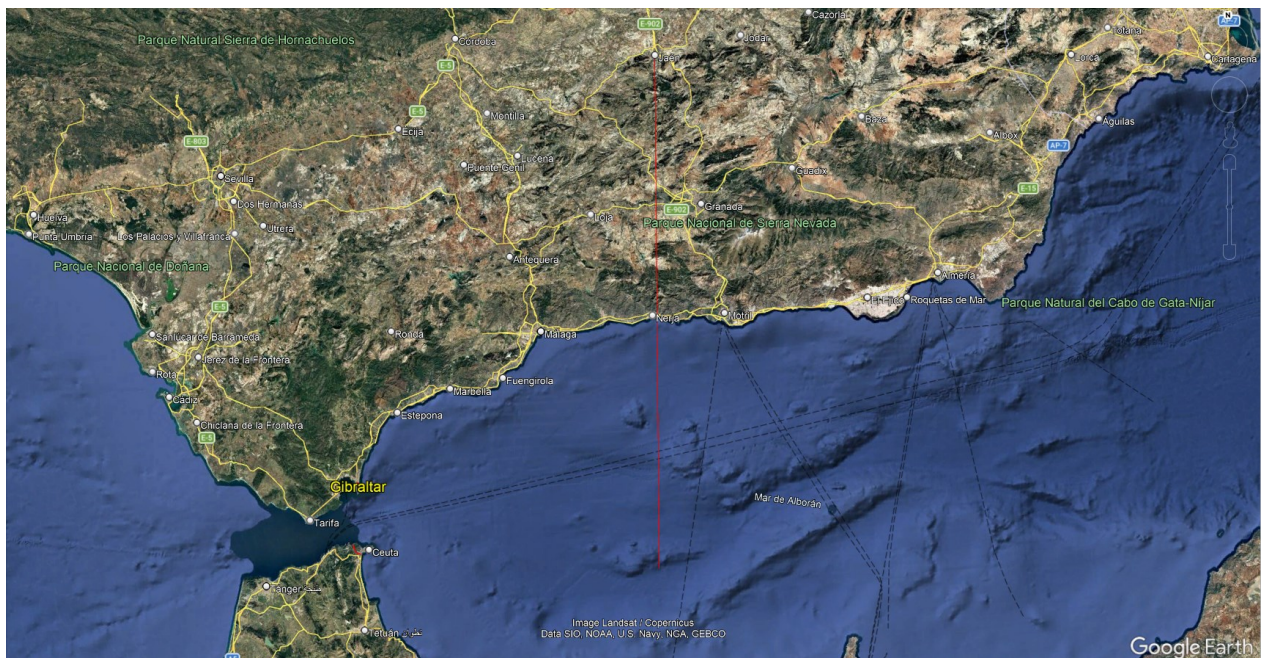


**Figura 3-13.** Trayecto para el estudio de la transición entre diferentes tipos de terreno [37].

En la Figura 3-14 se muestra el esquema conceptual presentado en la Recomendación ITU-R P.368 para ilustrar el comportamiento de la propagación por onda de superficie en trayectos compuestos por diferentes tipos de terreno. En este caso se considera un enlace formado por dos secciones homogéneas consecutivas con propiedades eléctricas distintas, caracterizadas por sus respectivas conductividades y permitividades  $(\sigma_1, \epsilon_1)$  y  $(\sigma_2, \epsilon_2)$ , y longitudes  $d_1$  y  $d_2$ . El ejemplo representado corresponde a una transición desde un medio con mayor conductividad eléctrica hacia otro con peores propiedades de

propagación, lo que provoca un aumento de la atenuación de la onda de superficie a partir del punto de cambio de terreno. Tal como describe la recomendación, para distancias superiores a  $d_1$  la curva de intensidad de campo obtenida mediante el método de Millington se sitúa entre las curvas correspondientes a cada uno de los terrenos considerados de forma individual. Además, la evolución de la curva resultante tiende progresivamente hacia una asíntota paralela a la curva asociada al segundo terreno, reflejando que, a grandes distancias, el comportamiento de la propagación queda dominado por las propiedades eléctricas del nuevo medio atravesado [4]. Este esquema se utilizará como referencia teórica para comparar el comportamiento obtenido mediante el software desarrollado cuando el enlace radioeléctrico atraviesa diferentes tipos de superficie.

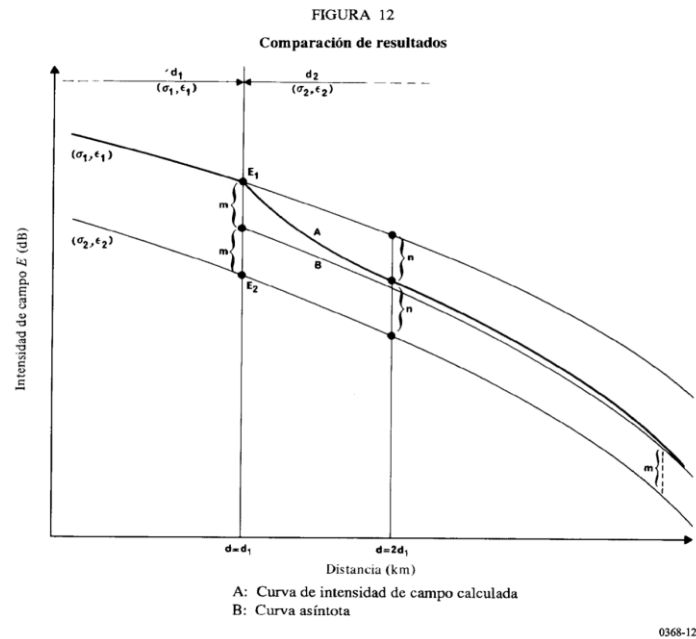


**Figura 3-14. Representación gráfica del método de Millington Figura 12 ITU-R P.368 [4].**

En la Figura 3-15 se muestra el resultado obtenido mediante el software desarrollado para el trayecto analizado en el sentido mar-tierra, a una frecuencia de 1 MHz. Esta frecuencia se ha seleccionado por resultar especialmente adecuada para visualizar con claridad el efecto de transición entre terrenos en la propagación por onda de superficie, permitiendo apreciar de forma más evidente el cambio en el comportamiento de la curva de intensidad de campo. En la simulación se ha fijado una PIRE de 3 kW, con el objetivo de facilitar la visualización de una única curva de propagación representativa del comportamiento del enlace. Asimismo, se han considerado alturas de antena de 10 m para el transmisor y 5 m para el receptor, valores adoptados como referencia para la simulación del enlace.

En la gráfica se representan, además de la curva resultante obtenida mediante el método Millington, las curvas correspondientes a cada uno de los terrenos considerados de forma individual. Puede observarse que, antes del punto de transición, la evolución del campo eléctrico sigue el comportamiento característico del terreno inicial, correspondiente al mar, que presenta mejores propiedades eléctricas para la propagación. A partir del cambio de terreno, la pendiente de la curva resultante aumenta progresivamente, reflejando la mayor atenuación asociada a la propagación sobre tierra, cuyas propiedades eléctricas son menos favorables. Este comportamiento reproduce el caso ilustrado en la Figura 3-14, en el que la propagación pasa de un medio con mejores propiedades eléctricas a otro con condiciones menos favorables. Finalmente, la curva resultante tiende gradualmente a hacerse paralela a la curva correspondiente al segundo terreno, reproduciendo el comportamiento asíntótico descrito anteriormente.

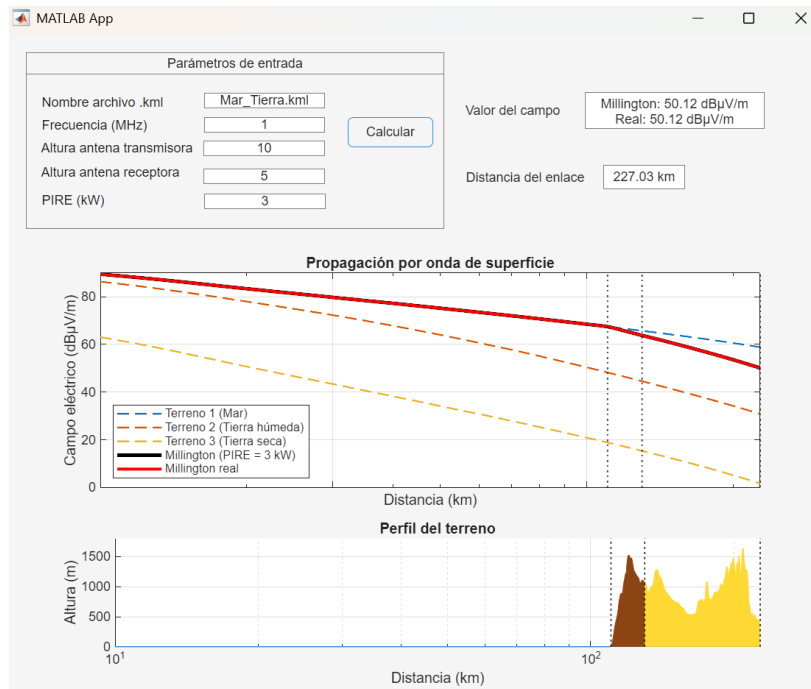
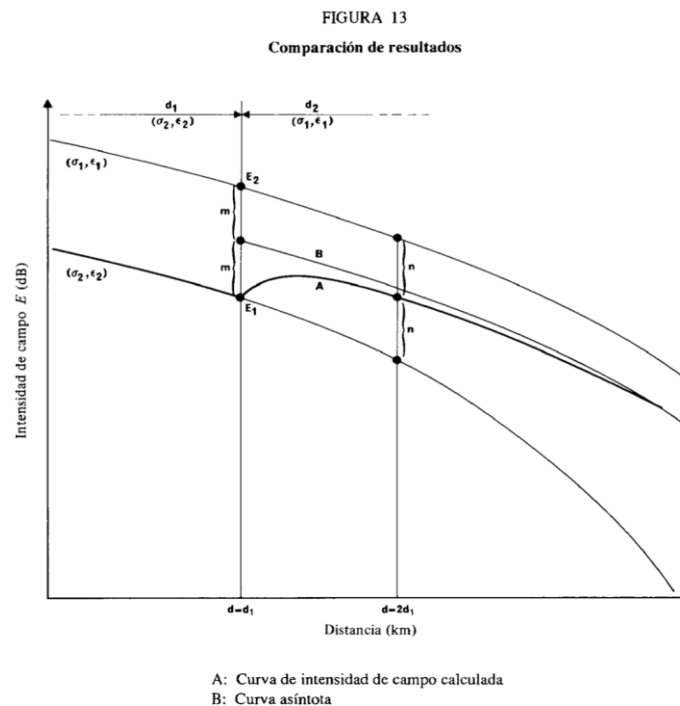


Figura 3-15. Simulación para el trayecto analizado en el sentido mar-tierra (1 MHz).

En la Figura 3-16 se presenta el esquema conceptual mostrado en la Recomendación ITU-R P.368 para el caso inverso al analizado anteriormente. En esta situación, la propagación se produce desde un medio con peores propiedades eléctricas hacia otro más favorable, invirtiéndose el orden de los terrenos considerados en la Figura 3-14. Al igual que en el caso anterior, la curva resultante obtenida mediante el método de Millington tiende progresivamente hacia una asíntota paralela a la curva correspondiente al segundo medio.



0368-13

Figura 3-16. Representación gráfica del método de Millington Figura 13 ITU-R P.368 [4].

En la Figura 3-17 se muestra el resultado de la simulación para el mismo trayecto analizado en el sentido tierra-mar. Puede observarse que el comportamiento obtenido reproduce nuevamente el patrón descrito en la Figura 3-16, verificándose que la curva resultante obtenida mediante el método de Millington tiende progresivamente hacia una asíntota paralela a la curva correspondiente al segundo medio. También se aprecia que los valores del campo eléctrico resultante son inferiores a los obtenidos en el caso mar-tierra, lo cual es coherente con el hecho de que la propagación se inicia sobre un terreno con peores propiedades eléctricas. Por otra parte, se observa el denominado *recovery effect*, asociado al paso de la onda de superficie desde un medio con peores propiedades eléctricas a otro más favorable. Este resultado confirma que el modelo implementado reproduce correctamente el comportamiento esperado cuando la onda de superficie atraviesa medios con distintas características eléctricas, validando así el funcionamiento del software desarrollado y su capacidad para reproducir el comportamiento previsto por el método de Millington en trayectos con medios heterogéneos [33].

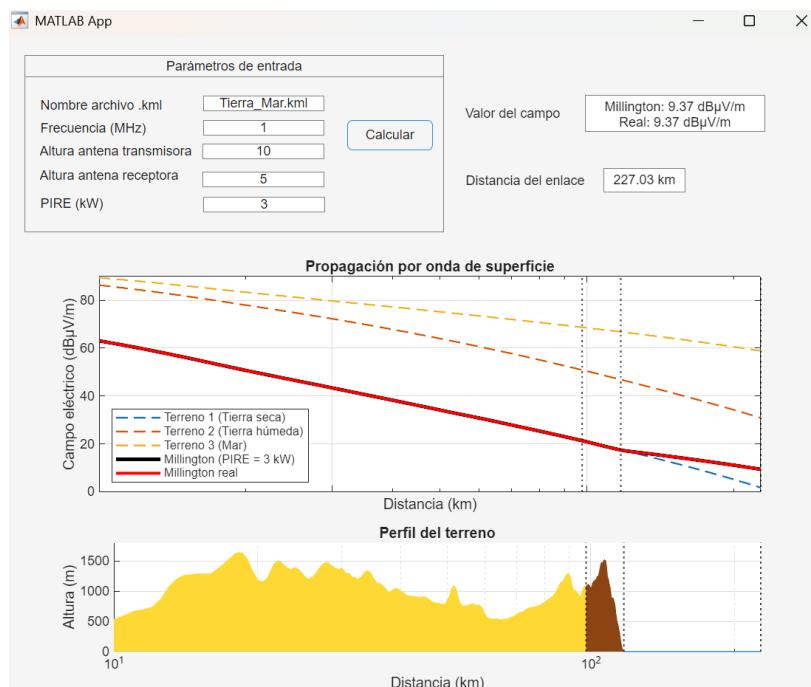


Figura 3-17. Simulación para el trayecto analizado en el sentido tierra-mar (1 MHz).

En conjunto, los resultados obtenidos muestran una concordancia clara entre el comportamiento teórico descrito en la Recomendación ITU-R P.368 y las simulaciones realizadas con el software desarrollado.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Escenarios Operativos

En este apartado se plantean dos escenarios representativos de comunicaciones navales, basados en enlaces habitualmente empleados por la Armada entre plataformas navales y estaciones terrestres. A través de estos escenarios se pretende analizar la viabilidad de los enlaces radioeléctricos en diferentes bandas de frecuencia y en condiciones operativas realistas.

