	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR:

NOMBRE(S): ROGER ALEXANDER

APELLIDOS: BADILLO ROCA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): DINAEL

APELLIDOS: GUEVARA IBARRA

NOMBRE(S): DIEGO ANDRÉS

APELLIDOS: PARADA ROZO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO EN CASOS CANÓNICOS DE RADIO PROPGACIÓN: INCLUSIÓN DE CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE LOS TERRENOS

RESUMEN

El trabajo de investigación consiste en la aplicación del Modelo de Dos Rayos Modificado aplicado a casos canónicos de radio propagación. Se incluyó al método la consideración de las características electromagnéticas del terreno (conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética). El modelo considera la ruta de propagación directa y la reflejada por el plano de tierra, la refracción causada debido a una atmosfera estándar y difracción debido a una cuña con pérdidas. Para el caso de difracción el modelo se complementa con UTD para predecir la magnitud, dirección y fase del campo eléctrico. La inclusión de estas características en el cálculo de las componentes de campo influye directamente en el rendimiento del modelo. Para establecer la precisión del método se comparó gráfica y estadísticamente las curvas de pérdida por camino de ambos métodos.

PALABRAS CLAVE: MODELO DE DOS RAYO MODIFICADO, CASOS CANÓNICOS DE RADIO PROPGACIÓN, UTD, DMFT-SSPE, CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

CARACTERISTICAS:

PÁGINAS: 76 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 31 CD ROOM: 1

MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO EN CASOS CANÓNICOS DE RADIO
PROPAGACIÓN: INCLUSIÓN DE CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE
LOS TERRENOS

ROGER ALEXANDER BADILLO ROCA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CÚCUTA

2020

MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO EN CASOS CANÓNICOS DE RADIO
PROPAGACIÓN: INCLUSIÓN DE CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE
LOS TERRENOS

Presentado por:

ROGER ALEXANDER BADILLO ROCA

Director:

PhD. DINAEL GUEVARA IBARRA

Codirector:

Mag. DIEGO ANDRES PARADA ROZO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CÚCUTA

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 8 DE MAYO DE 2020
Hora: 18:00
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Título de la Tesis: "MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO EN CASOS CANÓNICOS DE RADIO PROPAGACIÓN: INCLUSIÓN DE CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE LOS TERRENOS"
Jurados: IE, MSc GEINER GIOVANNY BARBOSA CASANOVA
IE, MSc MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ
Director: IE, PhD DINAEL GUEVARA IBARRA
Codirector: IE, MSc DIEGO ANDRÉS PARADA ROZO

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
ROGER ALEXANDER BADILLO ROCA	1161130	CINCO, CERO (5,0)

LAUREADA



GEINER GIOVANNY BARBOSA CASANOVA



MARCO AURELIO GARCIA BERMÚDEZ



DINAEL GUEVARA IBARRA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Electrónica

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

Señores
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS
Ciudad

Cordial saludo:

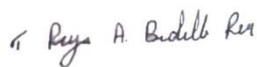
Roger Alexander Badillo Roca, identificado con la C.C. N° 1.090.501.391, autor del trabajo de grado titulado Modelo de Dos Rayos Modificado en casos canónicos de radio propagación: Inclusión de caracterización electromagnética de los terrenos presentado y aprobado en el año 202 como

requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico; autorizo a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que **"los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores"**, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

FIRMA Y CEDULA



C.C. 1.090.501.391.

Agradecimientos

Agradezco a mi director el PhD. Dinael Guevara Ibarra, quién fue un apoyo fundamental y guía principal en el camino de investigación.

A mi codirector el Mag. Diego Andrés Parada Rozo, por sus grandes aportes, constante ayuda e importantes consejos que me ayudaron en la realización de este trabajo.

A mi compañera de vida Leidy Julieth Acevedo Jaimes, quién con su amor y apoyo incondicional me ayudó a ser mejor persona.

A Diego Soto, quién con su humildad me dio la mano cuando nadie más lo hizo.

A mi familia, que me dio los medios necesarios para alcanzar mis metas y principalmente por estar conmigo en los buenos y malos momentos de mi vida.

A mis amigos, docentes y el personal administrativo de la Universidad Francisco de Paula Santander por su apoyo en el camino académico.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Descripción del problema	15
1.1. Planteamiento del Problema	15
1.2. Justificación	17
1.2.1. Tipo de proyecto	18
1.2.2. Impacto Esperado	18
1.2.3. Beneficios tecnológicos	19
1.2.4. Beneficios Institucionales	19
1.2.5. Beneficios Académicos	20
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo General	20
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. Limitaciones y Delimitaciones	21
1.4.1. Limitaciones	21
1.4.2. Delimitaciones	22
2. Marco Referencial	23
2.1. Antecedentes	23
2.2. Marco teórico	24
2.2.1. Concepto y clasificación de los modelos de propagación	24
2.2.2. Modelos basados en técnicas de trazado de rayos	25
2.2.3. Índice de refracción	25