El primer escenario analiza las comunicaciones en banda HF entre una fragata clase F-100 y estaciones terrestres de la red de comunicaciones naval. En concreto, se estudiarán los enlaces entre la fragata y las estaciones de Santorcaz y Bermeja, considerando tanto el enlace de ida como el de vuelta. Este análisis permitirá evaluar si las comunicaciones en HF podrían mantenerse con una unidad naval desplegada a gran distancia utilizando únicamente propagación por onda de superficie, como podría ocurrir en un escenario en el que la fragata se encuentre operando en zonas alejadas de la costa, por ejemplo, en mitad del océano Atlántico.

El segundo escenario se centra en las comunicaciones entre un submarino clase S-80 y la estación transmisora de Guardamar del Segura. En este caso se analizará la transmisión desde la estación terrestre hacia el submarino en banda LF, así como el enlace de retorno desde el submarino hacia la estación mediante banda HF. Este tipo de arquitectura de enlace, basada en transmisiones en bajas frecuencias (LF) desde tierra hacia el submarino, es característica de las comunicaciones con submarinos cuando se encuentran sumergidos, ya que las bajas frecuencias permiten cierta penetración de la señal en el agua. El escenario considerado sitúa al submarino operando en el Estrecho de Gibraltar, evaluándose la viabilidad de la recepción de la señal cuando el submarino se encuentra a una determinada profundidad.

El análisis de ambos escenarios permitirá comparar las capacidades de propagación de las distintas bandas de frecuencia y comprobar hasta qué punto es posible establecer comunicaciones fiables en situaciones operativas típicas de la Armada. En este estudio, el análisis de la propagación se realiza considerando únicamente el mecanismo de propagación por onda de superficie, ya que la herramienta empleada está diseñada específicamente para estimar la intensidad de campo eléctrico asociada a este tipo de propagación. Este enfoque permite evaluar el alcance que podría lograrse utilizando exclusivamente onda de superficie y determinar si dicho mecanismo sería suficiente para mantener el enlace considerado [5].

Los parámetros técnicos utilizados en el modelo, como las características de las antenas y la sensibilidad de los receptores empleados en los cálculos, han sido obtenidos con el apoyo del CEMEDM (Centro de Medidas Electromagnéticas) de la Escuela Naval Militar, lo que permite trabajar con valores representativos de sistemas reales utilizados en el ámbito naval.

#### 4.1.1 Enlace F-100

El primer escenario analizado corresponde a un enlace en banda HF entre una fragata clase F-100 y estaciones terrestres de la red de comunicaciones de la Armada. El enlace se ha planteado de forma que la transmisión de ida se realiza desde la estación de Santorcaz hacia la fragata, mientras que el enlace de retorno se establece desde la fragata hasta la estación de Bermeja. Este planteamiento refleja la arquitectura habitual de la red de comunicaciones, en la que la estación de Santorcaz se emplea principalmente como estación transmisora, mientras que la estación de Bermeja se utiliza como estación receptora. Ambas instalaciones se encuentran situadas en la Comunidad de Madrid y están separadas aproximadamente 20 km, lo que permite operar de forma coordinada dentro de la misma infraestructura de comunicaciones [14].

Para el análisis del enlace se ha considerado una frecuencia de 4.5 MHz, dentro de la banda HF. Esta frecuencia se ha seleccionado por ser representativa de las utilizadas habitualmente por la Armada para comunicaciones en esta banda. La frecuencia exacta empleada en los sistemas operativos reales no es pública, por lo que en este estudio se utiliza una frecuencia cercana que permita realizar un análisis realista de la propagación.

En el escenario considerado, la fragata se sitúa en el océano Atlántico a una distancia aproximada de 50 km al oeste de la costa de Oporto. La distancia total del enlace entre la estación terrestre y el buque es de aproximadamente 512 km. A lo largo de este trayecto la propagación de la señal se produce sobre distintos tipos de terreno, lo cual influye directamente en la atenuación de la onda de superficie. En concreto, el trayecto considerado está compuesto por 442 km sobre tierra seca, 20 km sobre tierra húmeda y 50 km sobre superficie marítima.

La Figura 4-1 muestra la ubicación de los elementos del enlace y el trayecto considerado para el estudio.



Figura 4-1. Escenario del enlace entre la estación de Santorcaz/Bermeja y la F-100 [37].

##### 4.1.1.1 Enlace de ida (Santorcaz – F-100)

Para analizar la viabilidad del enlace Santorcaz – F-100, es necesario definir previamente los parámetros del sistema de transmisión y recepción que intervienen en el cálculo. En la Tabla 4-1 se recogen los principales parámetros utilizados para el cálculo del enlace.

| Parámetro                 | Valor         | Elemento                   |
|---------------------------|---------------|----------------------------|
| Potencia transmisor       | 10 kW         | Transmisor HF de Santorcaz |
| Ganancia antena Tx        | 15.9 (lineal) | Antena TCI-521             |
| Sensibilidad receptor     | 0.15 $\mu$ V  | Receptor EK4100D           |
| Altura efectiva antena Rx | 0.1 m         | Antena STA-10 A/D          |
| Altura antena Tx          | 33 m          | Antena TCI-521             |
| Altura antena Rx          | 20 m          | Estructura F-100           |

**Tabla 4-1. Parámetros empleados en el enlace Santorcaz - F-100 (fuente: CEMEDEM).**

En cuanto a los parámetros, la potencia transmisora corresponde a la potencia de salida del sistema transmisor instalado en la estación de Santorcaz. Este valor ha sido proporcionado directamente por el CEMEDEM; sin embargo, por motivos de seguridad no se ha facilitado el modelo específico del transmisor empleado en la instalación.

La ganancia de la antena transmisora corresponde a la antena TCI-521, utilizada en la estación de Santorcaz para transmisión en HF [40]. Este tipo de antena log-periódica permite obtener una ganancia elevada en la banda de operación, lo que incrementa la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) del sistema. Además, la antena se instala sobre una torre de aproximadamente 33 m de altura, según las especificaciones del fabricante, lo que contribuye a mejorar las condiciones de propagación de la señal.

En el extremo receptor, el sistema considerado está basado en el receptor Rohde & Schwarz EK4100D, perteneciente a la familia de radios R&S M3SR Series 4100, ampliamente utilizada en aplicaciones navales y militares. Este receptor cubre el rango de frecuencias desde 10 kHz hasta 30 MHz y se caracteriza por su alta sensibilidad y amplio rango dinámico, lo que permite detectar señales de muy baja amplitud en entornos electromagnéticos complejos [41].

La sensibilidad del receptor utilizada en los cálculos corresponde a las especificaciones de este equipo, que está diseñado para operaciones HF tanto en instalaciones terrestres como embarcadas.

La señal recibida se capta mediante una antena receptora STA 10 A/D, que opera en el rango 0.01 a 30 MHz y presenta una altura efectiva de 10 cm en una carga de 50  $\Omega$ . Este parámetro es fundamental, ya que relaciona el campo eléctrico incidente con la tensión generada en la entrada del receptor [42].

La altura de la antena receptora depende de la configuración estructural de la fragata F-100. En este tipo de buques, las antenas HF suelen instalarse en la superestructura o en mástiles para minimizar obstáculos y mejorar la propagación. Para el presente estudio se ha considerado una altura aproximada de 20 m sobre el nivel del mar, valor representativo de la disposición típica de este tipo de plataformas navales.

La potencia radiada por el sistema se expresa en la simulación mediante la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE), que tiene en cuenta tanto la potencia suministrada al transmisor como la ganancia de la antena transmisora como se puede observar en la expresión (4-1):

$$PIRE = P_t \cdot G_t \quad (4 - 1)$$

Por tanto, para el enlace de ida considerado, la PIRE tendrá un valor de 159 kW.

Por otra parte, necesitamos calcular el campo eléctrico mínimo que debe incidir en la antena receptora para que la señal pueda ser detectada por el receptor. Para ello, partiremos de la sensibilidad del receptor, expresada en  $\mu$ V, y de la altura efectiva de la antena receptora, expresada en metros. Calculamos el campo eléctrico en  $\mu$ V/m con la siguiente expresión (4-2):

$$E_{min} = \frac{V_{min}}{h_e} \quad (4-2)$$

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene un campo eléctrico de 1.5  $\mu\text{V}/\text{m}$ .

El campo eléctrico mínimo obtenido se expresa inicialmente en unidades lineales de  $\mu\text{V}/\text{m}$ . No obstante, en estudios de propagación radioeléctrica es habitual trabajar en unidades logarítmicas, ya que permiten comparar de forma más directa los resultados con las curvas de propagación y con los valores proporcionados por herramientas de simulación. En este estudio, el campo eléctrico se expresará en decibelios referidos a microvoltios por metro ( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ). La conversión desde unidades lineales se realiza mediante la siguiente expresión (4-3):

$$E_{\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}} = 20 \log_{10} \left( \frac{E}{1 \mu\text{V}/\text{m}} \right) \quad (4-3)$$

Una vez realizadas las conversiones anteriores, el valor del campo eléctrico necesario para que la señal pueda ser detectada en el receptor:

$$E_{min} = 3.52 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$$

En la Figura 4-2 se muestra el resultado obtenido mediante la herramienta de estimación de propagación por onda de superficie para el enlace considerado. En dicha simulación se representa la intensidad de campo eléctrico en función de la distancia para las condiciones de frecuencia y terreno consideradas.

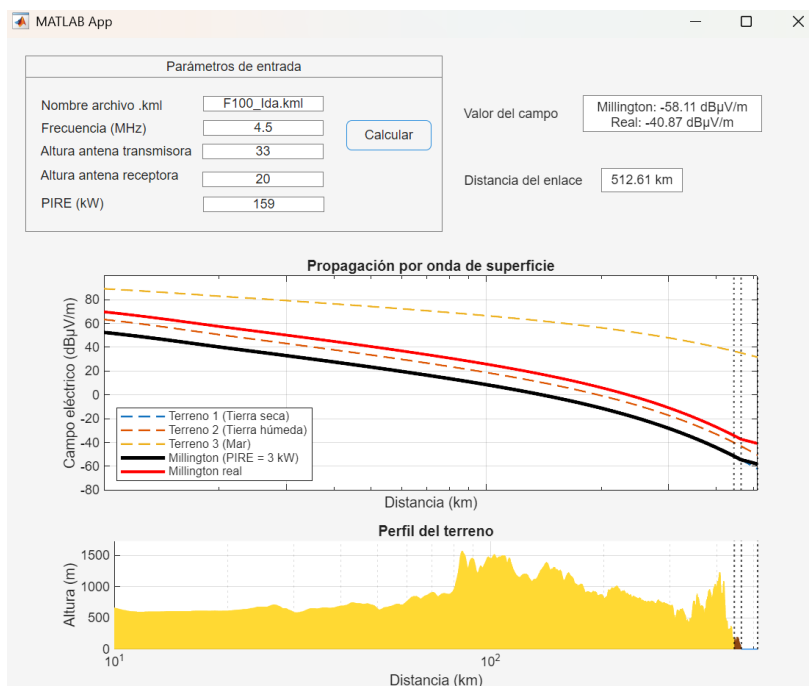


Figura 4-2. Simulación para el trayecto Santorcaz - F-100 (4 MHz).

Como se ha calculado anteriormente, el campo eléctrico mínimo necesario para que la señal pueda ser detectada por el receptor es de 3.52  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . Sin embargo, el resultado obtenido en la simulación para el enlace considerado muestra un valor de campo eléctrico de aproximadamente -40.87  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , muy inferior al umbral requerido para la detección de la señal.

Si se analiza la evolución del campo eléctrico con la distancia empleando las curvas de propagación, se observa que el nivel de 3.52  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se alcanzaría a 214 km del transmisor. Esto implica que, bajo

estas condiciones de propagación por onda de superficie sobre terreno seco, el enlace no podría establecerse a distancias mayores, ni siquiera alcanzando zonas oceánicas donde la propagación sería más favorable.

Este resultado pone de manifiesto que la propagación por onda de superficie en banda HF presenta un alcance limitado cuando las condiciones del terreno no son favorables. Por este motivo, las comunicaciones en HF dependen en gran medida de la propagación por onda ionosférica, que permite que las ondas radioeléctricas sean refractadas en las capas ionizadas de la atmósfera y regresen a la superficie terrestre a distancias mucho mayores del transmisor.

En condiciones reales de propagación en banda HF, el campo eléctrico recibido puede aproximarse como la suma de las contribuciones de ambos mecanismos de propagación, tal como se expresa en la siguiente relación (4-4):

$$E_{rec} = E_{surf} + E_{ion} \quad (4 - 4)$$

donde  $E_{rec}$  representa el campo eléctrico total recibido a una distancia  $d$ ,  $E_{surf}$  la contribución debida a la propagación por onda de superficie, y  $E_{ion}$  la componente asociada a la propagación por onda ionosférica, que permite alcanzar distancias considerablemente mayores.

Esta limitación de la propagación por onda de superficie explica la importancia de la propagación ionosférica en las comunicaciones navales de larga distancia. Consciente de esta realidad, la Armada ha desarrollado e impulsado sistemas de comunicaciones HF específicamente diseñados para explotar este mecanismo de propagación, como los programas BRASS y BRITE, destinados a garantizar enlaces fiables a gran distancia. En este contexto, junto con las comunicaciones en LF, las comunicaciones HF basadas en propagación ionosférica constituyen uno de los ámbitos en los que la Armada concentra una mayor inversión dentro de las radiocomunicaciones militares.

#### 4.1.1.2 Enlace de vuelta (F-100 – Bermeja)

Siguiendo el mismo procedimiento que en el enlace de ida, se definen a continuación los parámetros del sistema de transmisión y recepción empleados en el cálculo del enlace de vuelta. En la Tabla 4-2 se recogen los principales parámetros utilizados para el cálculo del enlace.

| Parámetro                    | Valor         | Elemento         |
|------------------------------|---------------|------------------|
| Potencia transmisor          | 1 kW          | R&S XK2900L      |
| Ganancia antena Tx           | 1.58 (lineal) | Antena STA-105PM |
| Sensibilidad receptor        | 0.15 $\mu$ V  | Receptor EK4100D |
| Altura efectiva de la antena | 40 m          | Antena TCI-521   |
| Altura antena Tx             | 20 m          | Estructura F-100 |
| Altura antena Rx             | 33 m          | Antena TCI-521   |

**Tabla 4-2. Parámetros empleados en el enlace F-100 - Bermeja (fuente: CEMEDEM).**

Como se puede observar en la Tabla 4-2, varios de los elementos del enlace se mantienen respecto al caso anterior, como la sensibilidad del receptor o la antena empleada en la estación de Bermeja. No obstante, algunos de los parámetros asociados al sistema transmisor difieren respecto al enlace de ida.

En el caso del enlace de vuelta, el sistema de transmisión se encuentra instalado a bordo de la fragata. La transmisión se realiza mediante una antena STA-105PM, diseñada para operar en el rango de frecuencias de 1.5 a 30 MHz y empleada habitualmente en servicios de comunicaciones marítimas [43].

Este tipo de antena presenta polarización vertical y un patrón de radiación omnidireccional, lo que permite cubrir todas las direcciones alrededor del buque.

El sistema transmisor embarcado corresponde a un equipo Rohde & Schwarz XK2900L, capaz de operar en el rango de 1.5 a 30 MHz y empleado en sistemas de comunicaciones HF navales [44]. En este tipo de enlaces, la transmisión se realiza habitualmente con potencias del orden de 1 kW, valor coherente con la potencia nominal de operación de la antena instalada y representativo de las condiciones habituales de funcionamiento del sistema.

A partir de los parámetros definidos y aplicando las expresiones descritas anteriormente, se obtienen los valores necesarios para el análisis del enlace. En primer lugar, se calcula la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) del sistema transmisor, cuyo valor resulta:

$$PIRE = 1.58 \text{ kW}$$

A continuación, empleando la sensibilidad del receptor y la altura efectiva de la antena receptora, se determina el campo eléctrico mínimo necesario para que la señal sea detectada, obteniéndose:

$$E_{min} = 0.00375 \text{ } \mu\text{V/m}$$

Finalmente, este valor se expresa en unidades logarítmicas, resultando un campo eléctrico mínimo de:

$$E_{min} = -48.52 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

En la Figura 4-3 se muestra la simulación de la propagación por onda de superficie correspondiente al enlace entre la fragata F-100 y la estación de Bermeja. En esta representación se observa la variación de la intensidad de campo eléctrico con la distancia para las condiciones de frecuencia y terreno consideradas. La diferencia que se aprecia en la distancia respecto a la simulación anterior se debe a que en este caso se analiza el trayecto correspondiente a la estación de Bermeja.

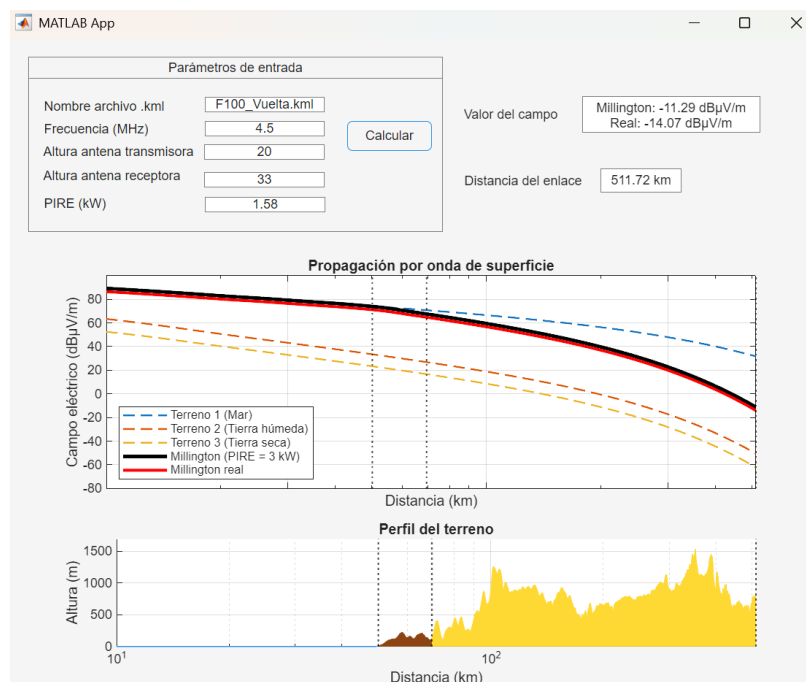


**Figura 4-3. Simulación para el trayecto F-100 – Bermeja (4.5 MHz).**

Como se observa en la simulación, el valor de campo eléctrico recibido en el punto correspondiente a la estación de Bermeja es aproximadamente -14.07 dBμV/m, valor superior al campo mínimo requerido para la detección de la señal, por lo que sí se establece el enlace de comunicaciones. Este resultado se debe principalmente a dos factores. En primer lugar, a las condiciones del terreno a lo largo

del trayecto de propagación. En el enlace de ida analizado previamente, la propagación comenzaba sobre superficie terrestre, lo que introduce una mayor atenuación en la onda de superficie. Sin embargo, en este enlace de vuelta la propagación se inicia sobre superficie marítima, donde las pérdidas son significativamente menores, permitiendo que el campo eléctrico se mantenga a niveles suficientes durante mayores distancias antes de alcanzar tierra firme. En segundo lugar, contribuye también la buena capacidad de recepción de la estación de Bermeja, que permite detectar señales de menor intensidad en comparación con el anterior escenario.

Con el objetivo de estimar el alcance efectivo del enlace, se realizaron múltiples simulaciones adicionales manteniendo las mismas condiciones de propagación, pero considerando diferentes trayectos desde la estación de Bermeja hacia el océano Atlántico. Los resultados obtenidos muestran que la distancia máxima a la que podría mantenerse la comunicación mediante propagación por onda de superficie se sitúa aproximadamente entre 900 y algo más de 1000 km. Este enlace depende en gran medida de la proporción de trayecto sobre tierra y sobre mar, siendo mayor cuanto menor es la distancia sobre terreno seco y mayor la propagación sobre superficie marítima. Este resultado pone de manifiesto la buena capacidad de propagación de la onda de superficie cuando las condiciones del terreno son favorables.

En conjunto, los resultados obtenidos en este escenario ponen de manifiesto la fuerte influencia que tienen las condiciones del terreno y la configuración del enlace en la propagación por onda de superficie en banda HF. Mientras que en el enlace de ida las pérdidas asociadas a la propagación sobre terreno seco impiden establecer la comunicación, en el enlace de vuelta las condiciones de propagación más favorables permiten mantener el enlace a distancias considerablemente mayores. No obstante, este análisis también evidencia que la propagación por onda de superficie en banda HF presenta limitaciones, especialmente cuando el trayecto discurre sobre un terreno poco favorable. En condiciones reales de operación, estas limitaciones se ven compensadas por la propagación por onda ionosférica, que permite extender significativamente el alcance de las comunicaciones y actúa como un mecanismo complementario a la propagación por superficie.

#### *4.1.2 Enlace S-80*

El segundo escenario corresponde a un enlace en banda LF entre la estación transmisora de Guardamar del Segura y un submarino de la clase S-80. Este tipo de enlaces se emplea habitualmente en las comunicaciones con submarinos cuando estos se encuentran sumergidos, ya que las bajas frecuencias permiten una mayor penetración de la señal en el agua del mar. La estación de Guardamar del Segura, cuya instalación original fue desarrollada por la Marina de los Estados Unidos durante la década de 1960 en el contexto de los sistemas de comunicaciones estratégicas con submarinos, opera en banda LF mediante una antena de gran tamaño diseñada para radiar con alta eficiencia en estas frecuencias [45]. En este escenario se analiza la transmisión desde dicha estación hacia el submarino con el objetivo de estimar el nivel de campo eléctrico que podría alcanzarse en una zona de operación, así como estudiar hasta qué profundidades es capaz de penetrar la onda electromagnética y determinar en qué condiciones sería posible establecer comunicaciones con el submarino.

En este escenario se considera un enlace bidireccional típico entre una estación terrestre y un submarino. La transmisión desde la estación de Guardamar hacia el submarino se modela empleando una frecuencia de 150 kHz, dentro de la banda LF, ya que este rango de frecuencias permite una mayor penetración de la señal en el agua de mar y posibilita la recepción por parte del submarino cuando se encuentra sumergido. Para la comunicación en sentido contrario, desde el submarino hacia la estación terrestre, se considera una transmisión en 4.5 MHz en banda HF, suponiendo que el submarino se encuentra en superficie y puede emplear sus sistemas de antena para transmitir. Las frecuencias reales utilizadas en este tipo de sistemas de comunicaciones navales son información clasificada, por lo que en este estudio se han seleccionado valores representativos próximos a los empleados en la práctica con el fin de simular un escenario realista de comunicaciones.

El escenario considerado sitúa al submarino operando en las proximidades del Estrecho de Gibraltar, a una profundidad de 10 m. En concreto, se considera que el submarino se encuentra aproximadamente a 40 km al sur de la costa de Málaga. El trayecto de propagación entre la estación transmisora de Guardamar del Segura y la posición del submarino atraviesa diferentes tipos de terreno, lo que influye en la propagación por onda de superficie. En el modelo considerado, el enlace se compone de un tramo inicial de 280 km sobre tierra seca, seguido de 20 km sobre terreno húmedo y, finalmente, 147 km sobre superficie marítima hasta alcanzar la posición del submarino.



Figura 4-4. Escenario del enlace entre la estación de Guardamar del Segura y el S-80 [37].

#### 4.1.2.1 Enlace de ida (Guardamar del Segura – S-80)

Para analizar la viabilidad del enlace Guardamar – S-80 es necesario definir previamente los parámetros del sistema de transmisión y recepción que intervienen en el cálculo. En la tabla 4-3 se recogen los principales parámetros considerados para el análisis del enlace, incluyendo las características del transmisor, las antenas empleadas y la sensibilidad del sistema receptor.

| Parámetro                    | Valor        | Elemento                              |
|------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| Potencia transmisor          | 50 kW        | Transmisor TRAM-50                    |
| Ganancia antena Tx           | 3 (lineal)   | Antena monopolo LF estación Guardamar |
| Sensibilidad receptor        | 0.15 $\mu$ V | Receptor EK4100D                      |
| Altura efectiva de la antena | 5 m          | Antena receptora LF S-80              |
| Altura antena Tx             | 380 m        | Antena LF estación Guardamar          |
| Altura antena Rx             | 0 m          | Superficie del mar                    |

Tabla 4-3. Parámetros empleados en el enlace Guardamar – S-80 (fuente: CEMEDEM).

Conviene señalar que parte de la información relativa a los sistemas de comunicaciones empleados en este tipo de enlaces, como las características detalladas de las antenas o frecuencias operativas exactas, no es de dominio público por tratarse de sistemas utilizados en el ámbito militar. En el caso del

transmisor empleado por la estación de Guardamar del Segura, sí se dispone de información sobre el equipo utilizado, correspondiente a un transmisor TRAM-50 con una potencia de salida de 50 kW [46]. No obstante, otros parámetros considerados en el presente estudio se han obtenido a partir de los valores representativos proporcionados en el contexto académico o bien se han aproximado a partir de datos técnicos disponibles en la literatura especializada. En cualquier caso, los valores empleados permiten reproducir de forma razonable el comportamiento del enlace y realizar un análisis representativo de las condiciones reales de operación.

Partiendo de los parámetros definidos y utilizando las expresiones presentadas anteriormente, se procede a calcular los valores necesarios para evaluar el enlace. Primero se determina la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) del sistema transmisor, teniendo en cuenta la potencia entregada por el transmisor y la ganancia de la antena transmisora. Para el caso considerado se obtiene:

$$PIRE = 150 \text{ kW}$$

Seguidamente, a partir de la sensibilidad del receptor y la altura efectiva de la antena receptora, se calcula el campo eléctrico mínimo necesario para que la señal pueda ser detectada por el sistema receptor, resultando:

$$E_{min} = 0.03 \text{ } \mu\text{V/m}$$

Por último, este valor se expresa en unidades logarítmicas con el fin de facilitar la comparación con los resultados obtenidos en la simulación de propagación, obteniéndose:

$$E_{min} = -30.46 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

Para estimar la viabilidad de recepción a una determinada profundidad, es necesario partir del campo eléctrico obtenido en la superficie del mar. Esto se debe a que los modelos de propagación empleados permiten calcular el campo eléctrico en la interfaz aire-mar, mientras que el submarino se encuentra sumergido. Por este motivo, en el modelo considerado se toma una altura de la antena receptora igual a 0 m, representando la superficie del mar.

Una vez obtenido el campo eléctrico en la superficie, se debe considerar la atenuación adicional que experimenta la señal al propagarse en el agua hasta alcanzar la profundidad del submarino. Esta atenuación depende de las propiedades eléctricas del medio y de la frecuencia de la señal.

La propagación de la onda electromagnética en un medio conductor como el agua de mar puede caracterizarse mediante la constante de atenuación del medio, que viene dada por la siguiente expresión (4-5):

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (4 - 5)$$

donde  $f$  es la frecuencia de la señal,  $\mu$  la permeabilidad magnética del medio y  $\sigma$  la conductividad eléctrica del agua de mar. Para este medio se consideran valores aproximados de  $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  y  $\sigma = 5 \text{ S/m}$ .

Sustituyendo los valores correspondientes para el caso considerado se obtiene una constante de atenuación de:

$$\alpha = 1.72 \text{ Np/m}$$

Finalmente, la pérdida total introducida por el agua de mar a una profundidad ( $z$ ) puede expresarse en decibelios con la siguiente expresión (4-6):

$$L = 8.686 \cdot \alpha \cdot z \quad (4 - 6)$$

El factor 8.686 se introduce para convertir la constante de atenuación expresada en nepers por metro (Np/m) a decibelios por metro (dB/m).

De este modo, el campo eléctrico estimado a la profundidad del submarino se obtiene restando esta atenuación al campo eléctrico calculado en la superficie del mar, pudiendo posteriormente compararse con el campo eléctrico mínimo necesario para la detección de la señal. Por tanto, el campo eléctrico que recibe el submarino se puede definir con la siguiente expresión (4-7):

$$E_{sub} = E_{sup} - L \quad (4 - 7)$$

donde  $E_{sub}$  es el campo eléctrico que recibe el submarino a una profundidad  $z$  y  $E_{sup}$  es el campo que se recibiría en la superficie del agua de mar donde se encuentra el submarino.

En la Figura 4-5 se muestra el resultado obtenido mediante la herramienta de estimación de propagación por onda de superficie para el enlace considerado. En dicha simulación se representa la intensidad de campo eléctrico en función de la distancia para las condiciones de frecuencia y terreno consideradas.

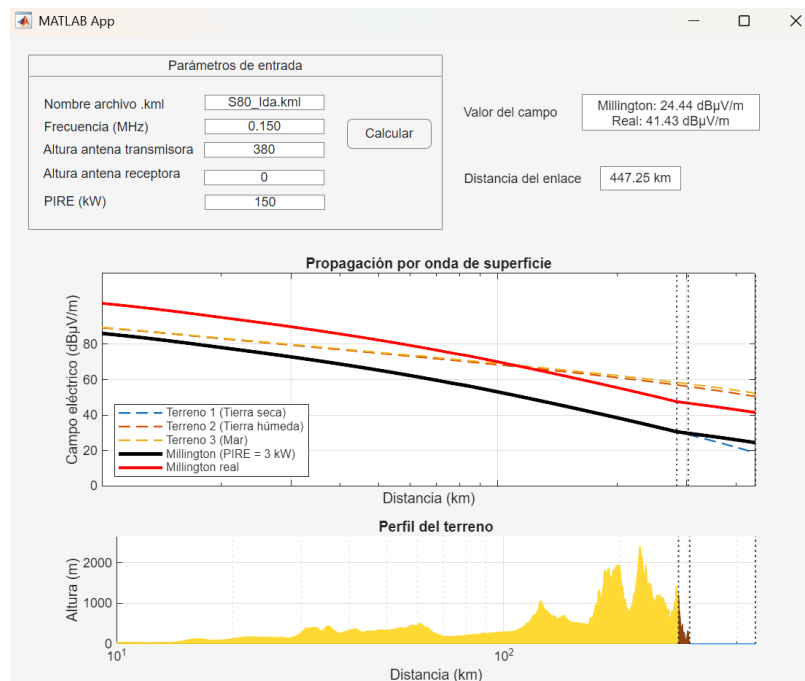


Figura 4-5. Simulación para el trayecto Guardamar del Segura – S-80 (150 kHz).

Para la distancia total del enlace, la simulación proporciona un valor de campo eléctrico en la superficie del mar de aproximadamente 41.43 dBμV/m. A partir de este valor, y aplicando la expresión (4-6), se obtiene una pérdida de 149.4 dB para una profundidad de 10 m. Sustituyendo estos valores en la expresión (4-7), el campo eléctrico estimado a la profundidad del submarino resulta ser de -79.95 dBμV/m. Este valor debe compararse con el campo eléctrico mínimo necesario para la detección de la señal, previamente calculado como -30.46 dBμV/m. Como puede observarse, el campo eléctrico a dicha profundidad es inferior al umbral requerido, por lo que, bajo las condiciones consideradas, no sería posible establecer el enlace con un submarino situado a 10 m de profundidad.

Con el objetivo de estimar la profundidad máxima a la que el submarino podría recibir la señal, se realiza el cálculo inverso a partir del campo eléctrico mínimo necesario para la detección de la señal. Dado que el campo eléctrico en la superficie del mar es de 41.43 dBμV/m y el umbral mínimo requerido es de -30.46 dBμV/m, la atenuación máxima admisible debida al agua de mar resulta ser de 71.89 dB. Considerando la atenuación por unidad de profundidad obtenida previamente (14.94 dB/m), esto corresponde a una profundidad aproximada de 4.8 m. Por tanto, bajo las condiciones consideradas, el enlace únicamente sería viable cuando el submarino se encuentre a profundidades reducidas, próximas a la superficie.

En la Figura 4-6 se muestra el resultado obtenido mediante la herramienta de estimación de propagación para el enlace considerado empleando una frecuencia de 30 kHz. Esta frecuencia se sitúa en el límite inferior de la banda LF y marca el inicio de la banda VLF, utilizada habitualmente en comunicaciones con submarinos debido a su mayor capacidad de penetración en el agua de mar.

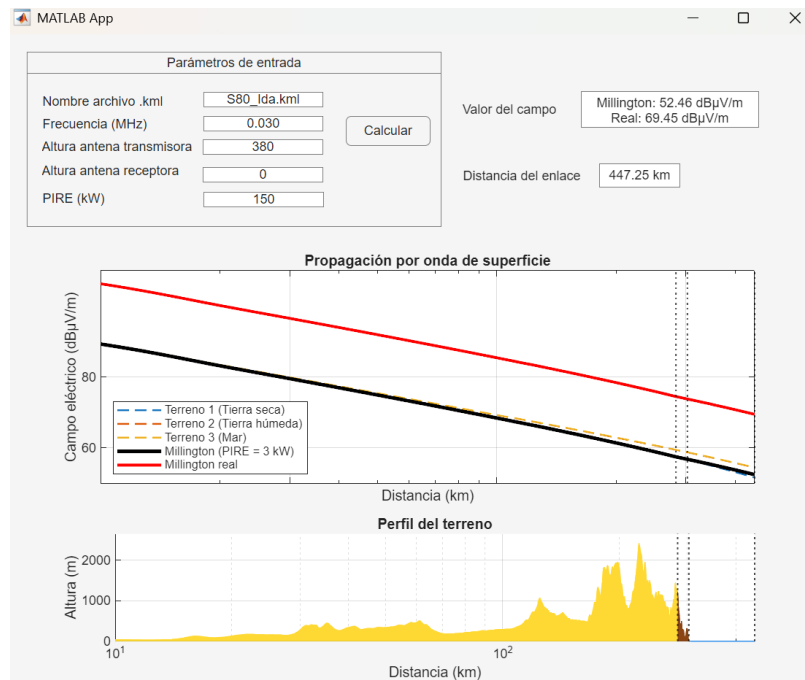


Figura 4-6. Simulación para el trayecto Guardamar del Segura – S-80 (30 kHz).

Para la distancia total del enlace, la simulación proporciona un valor de campo eléctrico en la superficie del mar de aproximadamente 69.45 dBμV/m. Al emplear una frecuencia de 30 kHz, la constante de atenuación del agua de mar toma un valor de  $\alpha = 0.77$  Np/m, lo que equivale a una atenuación de aproximadamente 6.68 dB/m. Considerando una profundidad de 10 m, la pérdida total introducida por el agua es de 66.8 dB. Aplicando la expresión (4-7), el campo eléctrico estimado a la profundidad del submarino es de 2.6 dBμV/m. Este valor debe compararse con el campo eléctrico mínimo necesario para la detección de la señal, previamente calculado como -30.46 dBμV/m, observándose que el campo recibido es superior al umbral requerido, por lo que el enlace sería viable para un submarino situado a dicha profundidad. Realizando el cálculo inverso, se obtiene que la profundidad máxima a la que podría recibirse la señal sería aproximadamente de 15 m.

La motivación principal de este escenario consiste en comprobar la profundidad de penetración de las comunicaciones en LF mencionada por el capitán de fragata Guitart en la *Revista Española de Defensa*, donde se indica que las transmisiones desde la estación de Guardamar del Segura permiten que la señal penetre el mar hasta aproximadamente 20 m de profundidad [14]. Con el objetivo de contrastar esta afirmación, y de forma adicional a las simulaciones realizadas en el entorno del Estrecho de Gibraltar destinadas a representar un escenario operativo, se llevaron a cabo simulaciones complementarias para diferentes puntos del Mediterráneo al este de la estación transmisora. Esta dirección resulta especialmente favorable para la propagación, ya que la estación de Guardamar del Segura se encuentra situada junto a la costa, por lo que el trayecto entre el transmisor y el punto de estudio discurre mayoritariamente sobre superficie marítima. Eso reduce en gran medida la influencia de tramos terrestres en la propagación por onda de superficie. Los resultados obtenidos mediante las expresiones desarrolladas anteriormente indican que, para una frecuencia de 150 kHz y a una distancia aproximada de 10 km de Guardamar del Segura, la profundidad máxima a la que podría recibirse la señal sería ligeramente superior a 9 m. Por otro lado, al considerar una frecuencia de 30 kHz para la misma distancia, los cálculos muestran que la profundidad máxima de recepción se sitúa ligeramente por encima de los 20 m.

La diferencia entre los resultados obtenidos y la profundidad indicada en la referencia puede explicarse por varias razones. En primer lugar, el análisis realizado se basa en un modelo simplificado de propagación electromagnética y de atenuación en el agua de mar, por lo que no se consideran todos los fenómenos presentes en un sistema real de comunicaciones submarinas. Además, aunque algunos de los parámetros empleados en la simulación han sido proporcionados por el CEMEDM, no ha sido posible disponer de información completa sobre todos los elementos del sistema debido al carácter sensible de estos sistemas de comunicaciones. En particular, si bien se conocen las características del receptor empleado en el análisis, no se dispone de información detallada sobre las antenas y otros medios de recepción utilizados a bordo del submarino. Por este motivo, en el presente estudio se ha asumido la existencia de una antena receptora capaz de operar en la banda LF, utilizando valores representativos obtenidos de literatura técnica especializada. Es razonable considerar que los sistemas reales instalados en los submarinos puedan disponer de configuraciones de antena y capacidades de recepción más avanzadas que las consideradas en esta simulación, lo que permitiría establecer comunicaciones a mayores profundidades que las estimadas mediante el modelo empleado.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la fuerte dependencia de la profundidad de penetración con la frecuencia de transmisión. Mientras que para frecuencias en el rango LF (150 kHz) la profundidad máxima estimada resulta limitada, el análisis realizado para frecuencias más bajas dentro de la banda VLF muestra una mejora notable en la capacidad de penetración de la señal en el agua de mar. Este comportamiento es coherente con los principios físicos de propagación electromagnética en medios conductores, donde la atenuación disminuye al reducir la frecuencia de la señal. A la vista de estos resultados, el empleo de frecuencias en el rango VLF podría suponer una mejora significativa en las capacidades de comunicación de submarinos sumergidos. En este sentido, el estudio de sistemas de transmisión en esta banda podría constituir una línea de interés para la Armada con el objetivo de ampliar sus capacidades de comunicaciones con unidades submarinas operando a mayor profundidad.

Un ejemplo de antena empleada para transmisiones en banda VLF es la que se muestra en la Figura 4-7, correspondiente a la antena de la OTAN situada en Noviken, en el municipio de Gildeskal (Noruega). Esta instalación opera en una frecuencia de 16.4 kHz y presenta una longitud aproximada de 2.2 km, lo que refleja las grandes dimensiones necesarias para las antenas que trabajan en estas frecuencias extremadamente bajas.

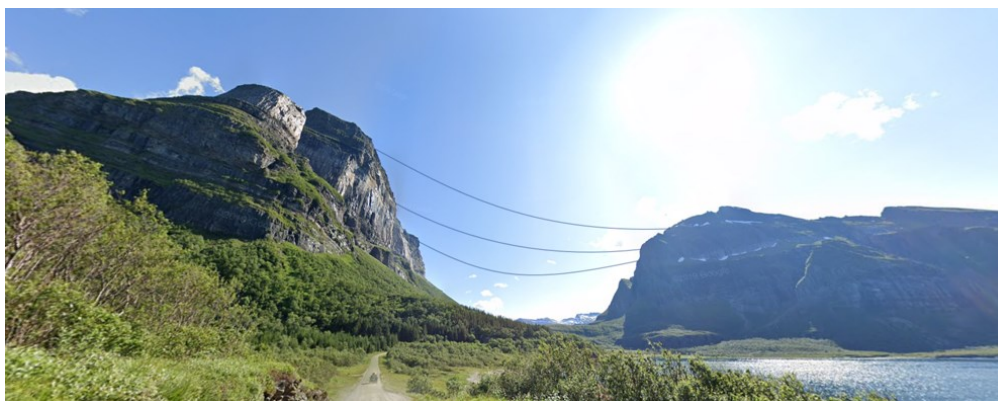


Figura 4-7. Antena OTAN Noviken-Gildeskal [37].

#### 4.1.2.2 Enlace de vuelta (*S-80 – Guardamar del Segura*)

Para analizar la viabilidad del enlace de vuelta entre el submarino S-80 y la estación receptora de Guardamar del Segura, es necesario definir previamente los parámetros del sistema de transmisión y recepción considerados en el cálculo. En la Tabla 4-4 se recogen los principales valores empleados en el análisis del enlace, incluyendo las características del transmisor embarcado, la antena utilizada y los parámetros asociados al sistema receptor en la estación terrestre.

| Parámetro                    | Valor        | Elemento                                           |
|------------------------------|--------------|----------------------------------------------------|
| Potencia transmisor          | 500 W        | Transmisor HF S-80                                 |
| Ganancia antena Tx           | 1.5 (lineal) | Antena monopolo vertical corta tipo whip retráctil |
| Sensibilidad receptor        | 0.15 $\mu$ V | Receptor EK4100D                                   |
| Altura efectiva de la antena | 11 m         | Antena TCI 550                                     |
| Altura antena Tx             | 10 m         | Antena HF S-80                                     |
| Altura antena Rx             | 33 m         | Antena TCI 550                                     |

**Tabla 4-4. Parámetros empleados en el enlace S-80 – Guardamar (fuente: CEMEDEM).**

Conviene señalar que no se dispone de información técnica detallada sobre el modelo concreto del transmisor ni de la antena HF instalados a bordo del submarino S-80, debido al carácter sensible de estos sistemas. No obstante, sí se conocen algunos de los parámetros relevantes para el análisis del enlace, como la potencia de transmisión empleada, que en este caso es de aproximadamente 500 W.

En cuanto al sistema receptor en tierra, la recepción se realiza mediante un receptor EK4100D, empleado habitualmente en sistemas de comunicaciones HF [41]. La señal es captada mediante una antena TCI 550, una antena omnidireccional de polarización vertical diseñada para comunicaciones HF de banda ancha y capaz de proporcionar cobertura mediante propagación tanto por onda de superficie como por onda ionosférica [47].

Para el estudio del enlace se considera una frecuencia operativa de 4.5 MHz, correspondiente a una banda HF adecuada para la propagación por onda de superficie en el escenario analizado.

Aplicando las expresiones presentadas anteriormente para el análisis del enlace de ida de la F-100, y utilizando los parámetros definidos para este caso, se procede a calcular los valores necesarios para evaluar el enlace. En primer lugar se calcula la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) del sistema transmisor, cuyo valor es:

$$PIRE = 750 \text{ W}$$

Considerando la sensibilidad del receptor y la altura efectiva de la antena receptora, se obtiene el campo eléctrico mínimo necesario para la correcta detección de la señal, resultando:

$$E_{min} = 0.0136 \mu\text{V/m}$$

Finalmente, este valor se expresa en unidades logarítmicas, obteniéndose:

$$E_{min} = -37.33 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

En la Figura 4-6 se muestra el resultado obtenido mediante la herramienta de estimación de propagación por onda de superficie para el enlace de vuelta entre el submarino S-80 y la estación de Guardamar del Segura. En esta simulación se representa la intensidad de campo eléctrico en función de la distancia para las condiciones de frecuencia y terreno consideradas.

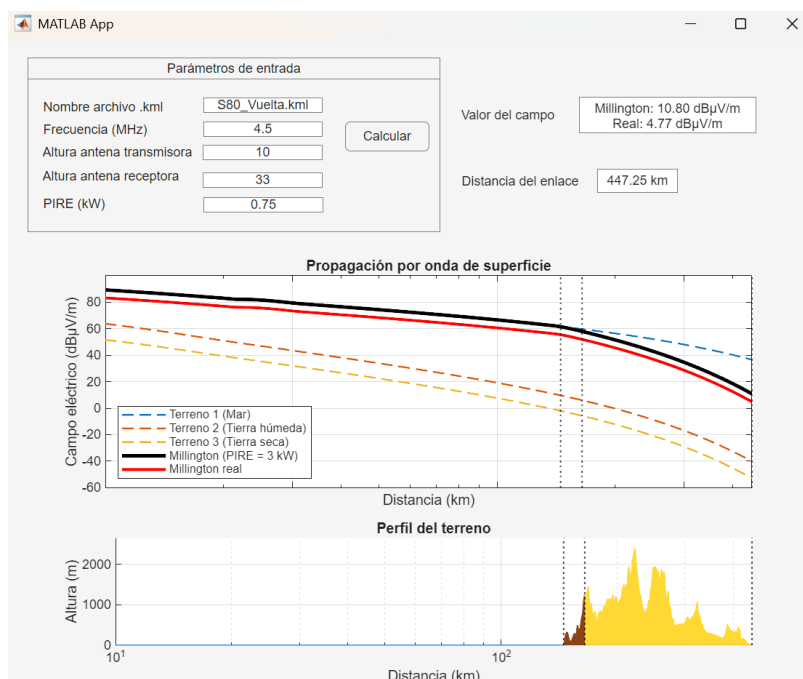


Figura 4-8. Simulación para el trayecto S-80 – Guardamar del Segura (4.5 MHz).

Para la distancia total del enlace, la simulación proporciona un valor de campo eléctrico de aproximadamente 4.77 dBμV/m en la posición del receptor. Este valor debe compararse con el campo eléctrico mínimo necesario para la detección de la señal, previamente calculado como -37.33 dBμV/m, observándose que el campo recibido es ampliamente superior al umbral requerido, por lo que el enlace resultaría viable en las condiciones consideradas.

Con el objetivo de estimar el alcance máximo de este tipo de enlace, se realizaron simulaciones adicionales en diferentes direcciones desde la estación de Guardamar del Segura. Los resultados muestran que, en dirección este sobre el mar Mediterráneo, donde la propagación se produce prácticamente íntegramente sobre superficie marítima, el enlace podría mantenerse hasta distancias del orden de 1400 km. Por otro lado, hacia el Atlántico sur el alcance máximo estimado es de aproximadamente 800 km. En cambio, en dirección norte el alcance se reduce considerablemente debido a la presencia de extensos tramos de terreno continental seco, lo que introduce una mayor atenuación en la propagación por onda de superficie.

Los resultados obtenidos en este escenario corresponden exclusivamente a la propagación por onda de superficie. Como se ha comprobado en las simulaciones realizadas, este mecanismo permite establecer enlaces a distancias considerables cuando la propagación se produce mayoritariamente sobre superficie marítima. Sin embargo, al considerar los mecanismos propios de la propagación en HF, en particular la propagación por onda ionosférica empleada en sistemas como BRASS, el alcance operativo puede incrementarse de forma significativa. En el artículo mencionado anteriormente de la *Revista Española de Defensa*, el capitán de corbeta Cortés señala que la red de comunicaciones HF de la Armada puede proporcionar una zona de cobertura permanente y segura de aproximadamente 2500 km, gracias a la reflexión de la señal en la ionosfera y a los sucesivos saltos ionosféricos que permiten extender el enlace a grandes distancias [14].

En conjunto, los escenarios analizados permiten evaluar la viabilidad de distintos enlaces radioeléctricos empleados en el ámbito naval considerando exclusivamente la propagación por onda de superficie. El análisis realizado pone de manifiesto la fuerte influencia de las condiciones del terreno, la frecuencia de operación y la configuración de las antenas en el alcance de las comunicaciones. En el caso de las comunicaciones con submarinos, se confirma además la fuerte dependencia de la profundidad de recepción con la frecuencia de transmisión, mostrando que el empleo de frecuencias más bajas

permite incrementar significativamente la penetración de la señal en el agua de mar y facilitar la recepción a mayores profundidades. Asimismo, en las comunicaciones en HF se pone de manifiesto la importancia de la propagación por onda ionosférica para alcanzar distancias muy superiores a las obtenidas mediante onda de superficie, permitiendo extender el alcance operativo de los enlaces radioeléctricos a escalas regionales o incluso intercontinentales. Todo ello pone de manifiesto la utilidad de la herramienta desarrollada para estimar el comportamiento de los enlaces radioeléctricos en escenarios operativos realistas.

## 4.2 Limitaciones del modelo

A pesar de que el modelo empleado permite obtener una estimación razonable de la propagación por onda de superficie en el escenario analizado, es importante tener en cuenta una serie de limitaciones asociadas tanto al propio modelo de propagación como a los datos utilizados para su implementación. Estas simplificaciones pueden introducir cierta incertidumbre en los resultados obtenidos, por lo que deben considerarse al interpretar los valores calculados.

### 4.2.1 *Simplificación del terreno en tramos homogéneos*

Una de las principales limitaciones del modelo empleado está asociada a la simplificación del terreno en tramos homogéneos necesaria para la aplicación del método de Millington [33]. Este método requiere dividir el trayecto de propagación en diferentes secciones caracterizadas por propiedades eléctricas uniformes, fundamentalmente la conductividad y la permitividad del terreno. En el caso analizado, el trayecto se ha representado mediante tramos diferenciados de mar y tierra, cada uno de ellos considerado homogéneo a efectos del cálculo.

Sin embargo, en condiciones reales las propiedades eléctricas del terreno no presentan cambios bruscos en puntos concretos, sino que varían de forma progresiva en función de factores como la composición del suelo, la humedad o la proximidad de la costa. La línea de costa y la transición entre distintos tipos de terreno presentan irregularidades que no siempre pueden representarse con exactitud en el modelo empleado. Como consecuencia, la discretización del trayecto en un número limitado de secciones homogéneas constituye una aproximación del entorno real y puede introducir cierta incertidumbre en la estimación de la intensidad de campo obtenida mediante el modelo de propagación.

### 4.2.2 *Condiciones ideales del modelo de propagación*

Otra de las limitaciones del modelo utilizado está relacionada con las condiciones ideales asumidas en el cálculo de la propagación. En este estudio la estimación de la intensidad de campo se ha realizado mediante el programa GRWAVE, herramienta empleada para el cálculo de la propagación por onda de superficie [34].

El modelo implementado en GRWAVE se basa en una serie de simplificaciones necesarias para poder resolver el problema de la propagación. Entre ellas se encuentra la consideración de una superficie terrestre lisa y homogénea, así como la ausencia de obstáculos o irregularidades significativas en el terreno que pueden afectar a la propagación de la señal [4]. En consecuencia, el modelo no tiene en cuenta posibles efectos derivados de la orografía, edificaciones u otros elementos del entorno que puedan introducir pérdidas adicionales o modificar localmente el comportamiento del campo electromagnético.

Además, el modelo considera condiciones medias del medio de propagación y no incluye posibles variaciones meteorológicas o ambientales que puedan influir en la propagación real de la señal. Como resultado, los valores obtenidos deben interpretarse como una estimación aproximada del comportamiento de la propagación en el escenario analizado.

### 4.2.3 *Incetidumbre en los parámetros eléctricos del terreno*

El modelo de propagación utilizado requiere la caracterización eléctrica del terreno mediante parámetros como la conductividad y la permitividad relativa, los cuales influyen directamente en la

atenuación de la onda de superficie. En la práctica, estos parámetros no suelen conocerse con exactitud y habitualmente se emplean valores típicos asociados a distintos tipos de suelo.

Las propiedades eléctricas reales del terreno pueden variar en función de factores como la humedad, la composición del suelo o las condiciones ambientales. Por este motivo, los valores empleados en el modelo constituyen una aproximación del comportamiento real del terreno, lo que puede introducir cierta incertidumbre en la estimación de la intensidad de campo obtenida.

#### *4.2.4 Incertidumbre en la caracterización topográfica del terreno*

La caracterización topográfica del terreno constituye otra fuente de incertidumbre en el modelo empleado. En el cálculo del enlace no se ha considerado la altura de las antenas obtenida como la suma de la altura física de la antena y la elevación exacta del terreno en el punto de emplazamiento. La determinación precisa de dicha elevación requiere conocer con exactitud la localización del punto dentro del modelo digital de elevación utilizado. Al trabajar con estos datos topográficos en formato raster, la altitud del terreno se representa mediante celdas con una determinada resolución espacial, por lo que la altura asignada corresponde a un valor representativo de toda la celda y no necesariamente al punto exacto donde se sitúa la antena.

Debido a esta limitación, se ha optado por no incorporar la elevación del terreno en el cálculo de la altura de las antenas, evitando así introducir posibles errores derivados de la localización exacta del punto dentro del modelo topográfico. En cualquier caso, las variaciones de altura presentes en el escenario analizado son reducidas, por lo que la influencia de estas diferencias en el resultado final del cálculo es limitada.

Adicionalmente, durante el tratamiento de los datos topográficos se ha observado la presencia de algunos puntos de terreno situados al nivel del mar o incluso ligeramente por debajo de éste. Estos valores pueden provocar que determinadas zonas de tierra sean clasificadas como superficie marina en el modelo. No obstante, este tipo de casos es poco frecuente en el área estudiada y su impacto sobre el resultado global del modelo se considera reducido.

#### *4.2.5 Rango de validez del modelo*

El método de cálculo empleado está definido para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz, intervalo en el que la propagación por onda de superficie constituye el mecanismo dominante y para el cual se han desarrollado los modelos y herramientas utilizadas en el estudio. En consecuencia, los resultados obtenidos mediante este procedimiento solo son directamente aplicables dentro de dicho rango de frecuencias.

La aplicación del modelo fuera de este intervalo requeriría el uso de métodos de propagación diferentes, ya que los mecanismos predominantes pueden variar en función de la frecuencia.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha realizado el estudio de la propagación por onda de superficie en enlaces radioeléctricos mediante la implementación de un modelo basado en el método de Millington y el programa GRWAVE. A partir de este modelo se ha desarrollado una herramienta de simulación en MATLAB, que permite analizar la propagación de la señal en trayectos reales teniendo en cuenta diferentes parámetros del sistema de comunicaciones. Los resultados obtenidos en los distintos escenarios analizados permiten extraer una serie de conclusiones sobre el comportamiento de este tipo de enlaces y su aplicación en el ámbito de las comunicaciones navales.

La primera conclusión que puede extraerse de este trabajo es el desarrollo de una herramienta de simulación en MATLAB que automatiza el análisis de la propagación por onda de superficie en enlaces radioeléctricos. La herramienta implementada permite obtener automáticamente el perfil del terreno a lo largo del trayecto de propagación, identificar los distintos tipos de superficie presentes y aplicar el modelo de propagación correspondiente a cada tramo. El modelo incorpora además los parámetros del sistema de comunicaciones, como la potencia transmitida a través de la PIRE, lo que permite calcular la evolución del campo eléctrico a lo largo del enlace. De este modo, se dispone de una herramienta capaz de evaluar de forma sistemática el comportamiento de este tipo de enlaces en diferentes escenarios.

Una segunda conclusión que se obtiene de este trabajo es que el modelo desarrollado permite analizar enlaces radioeléctricos en trayectos reales a partir de información geográfica. Mediante la integración de datos de posición y la caracterización del terreno a lo largo del trayecto, es posible estudiar el comportamiento de la propagación en escenarios concretos y evaluar la viabilidad de los enlaces bajo diferentes condiciones del sistema de comunicaciones.

Otra conclusión relevante es la influencia que tienen las características del terreno en la propagación por onda de superficie. Los resultados obtenidos permiten observar cómo el campo eléctrico varía cuando la onda se propaga a través de distintos tipos de superficie, como mar o tierra, debido a las diferencias en sus propiedades eléctricas. Esto pone de manifiesto la importancia de considerar la composición del terreno a lo largo del trayecto para estimar de forma adecuada el comportamiento de este tipo de enlaces radioeléctricos.

Finalmente, este trabajo pone de manifiesto la utilidad de las comunicaciones radioeléctricas como complemento a los sistemas satelitales, proporcionando una alternativa cuando estos no están disponibles o presentan limitaciones. Los escenarios operativos analizados muestran la importancia de la propagación ionosférica para ampliar el alcance de las comunicaciones en HF, lo que justifica el empleo de sistemas como la red BRASS. El escenario considerado con submarinos evidencia las limitaciones de las comunicaciones en LF para enlaces con unidades sumergidas, evidenciando la

necesidad de emplear frecuencias más bajas, como las bandas VLF, debido a su mayor capacidad de penetración en el agua de mar.

## 5.2 Grado de cumplimiento de los objetivos

El objetivo general se ha cumplido con éxito mediante el desarrollo de una interfaz gráfica en MATLAB que permite estimar la intensidad de campo asociada a la propagación por onda de superficie en medios heterogéneos. La herramienta desarrollada ha demostrado un funcionamiento adecuado y permite realizar de forma ágil el análisis de enlaces radioeléctricos en entornos marítimos. Además, aunque inicialmente el estudio estaba orientado a las bandas LF, MF y HF, la herramienta también permite trabajar en frecuencias de la banda VLF, ampliando así el rango de aplicación previsto inicialmente.

En relación con los objetivos específicos planteados, el objetivo de fundamentación técnica se ha cumplido mediante el estudio de los principios físicos que gobiernan la propagación por onda de superficie en las bandas LF, MF y HF, así como el análisis de la influencia de los parámetros electromagnéticos del terreno, especialmente la conductividad y la permitividad relativa, en el comportamiento de los enlaces radioeléctricos.

El objetivo de integración de motores de cálculo se ha alcanzado mediante la automatización del software GRWAVE. Para ello se ha desarrollado una interfaz gráfica en MATLAB App Designer que permite ejecutar el motor de cálculo implementado en FORTRAN y procesar automáticamente los datos de salida generados por el programa.

La implementación del algoritmo de Millington ha permitido abordar el modelado de heterogeneidad en trayectos de propagación. Gracias a este algoritmo es posible analizar trayectos mixtos compuestos por diferentes tipos de terreno obteniendo estimaciones más realistas de la intensidad de campo en escenarios de propagación complejos.

En relación con la geolocalización y la obtención de perfiles de terreno, se ha podido implementar el uso de archivos KML de Google Earth para la definición de los trayectos de propagación entre transmisor y receptor. A partir de estos trayectos, los perfiles se han obtenido mediante modelos digitales de elevación (DEM) procedentes de la misión SRTM, lo que permite representar de forma realista la topografía del terreno en los escenarios analizados.

En cuanto al objetivo de visualización y análisis comparativo, se ha desarrollado un entorno gráfico que permite representar las curvas de intensidad de campo obtenidas, facilitando la comparación entre escenarios de propagación homogéneos y heterogéneos, así como la observación de fenómenos característicos como el *recovery effect*.

El objetivo de la aplicación a sistemas críticos se ha abordado mediante el análisis de diferentes sistemas de comunicaciones relevantes en el ámbito marítimo y naval, como NAVTEX, GMDSS y el sistema BRASS/BREITA. Además, la herramienta desarrollada permite simular de forma adecuada los enlaces asociados a estos sistemas mediante propagación por onda de superficie, lo que facilita el estudio de sus coberturas radioeléctricas y la evaluación de su comportamiento en distintos escenarios operativos.

Por otro lado, el objetivo de modernización metodológica y educativa se ha cumplido mediante el desarrollo de una herramienta informática que sustituye los métodos tradicionales basados en la consulta manual de gráficas de la ITU-R, permitiendo realizar los cálculos de forma automática y facilitando además la comprensión de los fenómenos de propagación mediante una interfaz gráfica interactiva. En este sentido, la herramienta desarrollada podría emplearse como apoyo en prácticas docentes de asignaturas relacionadas con la propagación electromagnética y las radiocomunicaciones.

Finalmente, se ha cumplido el objetivo de simulación de enlaces operativos, mediante la evaluación de distintos escenarios de comunicación, incluyendo la comunicación con submarinos durante su tránsito

por el Estrecho de Gibraltar desde la Estación Radionaval de Guardamar, así como enlaces entre buques y estaciones costeras. Estos estudios han permitido analizar la viabilidad de los enlaces y optimizar la planificación de las coberturas radioeléctricas.

### **5.3 Líneas de mejora y trabajos futuros**

A pesar de los resultados obtenidos, el trabajo desarrollado puede ampliarse en diferentes aspectos que permitirían mejorar la precisión del modelo y ampliar sus aplicaciones.

Una posible línea de mejora consiste en incorporar al modelo la propagación ionosférica, lo que permitiría analizar enlaces HF de larga distancia en los que la señal se refleja en la ionosfera. De este modo, sería posible estudiar de forma conjunta los diferentes mecanismos de propagación presentes en las comunicaciones en banda HF y evaluar con mayor precisión escenarios operativos reales.

Otra posible mejora consiste en refinar la caracterización eléctrica del terreno utilizada en el modelo. En este trabajo se han empleado valores aproximados de conductividad y permitividad asociados a distintos tipos de terreno. Como mejora, sería posible incorporar mapas geográficos con valores reales de estos parámetros, lo que permitiría representar con mayor precisión las propiedades eléctricas del terreno a lo largo del trayecto de propagación y mejorar la estimación del comportamiento de la onda de superficie.

Finalmente, el modelo podría ampliarse incorporando otros factores que influyen en la propagación y que no han sido considerados en este estudio, como la influencia de las condiciones meteorológicas o la presencia de obstáculos, aunque a estas frecuencias relativamente bajas su influencia es menor. La inclusión de estos elementos permitiría representar de forma más realista el entorno de propagación y mejorar la capacidad del modelo para analizar enlaces radioeléctricos en escenarios complejos.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Hunt, «Sabotaje a cables submarinos: ¡Bajo el agua, desprotegidos y bajo ataque!», *Marine Technology News*, 10 de diciembre de 2025. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.marinetechnews.com/news/sabotaje-cables-submarinos-%C2%A1bajo-agua-desprotegidos-304565>
- [2] International Telecommunication Union, «Non-geostationary satellite systems», 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int:443/en/mediacentre/backgrounders/Pages/Non-geostationary-satellite-systems.aspx>
- [3] D. M. Gerstein y E. M. Leidy, «Emerging Technology and Risk Analysis: The Space Domain and Critical Infrastructure», RAND Corporation, RR-A2875-1, 2025. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RRA2875-1.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2875-1.html)
- [4] Union Internacional de Telecomunicaciones, «Método de predicción de la propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz», UIT-R (Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones), Ginebra, Recomendación UIT-R P.368-10. Accedido: 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.368>
- [5] R. Á. Valencia Cruz, «Comunicaciones HF en la Armada (Modernización de las estaciones radio de la Armada. Programas nacionales y NSIP)», *Revista General de Marina - Temas Profesionales*, pp. 615-621, 2009.
- [6] Armada, «Instrucción Permanente de la Flota número 1403, sobre el mantenimiento de la capacidad de comunicaciones en HF en los enlaces Buque-Tierra-Buque. Cambio 1», Estado Mayor de la Flota, Rota (Cádiz), IPF 1403/2020, jun. 2020.
- [7] J. Martínez Lafuene, «La evolución de las comunicaciones HF en la Armada. Sistema BRASS», *Revista Española de Defensa*, pp. 865-879, noviembre de 2024.
- [8] J. M. Hernando Rábanos, J. M. Riera Salís, y L. Mendo Tomás, *Transmisión por radio*, 7ª ed., Febrero 2013, 6ª reimp., Marzo 2021. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2021.
- [9] M. P. M. Hall y Institution of Electrical Engineers, Eds., *Propagation of radiowaves*. London: Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [10] International Maritime Organization, Ed., *GMDSS manual: global maritime distress and safety system*, Eleventh edition, 2024 edition. en IMO publication. London: International Maritime Organization, 2024.
- [11] Organización Marítima Internacional (OMI), «Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS)», Londres, Convenio Internacional, 1974.
- [12] «GMDSS - Global Maritime Distress Safety System», electromaritima. Accedido: 24 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.electromaritima.com.mx/post/gmdss-global-maritime-distress-safety-system>

- [13] Ministerio de Defensa, «Defensa impulsa la sustitución del satélite SPAINSAT», Ministerio de Defensa (Gobierno de España), Madrid, Nota de prensa, ene. 2026.
- [14] G. Cruz, «Comunicaciones de alta frecuencia», *Revista Española de Defensa*, Ministerio de Defensa, Madrid, pp. 40-43, octubre de 2023.
- [15] Armada, «Plan 1/2024 del Almirante Segundo Jefe del Estado Mayor de la Armada sobre capacidades CIS/TIC para la Armada 2024-2029», Ministerio de Defensa (Gobierno de España), Madrid, 2024.
- [16] D. J. Griffiths, *Introduction to electrodynamics*, 4 ed. Cambridge: Cambridge university press, 2017.
- [17] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, 2. ed., [Nachdr.]. en World student series edition. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 2004.
- [18] L. Sevgi, F. Aklleman, y L. B. Felsen, «Groundwave Propagation Modeling: Problem-Matched Analytical», *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, n.º 1, IEEE, pp. 55-75, febrero de 2002. doi: 10.1109/74.995187.
- [19] R. E. Collin, *Antennas and radiowave propagation*, International ed. en McGraw-Hill Series in electrical engineering Radio, television, radar, and antenas. New York, NY: McGraw-Hill, 1985.
- [20] M. Arias Acuña y Ó. Rubiños López, *Radiocomunicación*. Santiago de Compostela: Andavira, 2011.
- [21] C. Klever Javier, «Estudio e instalación de enlaces microonda en banda libre entre Quito y Latacunga para transmisión de datos e internet para la empresa Ecuaoiline S.A.», Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010.
- [22] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetics*, Second edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [23] E. C. Jordan y K. G. Balmain, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2nd edition. New York: Prentice-Hall, 1950.
- [24] F. T. Ulaby y U. Ravaioli, *Fundamentals of applied electromagnetics*, Seventh edition. Boston: Pearson, 2015.
- [25] K. A. Norton, «The Propagation of Radio Waves over the Surface of the Earth and in the Upper Atmosphere», *Proc. IEE*, vol. 24, n.º 10, pp. 1367-1387, oct. 1936, doi: 10.1109/JRPROC.1936.227360.
- [26] International Telecommunication Union, «Atlas mundial de la conductividad del suelo», Geneva, ITU-R P.832-4, 2012.
- [27] International Telecommunication Union, «Características eléctricas de la superficie de la Tierra», Geneva, Recomendación UIT-R ITU-R P.527, sep. 2021.
- [28] International Telecommunication Union, «Constitution of the International Telecommunication Union», Geneva, 2019.
- [29] A. Sommerfeld, «Über die Ausbreitung des Wellen in der drahtlosen Telegraphie», vol. 28, n.º 665-736, *Annalen der Physik*, 1909.
- [30] International Telecommunication Union, «Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz», I, Geneva, ITU-R P.1546, 2019.
- [31] International Telecommunication Union, «Método de predicción de la propagación específico del trayecto para servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias de 30 MHz a 6 GHz», Geneva, ITU-R P.1812, sep. 2025.
- [32] L. B. Falsen y N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973.
- [33] G. Millington, «Ground-Wave Propagation Over an Inhomogeneous Smooth», *Proceedings of the IEE*, vol. 96, n.º Part III, pp. 53-64, 1949.
- [34] *GRWAVE: Ground-Wave Propagation Computer Program*. International Telecommunication Union.
- [35] J. D. Parsons y J. D. Parsons, *The mobile radio propagation channel*, 2. ed., Repr. Chichester Weinheim: Wiley, 2001.

- [36] U.S. Geological Survey (USGS), «Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Data». Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [37] *Google Earth*. (2024). Google LLC. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- [38] R. W. Sinnott, «Virtues of the Haversine», vol. 68, n.º 2, *Sky and Telescope*, pp. 159-160.
- [39] National Imagery and Mapping Agency, «Department of Defense World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems», National Imagery and Mapping Agency (NIMA), TR8350.2, 2000. [En línea]. Disponible en: <https://earth-info.nga.mil/index.php?dir=wgs84&action=wgs84>
- [40] TCI International, Inc, «Rotatable Log-Periodic Antenna Model 521», Fremont, CA, USA, Data Sheet.
- [41] Rohde & Schwarz, «M3SR Series 4100 HF Transceiver Family - Brochure», Data Sheet, 2012.
- [42] Rohde & Schwarz, «STA 10 A/D Active Monopole Antenna 0.01-30 MHz», Data Sheet.
- [43] ELNA GmbH, «Mast Antennas STA 40 M, STA 50 M, STA 60 M», Data Sheet, 2000.
- [44] Rohde & Schwarz, «R&S Series2000 HF Radio Family», Data Sheet, 2015.
- [45] «US Naval Radio Station Guardamar del Segura, Spain». Accedido: 20 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.navy-radio.com/commsta/guardamar.htm>
- [46] Elsyscom GmbH, «TRAM 50 – 50 kW Solid State MF Broadcast Transmitter Datasheet», Elsyscom, Data Sheet.
- [47] TCI International, Inc, «Model 550 Inverted Cone Antenna», Fremont, CA, USA, Data Sheet, 2012.

## **ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES**

El desarrollo de herramientas para el análisis y planificación de enlaces radioeléctricos presenta diversas implicaciones sociales, económicas y ambientales. En este trabajo se ha desarrollado una interfaz gráfica que permite estimar la intensidad de campo eléctrico producida por propagación por onda de superficie, facilitando el estudio de enlaces radioeléctricos en bandas VLF, LF, MF y HF y en trayectos con diferentes características del terreno. Este tipo de herramientas contribuye a mejorar la planificación y análisis de sistemas de radiocomunicación, especialmente en entornos donde la propagación por onda de superficie depende en gran medida de las propiedades eléctricas del suelo y de la frecuencia de operación. La propagación por onda de superficie constituye uno de los mecanismos principales de comunicación a bajas frecuencias y permite establecer enlaces a grandes distancias, particularmente en entornos marítimos, donde la conductividad del agua favorece la propagación de la señal.

Desde el punto de vista social, la mejora en el estudio y planificación de sistemas de radiocomunicaciones tiene un impacto directo en ámbitos relacionados con la seguridad marítima y las comunicaciones a larga distancia. Las comunicaciones radioeléctricas en bandas bajas siguen siendo fundamentales como sistemas robustos y complementarios a otras infraestructuras de comunicación, permitiendo mantener enlaces incluso en situaciones en las que otras tecnologías no están disponibles o presentan limitaciones. Disponer de herramientas que faciliten el análisis de la cobertura radioeléctrica permite optimizar la ubicación de estaciones transmisoras y prever el comportamiento del enlace en distintos tipos de terreno, lo que contribuye a mejorar la fiabilidad de las comunicaciones y, en consecuencia, la seguridad de las operaciones que dependen de ellas.

En el ámbito económico, el uso de herramientas de simulación y cálculo automatizado permite reducir los costes asociados a la planificación de sistemas de radiocomunicación. Tradicionalmente, el análisis de la propagación por onda de superficie se ha realizado mediante el uso de curvas de propagación y procedimientos gráficos, lo que puede resultar laborioso y menos flexible en estudios complejos. La automatización de estos cálculos mediante software permite realizar evaluaciones de forma rápida y eficiente, reduciendo la necesidad de campañas extensivas de medidas experimentales y optimizando el diseño de redes de comunicación. Además, una mejor planificación de los sistemas radioeléctricos contribuye a un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, que constituye un recurso limitado y de gran valor estratégico y económico.

En cuanto a las implicaciones ambientales, el impacto directo de este trabajo es reducido, ya que se trata principalmente de un desarrollo software que no implica la construcción de nuevas infraestructuras ni la generación directa de emisiones contaminantes. No obstante, el uso de herramientas de simulación puede contribuir indirectamente a una planificación más eficiente de los sistemas de radiocomunicación, permitiendo ajustar mejor las potencias de transmisión necesarias para cubrir determinadas áreas y evitando sobredimensionamientos en los sistemas emisores. Esto puede traducirse en un menor consumo energético asociado a las estaciones transmisoras y en una reducción de las interferencias entre sistemas radioeléctricos. Por otro lado, al reducir la necesidad de pruebas experimentales repetidas en campo, el uso de herramientas de simulación también contribuye a disminuir desplazamientos y actividades logísticas asociadas a campañas de medición, lo que indirectamente reduce el impacto ambiental asociado a dichas actividades. El desarrollo de herramientas de análisis como la presentada en este trabajo contribuye a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de radiocomunicación.

## **ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES**

Las radiocomunicaciones constituyen una infraestructura fundamental para numerosos servicios esenciales, como las comunicaciones marítimas, los sistemas de emergencia y determinadas comunicaciones estratégicas. Por ello, el análisis y la planificación adecuados de los enlaces radioeléctricos contribuyen a mejorar la fiabilidad de estos sistemas y a garantizar que puedan desempeñar correctamente su función en situaciones críticas.

Desde una perspectiva ética, resulta importante promover un uso responsable del espectro radioeléctrico, ya que se trata de un recurso limitado que debe ser gestionado de forma eficiente para evitar interferencias entre distintos servicios. El uso de herramientas de análisis y simulación permite realizar estudios previos que facilitan una planificación más precisa de los sistemas de transmisión y favorecen un uso más racional del espectro disponible.

Por otra parte, el empleo de modelos de propagación y metodologías de cálculo basadas en recomendaciones y estándares internacionales contribuye a garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Esto refuerza la responsabilidad del ingeniero en el desarrollo de soluciones tecnológicas rigurosas y en la aplicación adecuada del conocimiento técnico en el ámbito de las telecomunicaciones.

## ANEXO III: CURVAS ITU-R UTILIZADAS

A continuación, se muestran las curvas de propagación por onda de superficie de la Recomendación ITU-R P.368 utilizadas como referencia en este trabajo. Estas curvas fueron generadas originalmente mediante el programa GRWAVE, empleado para el cálculo de la propagación de ondas electromagnéticas sobre una Tierra esférica considerando distintas características eléctricas del terreno. En el desarrollo del modelo implementado en este trabajo también se ha utilizado GRWAVE para la obtención de las curvas de propagación correspondientes a cada tipo de superficie. Asimismo, los valores de conductividad eléctrica y permitividad relativa del suelo empleados en las simulaciones coinciden con los utilizados en las curvas de la recomendación ITU-R, garantizando así la coherencia entre las curvas de referencia y los resultados generados por la herramienta desarrollada [4].

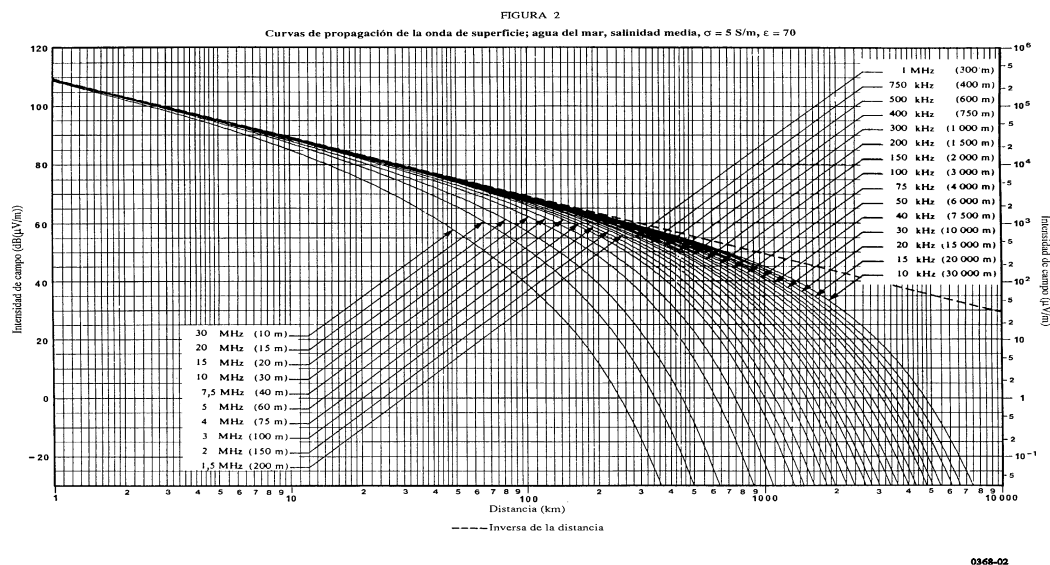


Figura A3-1. Curvas sobre agua de mar según ITU-R P.368 [4].

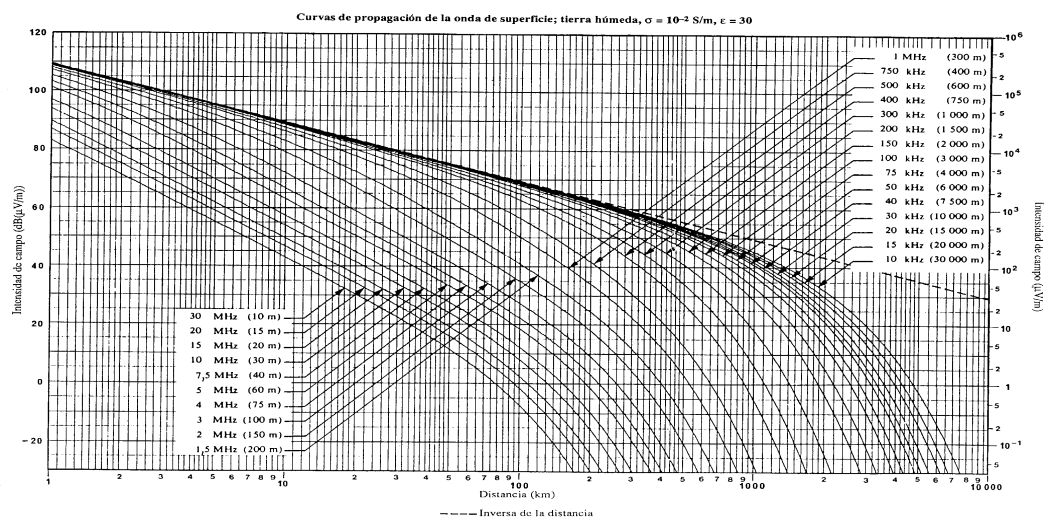


Figura A3-2. Curvas sobre tierra húmeda según ITU-R P.368 [4].

# DESARROLLO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA PARA LA ESTIMACIÓN DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO POR ONDA DE SUPERFICIE EN MEDIOS HETEROGÉNEOS

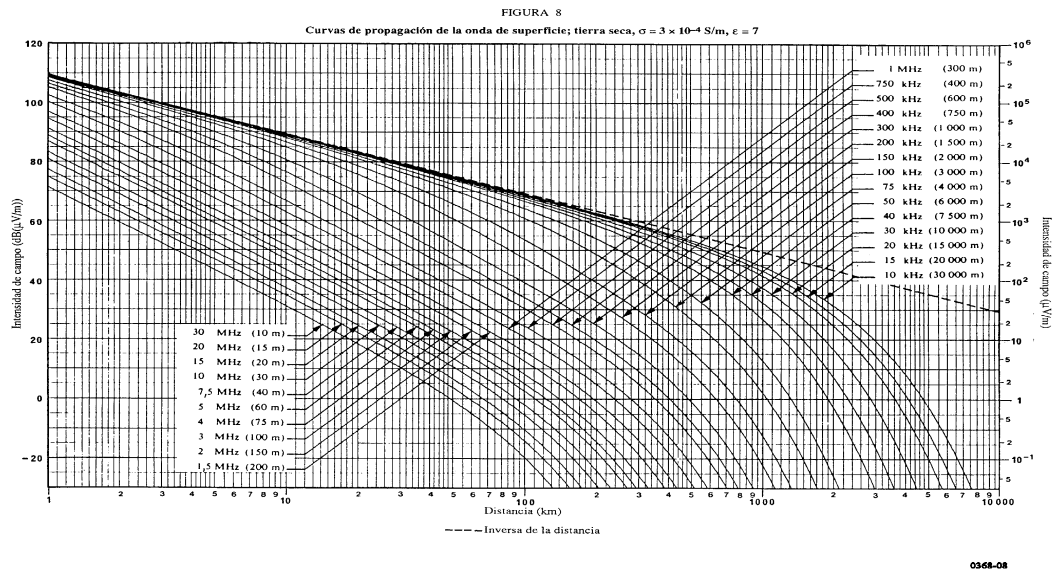


Figura A3-3. Curvas sobre tierra seca según ITU-R P.368 [4].

## ANEXO IV: CÓDIGO FUENTE DE LOS MÓDULOS DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

En este anexo se incluye el código fuente de los módulos desarrollados para la implementación de la herramienta de simulación presentada en este trabajo. Estos módulos constituyen los distintos componentes funcionales del software, encargados de realizar tareas específicas dentro del proceso de simulación. La organización del código sigue la estructura modular mostrada en la Figura 3-1, lo que facilita el funcionamiento interno de la herramienta.

### *ejecutar\_grwave*

Encargado de ejecutar el motor de cálculo GRWAVE y procesar los resultados obtenidos para la estimación del campo eléctrico.

```
function data = ejecutar_grwave(freq, sigma, epsilon, ht, hr, dmin, dmax)
```

```
    fid = fopen('ex.inp','w');

    fprintf(fid,'FREQ %f\n', freq);
    fprintf(fid,'IPOLRN 1\n');

    fprintf(fid,'HTT %f\n', ht);
    fprintf(fid,'HRR %f\n', hr);

    fprintf(fid,'DMIN %f\n', dmin);
    fprintf(fid,'DMAX %f\n', dmax);

    fprintf(fid,'SIGMA %f\n', sigma);
    fprintf(fid,'EPSLON %f\n', epsilon);

    fprintf(fid,'GO\n');
    fprintf(fid,'STOP\n');

    fclose(fid);

    if exist('resultado.out','file')
        delete('resultado.out');
    end

    system('grwave.exe < ex.inp > resultado.out');

    fid = fopen('resultado.out','r');
    data = [];

    while ~feof(fid)
        linea = fgetl(fid);
        numeros = sscanf(linea,'%f');

        if length(numeros) >= 2
            data = [data; numeros(1:2)'];
        end
    end
end
```

```
fclose(fid);
```

```
end
```

### ***distancia\_gps***

Calcula la distancia entre el transmisor y el receptor a partir de sus coordenadas geográficas.

```
function d_km = distancia_gps(lat1, lon1, lat2, lon2)
```

```
R = 6371;
```

```
lat1 = deg2rad(lat1);
```

```
lon1 = deg2rad(lon1);
```

```
lat2 = deg2rad(lat2);
```

```
lon2 = deg2rad(lon2);
```

```
dlat = lat2 - lat1;
```

```
dlon = lon2 - lon1;
```

```
a = sin(dlat/2)^2 + cos(lat1)*cos(lat2)*sin(dlon/2)^2;
```

```
c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1 - a));
```

```
d_km = R * c;
```

```
end
```

### ***altura\_srtm***

Calcula la altitud del terreno a partir de datos del modelo digital de elevaciones (DEM) procedentes de la SRTM.

```
function h = altura_srtm(lat, lon, folder)
```

```
lat_tile = floor(lat);
```

```
lon_tile = floor(lon);
```

```
if lat_tile >= 0
```

```
    lat_str = sprintf('n%02d', lat_tile);
```

```
else
```

```
    lat_str = sprintf('s%02d', abs(lat_tile));
```

```
end
```

```
if lon_tile >= 0
```

```
    lon_str = sprintf('e%03d', lon_tile);
```

```
else
```

```
    lon_str = sprintf('w%03d', abs(lon_tile));
```

```
end
```

```
tile_name = [lat_str '_' lon_str '_1arc_v3.tif'];
```

```
file_path = fullfile(folder, tile_name);
```

```
if ~isfile(file_path)
    h = 0;
    return
end

[Z, R] = readgeoraster(file_path);

[row, col] = geographicToDiscrete(R, lat, lon);
h = double(Z(row, col));

end
```

### ***terrenos***

Determina las propiedades eléctricas del terreno necesarias para el cálculo de la propagación por onda de superficie.

```
function terreno = terrenos(id)

switch id
case 1
    terreno.nombre = 'Mar';
    terreno.eps    = 70;
    terreno.sigma  = 5;

case 2
    terreno.nombre = 'Tierra húmeda';
    terreno.eps    = 30;
    terreno.sigma  = 1e-2;

case 3
    terreno.nombre = 'Tierra seca';
    terreno.eps    = 7;
    terreno.sigma  = 3e-4;

otherwise
    error('Terreno %d no definido en terrenos.m', id);
end
end
```

### ***simulacion\_millington***

Este módulo constituye el núcleo del software y coordina la ejecución del resto de módulos necesarios para la simulación del enlace radioeléctrico.

```
function [d_plot, E_plot, d_query, E_query, ...
    E_real_query, E_real_plot, ...
    data, T, d_cambios, ...
    dist_total, h_profile, tipo_terreno] = ...
    simulacion_millington(kml_file, freq, ht, hr, PIRE_kW)

dmin = 10;
```

```
kml = xmlread(kml_file);
coord_nodes = kml.getElementsByTagName('coordinates');

coords = [];

for i = 0:coord_nodes.getLength-1
    coord_str = char(coord_nodes.item(i).getFirstChild.getData);
    coord_lines = strsplit(strtrim(coord_str));

    for j = 1:length(coord_lines)
        c = strsplit(coord_lines{j}, ',');
        lon = str2double(c{1});
        lat = str2double(c{2});
        coords = [coords; lat lon];
    end
end

num_puntos = size(coords,1);
distancias = zeros(1, num_puntos-1);

for i = 1:num_puntos-1
    distancias(i) = distancia_gps( ...
        coords(i,1), coords(i,2), ...
        coords(i+1,1), coords(i+1,2));
end

lat_tx = coords(1,1);
lon_tx = coords(1,2);
lat_rx = coords(end,1);
lon_rx = coords(end,2);

d_query = sum(distancias);

dmax = 1.1 * d_query;

res_km = 0.5;
num_samples = max(2, round(d_query / res_km));

wgs84 = wgs84Ellipsoid('kilometer');

[lat_profile, lon_profile] = track2( ...
    'gc', ...
    lat_tx, lon_tx, ...
    lat_rx, lon_rx, ...
    wgs84, ...
    'degrees', ...
    num_samples);

h_profile = zeros(1, num_samples);

for k = 1:num_samples
    h_profile(k) = altura_srtm( ...
```

```
    lat_profile(k), lon_profile(k), ...
    'SRNM');
end

h_profile = movmean(h_profile, 3);

tipo_terreno = zeros(1, num_samples);

dist_total = linspace(0, d_query, num_samples);

mar_idx = find(h_profile <= 3);

for k = 1:num_samples

    if h_profile(k) <= 5
        tipo_terreno(k) = 1;

    else
        tipo_terreno(k) = 3;
    end

end

for k = 1:num_samples

    if tipo_terreno(k) ~= 1

        if ~isempty(mar_idx)

            dist_min = min(abs(dist_total(k) - dist_total(mar_idx)));

            if dist_min <= 20
                tipo_terreno(k) = 2;
            end

        end

    end

end

cambios = find(diff(tipo_terreno) ~= 0);

tramos = tipo_terreno([1 cambios+1]);

N = length(tramos);

for i = 1:N
    T{i} = terrenos(tramos(i));
end

dist_total = linspace(0, d_query, num_samples);

distancias = diff(dist_total([1 cambios+1 num_samples]));
```

```
data = cell(1, N);

for i = 1:N
    data{i} = ejecutar_grwave(freq, T{i}.sigma, T{i}.eps, ht, hr, dmin, dmax);
end

if N == 1

    [d_plot, idx] = unique(data{1}(:,1));
    E_plot = data{1}(idx,2);
    E_query = interp1(d_plot, E_plot, d_query, 'linear', 'extrap');
    d_cambios = [];

    DeltaE = 10*log10(PIRE_kW/3);

    E_real_query = E_query + DeltaE;
    E_real_plot = E_plot + DeltaE;
else

    D = cumsum(distancias);
    d_cambios = D;

    [d_plot, idx1] = unique(data{1}(:,1));
    E_plot = zeros(size(d_plot));

    for k = 1:length(d_plot)

        d = d_plot(k);

        m = find(D > d, 1);
        if isempty(m)
            m = N;
        end

        if m == 1
            E_plot(k) = interp1(d_plot, data{1}(idx1,2), d, 'linear', 'extrap');
        else
            E_total = 0;

            [d1, i1] = unique(data{1}(:,1));
            E1 = data{1}(i1,2);
            E_total = interp1(d1, E1, D(1), 'linear', 'extrap');

            for i = 2:m-1

                [d_i, ii] = unique(data{i}(:,1));
                E_i = data{i}(ii,2);

                E_total = E_total ...
                    - interp1(d_i, E_i, D(i-1), 'linear', 'extrap');
```

```
E_total = E_total ...  
    + interp1(d_i, E_i, D(i), 'linear', 'extrap');  
end  
  
[d_m, im] = unique(data{m}(:,1));  
E_m = data{m}(im,2);  
  
E_total = E_total ...  
    - interp1(d_m, E_m, D(m-1), 'linear', 'extrap');  
  
E_total = E_total ...  
    + interp1(d_m, E_m, d, 'linear', 'extrap');  
  
E_plot(k) = E_total;  
  
end  
end  
  
E_query = interp1(d_plot, E_plot, d_query, 'linear', 'extrap');  
  
DeltaE = 10*log10(PIRE_kW/3);  
  
E_real_query = E_query + DeltaE;  
E_real_plot = E_plot + DeltaE;  
  
end
```

Se incluye también el código correspondiente a la interfaz desarrollada en MATLAB APP Designer, que permite al usuario introducir los parámetros del enlace, ejecutar la simulación y visualizar los resultados obtenidos de forma gráfica.

```
classdef app < matlab.apps.AppBase  
  
    % Properties that correspond to app components  
    properties (Access = public)  
        UIFigure          matlab.ui.Figure  
        DistanciadelenlaceTextAreaLabel  matlab.ui.control.Label  
        DistanciadelenlaceTextArea      matlab.ui.control.TextArea  
        AlturaantenareceptoraEditField  matlab.ui.control.EditField  
        AlturaantenareceptoraEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label  
        AlturaantenatransmisoraEditField  matlab.ui.control.EditField  
        AlturaantenatransmisoraEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label  
        ValordelcampoTextArea          matlab.ui.control.TextArea  
        ValordelcampoTextAreaLabel      matlab.ui.control.Label  
        ParmetrosdeentradaPanel        matlab.ui.container.Panel  
        PIREkWEditField                  matlab.ui.control.EditField  
        PIREkWEditFieldLabel              matlab.ui.control.Label  
        CalcularButton                    matlab.ui.control.Button  
        FrecuenciaMHzEditField            matlab.ui.control.EditField  
        FrecuenciaMHzEditFieldLabel        matlab.ui.control.Label  
        NombrearchivokmlEditField          matlab.ui.control.EditField  
        NombrearchivokmlEditFieldLabel      matlab.ui.control.Label
```

```
UIAxes2          matlab.ui.control.UIAxes
UIAxes           matlab.ui.control.UIAxes
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Button pushed function: CalcularButton
function CalcularButtonPushed(app, event)
try

    kml_file = app.NombreachivokmlEditField.Value;
    freq = str2double(app.FrecuenciaMHzEditField.Value);
    ht = str2double(app.AlturaantenatransmisoraEditField.Value);
    hr = str2double(app.AlturaantenareceptoraEditField.Value);
    PIRE_kW = str2double(app.PIREkWEditField.Value);

    [d_plot, E_plot, d_query, E_query, ...
     E_real_query, E_real_plot, ...
     data, T, d_cambios, ...
     dist_total, h_profile, tipo_terreno] = ...
        simulacion_millington(kml_file, freq, ht, hr, PIRE_kW);

    if max(d_plot) == min(d_plot)
d_plot = [d_plot d_plot+1];
    end
    d_common = logspace(log10(10), log10(max(d_query,11)), 2000);

    cla(app.UIAxes)
    hold(app.UIAxes,'on')

    colors = lines(length(data));

    hTerr = gobjects(length(data),1);

    for i = 1:length(data)
        [d_i, idx_i] = unique(data{i}(:,1));
        E_i = data{i}(idx_i,2);

        E_interp = interp1(d_i, E_i, d_common, 'pchip');

        hTerr(i) = semilogx(app.UIAxes, d_common, E_interp, '--', ...
            'Color', colors(i,:), ...
            'LineWidth', 1.2);
    end

    E_plot_interp = interp1(d_plot, E_plot, d_common, 'pchip');

    hM = semilogx(app.UIAxes, d_common, E_plot_interp, ...
        'k', 'LineWidth', 2.5);
```

```
E_real_interp = interp1(d_plot, E_real_plot, d_common, 'pchip');

hReal = semilogx(app.UIAxes, d_common, E_real_interp, ...
    'r', 'LineWidth', 2);

for k = 1:length(d_cambios)
    xline(app.UIAxes, d_cambios(k), ...
        ':k', 'LineWidth', 1);
end

labels = cell(1, length(data)+2);

for i = 1:length(data)
    labels{i} = sprintf('Terreno %d (%s)', i, T{i}.nombre);
end

labels{end-1} = 'Millington (PIRE = 3 kW)';
labels{end} = 'Millington real';

legend(app.UIAxes, [hTerr(:).' hM hReal], labels, ...
    'Location','southwest');

app.UIAxes.XScale = 'log';
app.UIAxes.XMinorGrid = 'off';
app.UIAxes.YMinorGrid = 'off';
app.UIAxes.XTick = [10 30 100 300];
if d_query > 10
    app.UIAxes.XLim = [10 d_query];
else
    app.UIAxes.XLim = [10 11];
end
app.UIAxes.YTick = -100:20:80;
app.UIAxes.XTickLabel = [];
app.UIAxes.XLabel.String = "";

xlabel(app.UIAxes, 'Distancia (km)')
ylabel(app.UIAxes, 'Campo eléctrico (dBμV/m)')
title(app.UIAxes, 'Propagación por onda de superficie')
grid(app.UIAxes, 'on')
hold(app.UIAxes, 'off')

hold(app.UIAxes, 'off')

cla(app.UIAxes2)
hold(app.UIAxes2, 'on')

for i = 1:length(dist_total)-1

    switch tipo_terreno(i)

        case 1
            col = [0.2 0.6 1];
```

```
case 2
    col = [0.55 0.27 0.07];

case 3
    col = [1 0.85 0.2];

otherwise
    col = [0.7 0.7 0.7];
end

area(app.UIAxes2, ...
    dist_total(i:i+1), ...
    h_profile(i:i+1), ...
    'FaceColor', col, ...
    'EdgeColor', col);

end

for k = 1:length(d_cambios)
xline(app.UIAxes2, d_cambios(k), 'k', 'LineWidth', 1);
end

app.UIAxes2.XScale = 'log';
if d_query > 10
    app.UIAxes2.XLim = [10 d_query];
else
    app.UIAxes2.XLim = [10 11];
end
if max(h_profile) == 0
    app.UIAxes2.YLim = [0 1];
else
    app.UIAxes2.YLim = [0 max(h_profile)*1.1];
end

xlabel(app.UIAxes2,'Distancia (km)')
ylabel(app.UIAxes2,'Altura (m)')
grid(app.UIAxes2,'on')

app.UIAxes2.Box = 'off';
app.UIAxes.Box = 'on';

hold(app.UIAxes2,'off')

app.ValordelcampoTextArea.Value = ...
['Millington: ', num2str(E_query,'%0.2f'),' dBμV/m', newline, ...
'Real: ', num2str(E_real_query,'%0.2f'),' dBμV/m'];
app.DistanciadelenlaceTextArea.Value = ...
[num2str(d_query, '%0.2f'), ' km'];

filename = ['millington_', datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS'), '.mat'];

save(filename, ...
```

```
'd_plot', 'E_plot', 'E_real_plot', ...
'd_query', 'E_query', 'E_real_query', ...
'data', 'T', 'd_cambios', ...
'dist_total', 'h_profile', 'tipo_terreno');

disp(['Simulación guardada en ', filename])

catch ME
app.ValordelcampoTextArea.Value = ME.message;
end
    end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

    % Create UIFigure and hide until all components are created
    app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
    app.UIFigure.Position = [100 100 744 595];
    app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';

    % Create UIAxes
    app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
    title(app.UIAxes, 'Curvas de Millington')
    xlabel(app.UIAxes, 'X')
    ylabel(app.UIAxes, 'Y')
    zlabel(app.UIAxes, 'Z')
    app.UIAxes.Position = [53 168 637 230];

    % Create UIAxes2
    app.UIAxes2 = uiaxes(app.UIFigure);
    title(app.UIAxes2, 'Perfil del terreno')
    xlabel(app.UIAxes2, 'X')
    ylabel(app.UIAxes2, 'Y')
    zlabel(app.UIAxes2, 'Z')
    app.UIAxes2.Position = [53 7 637 151];

    % Create ParmetrosdeentradaPanel
    app.ParmetrosdeentradaPanel = uipanel(app.UIFigure);
    app.ParmetrosdeentradaPanel.TitlePosition = 'centertop';
    app.ParmetrosdeentradaPanel.Title = 'Parámetros de entrada';
    app.ParmetrosdeentradaPanel.Position = [20 421 379 160];

    % Create NombreachivokmlEditFieldLabel
    app.NombreachivokmlEditFieldLabel = uilabel(app.ParmetrosdeentradaPanel);
    app.NombreachivokmlEditFieldLabel.Position = [15 104 115 22];
    app.NombreachivokmlEditFieldLabel.Text = 'Nombre archivo .kml';

    % Create NombreachivokmlEditField
    app.NombreachivokmlEditField = uieditfield(app.ParmetrosdeentradaPanel, 'text');
```

```
app.NombreachivokmlEditField.HorizontalAlignment = 'center';
app.NombreachivokmlEditField.Position = [162 109 109 14];

% Create FrecuenciaMHzEditFieldLabel
app.FrecuenciaMHzEditFieldLabel = uilabel(app.ParmetrosdeentradaPanel);
app.FrecuenciaMHzEditFieldLabel.Position = [15 83 100 22];
app.FrecuenciaMHzEditFieldLabel.Text = 'Frecuencia (MHz)';

% Create FrecuenciaMHzEditField
app.FrecuenciaMHzEditField = uieditfield(app.ParmetrosdeentradaPanel, 'text');
app.FrecuenciaMHzEditField.HorizontalAlignment = 'center';
app.FrecuenciaMHzEditField.Position = [162 87 109 14];

% Create CalcularButton
app.CalcularButton = uibutton(app.ParmetrosdeentradaPanel, 'push');
app.CalcularButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @CalcularButtonPushed, true);
app.CalcularButton.Position = [292 74 77 27];
app.CalcularButton.Text = 'Calcular';

% Create PIREkWEditFieldLabel
app.PIREkWEditFieldLabel = uilabel(app.ParmetrosdeentradaPanel);
app.PIREkWEditFieldLabel.Position = [15 15 62 22];
app.PIREkWEditFieldLabel.Text = 'PIRE (kW)';

% Create PIREkWEditField
app.PIREkWEditField = uieditfield(app.ParmetrosdeentradaPanel, 'text');
app.PIREkWEditField.HorizontalAlignment = 'center';
app.PIREkWEditField.Position = [162 18 110 14];

% Create ValordelcampoTextAreaLabel
app.ValordelcampoTextAreaLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.ValordelcampoTextAreaLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.ValordelcampoTextAreaLabel.Position = [406 508 110 42];
app.ValordelcampoTextAreaLabel.Text = 'Valor del campo';

% Create ValordelcampoTextArea
app.ValordelcampoTextArea = uitextarea(app.UIFigure);
app.ValordelcampoTextArea.HorizontalAlignment = 'center';
app.ValordelcampoTextArea.Position = [526 512 163 33];

% Create AlturaantenatransmisoraEditFieldLabel
app.AlturaantenatransmisoraEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.AlturaantenatransmisoraEditFieldLabel.Position = [34 484 142 22];
app.AlturaantenatransmisoraEditFieldLabel.Text = 'Altura antena transmisora';

% Create AlturaantenatransmisoraEditField
app.AlturaantenatransmisoraEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.AlturaantenatransmisoraEditField.HorizontalAlignment = 'center';
app.AlturaantenatransmisoraEditField.Position = [181 487 110 14];

% Create AlturaantenareceptoraEditFieldLabel
app.AlturaantenareceptoraEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
```

```
app.AlturaantenareceptoraEditFieldLabel.Position = [34 462 130 22];
app.AlturaantenareceptoraEditFieldLabel.Text = 'Altura antena receptora';

% Create AlturaantenareceptoraEditField
app.AlturaantenareceptoraEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.AlturaantenareceptoraEditField.HorizontalAlignment = 'center';
app.AlturaantenareceptoraEditField.Position = [181 462 110 14];

% Create DistanciadelenlaceTextArea
app.DistanciadelenlaceTextArea = uitextarea(app.UIFigure);
app.DistanciadelenlaceTextArea.HorizontalAlignment = 'center';
app.DistanciadelenlaceTextArea.Position = [543 457 74 22];

% Create DistanciadelenlaceTextAreaLabel
app.DistanciadelenlaceTextAreaLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.DistanciadelenlaceTextAreaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DistanciadelenlaceTextAreaLabel.Position = [414 457 112 22];
app.DistanciadelenlaceTextAreaLabel.Text = 'Distancia del enlace';

% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = app

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.UIFigure)

if nargin == 0
    clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.UIFigure)
end
end
end
```



## ANEXO V: DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

En la elaboración de este trabajo se ha utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial generativa ChatGPT como apoyo para la generación de algunas ilustraciones empleadas en la memoria. Estas imágenes fueron creadas a partir de descripciones textuales (prompts) con el objetivo de crear las ilustraciones del oficial de la Armada que aparecen en la figura explicativa de la arquitectura del software. Esta herramienta también se empleó para generar la imagen de fondo utilizada en el resumen gráfico del trabajo.

En concreto, las imágenes generadas mediante IA corresponden a las siguientes figuras:

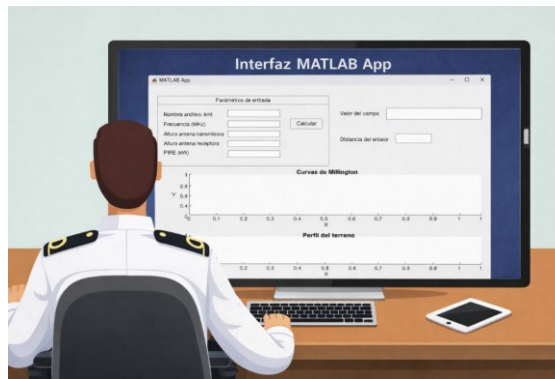


**Figura A4-1. Oficial de la Armada Interfaz Inicial (IA).**

Prompt utilizado para la generación de la Figura A4-1: “A partir de la imagen de la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB App Designer, genera una ilustración de un oficial de la Armada trabajando frente a un ordenador y utilizando dicha interfaz de simulación. La escena debe mostrar al oficial visto desde atrás mientras observa la pantalla del ordenador, donde aparece la interfaz del software de cálculo de propagación radioeléctrica”

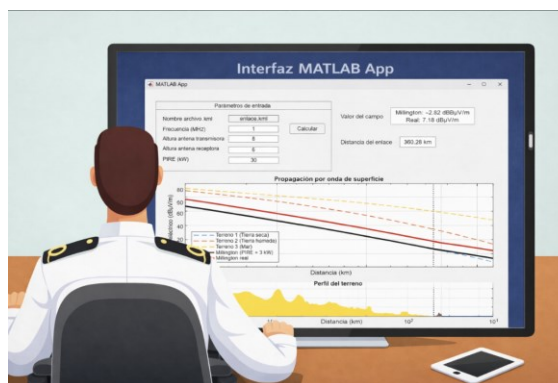


**Figura A4-2. Oficial de la Armada Interfaz Final (IA).**

Prompt utilizado para la generación de la Figura A4-2: “Utilizando como referencia la imagen anterior del oficial de la Armada trabajando frente a un ordenador y la captura de la interfaz del software desarrollada en MATLAB App Designer mostrando los resultados de la simulación, generar una ilustración en la que el oficial aparece observando dicha interfaz en pantalla”



**Figura A4-3.** Foto usada como fondo del resumen gráfico (IA).

Prompt utilizado para la generación de la Figura A4-4: *“Ilustración conceptual de sistemas de comunicaciones radioeléctricas en el entorno de la Península Ibérica vista desde el espacio. Representar dos estaciones terrestres con antenas, una situada en la zona de Madrid y otra en la zona de Alicante, emitiendo ondas de radio. Incluir una fragata y un submarino en el océano Atlántico comunicándose mediante señales radioeléctricas, colocando una bandera de España en la fragata. Añadir también satélites en órbita transmitiendo señales. Los elementos deben aparecer con estilo de dibujo”*

Además, durante la elaboración de este trabajo se ha utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial generativa ChatGPT como apoyo puntual para la revisión y mejora de la redacción de algunos fragmentos de la memoria, así como para realizar pequeñas correcciones en el código desarrollado en MATLAB. En todos los casos, estas herramientas se emplearon únicamente como apoyo, siendo el contenido técnico, el desarrollo del software y los resultados obtenidos responsabilidad del autor del trabajo.