2.2.4. Rayos reflejados	26
2.2.5. Tipos de polarización	27
2.2.5.1. Polarización paralela	27
2.2.5.2. Polarización perpendicular	28
2.2.6. Modelo de Dos Rayos	29
2.2.7. Refractividad atmosférica	32
2.2.8. Características electromagnéticas de los materiales	33
2.2.9. Difracción	35
2.2.9.1. Teoría uniforme de la difracción (UTD)	35
3. Diseño Metodológico	37
3.1. Metodología Propuesta	37
3.1.1. Revisión bibliográfica	37
3.1.2. Obtención de los modelos matemáticos	37
3.1.3. Establecer los casos y parámetros de simulación	38
3.1.4. Implementación de los modelos	38
3.1.5. Comparación de los resultados	38
3.1.6. Divulgar los resultados	38
4. Resultados	39
4.1. Revisión de las referencias bibliográficas	39
4.2. Características del terreno, parámetros de simulación y tipo de transmisor	40
4.3. Desarrollo de los modelos matemáticos	45
4.3.1. Rayo directo	45
4.3.2. Rayo reflejado por plano paralelo a tierra	48
4.3.3. Cálculo de la longitud óptica del rayo	50

4.3.4. Formulación de UTD	51
4.4. Diseño e implementación de los algoritmos	53
4.4.1. Rayos directos	53
4.4.2. Trazado de los rayos incidentes y reflejados en el suelo	55
4.4.3. Rayo directo a la cuña	56
4.4.4. Difracción por cuña	58
4.4.5. Trazado de rayos	59
4.4.6. Pérdidas de camino	61
4.5. Verificación de los resultados	63
4.5.1. Perfil horizontal	64
4.5.2. Perfil vertical	65
4.5.3. Verificación estadística.	67
4.6. Divulgación de los resultados	69
5. Conclusiones	71
6. Referencias	73
Anexos	76

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Incidencia sobre una superficie. Imagen adaptada de (Eanennam, 2008).	27
Figura 2. Polarización paralela. Imagen adaptada de (Sadiku, 2003).	28
Figura 3. Polarización perpendicular. Imagen adaptada de (Sadiku, 2003).	29
Figura 4. Ilustración del modelo de Dos-Rayos. Imagen adaptada de (Silva, 2004).	30
Figura 5. Ilustración de las distancias referidas en la ecuación 5.07.	31
Figura 6. Efectos de refractividos debido a diferentes gradientes. Imagen tomada de (Pavel & Pavel, Tropospheric refraction modeling using ray-tracing and parabolic equation, 2005).	32
Figura 7. Ejemplo de difracción. Imagen propia.	36
Figura 8. Terreno de simulación. Imagen propia.	41
Figura 9. Casos canónicos de simulación. Imagen propia.	42
Figura 10. Perfil horizontal de simulación. Imagen propia.	42
Figura 11. Perfil vertical de simulación. Imagen propia.	43
Figura 12. Patrón de Radiación. Imagen propia.	43
Figura 13. Magnitud de campo eléctrico en theta. Imagen propia.	44
Figura 14. Magnitud de campo eléctrico en dirección z. Imagen propia.	45
Figura 15. Modelo de Dos-Rayos, rayo directo. Imagen adaptada de (Parada, y otros, 2019).	46
Figura 16. Rayo incidente y rayo reflejado. Imagen adaptada de [19].	49

Figura 17. Tramo del trazado de un rayo. Imagen propia.	51
Figura 18. Geometría y variables de difracción por cuña. Imagen adaptada de (Tami, y otros, 2008).	52
Figura 19. Trazado de rayos directos en tierra plana e inclinada. Imagen propia.	54
Figura 20. Trazado de rayos directos. Imagen propia.	55
Figura 21. Trazado de los rayos incidentes y reflejados por la superficie. Imagen propia.	56
Figura 22. Diagrama de flujo para encontrar el punto de difracción. Imagen propia.	57
Figura 23. Trayectoria del rayo incidente en la cuña. Imagen propia.	58
Figura 24. Difracción por cuña. Imagen propia.	59
Figura 25. Conformación de los rayos para calcular un perfil horizontal de campo. Imagen propia.	60
Figura 26. Conformación de los rayos para calcular un perfil horizontal de campo. Imagen propia.	61
Figura 27. Curvas de pérdidas por camino para un perfil horizontal de 40 km. Imagen propia.	62
Figura 28. Pérdidas de camino para un perfil vertical. Imagen propia.	63
Figura 29. Pérdidas en campo eléctrico para una cuña de (a) 100 m y 60 m. Imagen propia.	64
Figura 30. Pérdida por trayectoria en intensidad de campo para una cuña de 60 m. Imagen propia.	66
Figura 31. Pérdida por trayectoria en intensidad de campo para una cuña de 100 m. Imagen propia.	67

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de simulación. Elaboración propia.	40
Tabla 2. Medidas del terreno. Elaboración propia.	41
Tabla 3. Verificación en Perfil horizontal Para una cuña de 60 m. Elaboración propia.	68
Tabla 4. Verificación en Perfil horizontal Para una cuña de 100 m. Elaboración propia.	68
Tabla 5. Verificación en Perfil vertical Para una cuña de 60 m. Elaboración propia.	69
Tabla 6. Verificación en Perfil vertical Para una cuña de 100 m. Elaboración propia.	69

Introducción

Para el despliegue de redes de comunicación, es necesario realizar análisis del comportamiento o distribución del campo eléctrico en la zona dónde se instalará la antena transmisora. El estudio se puede realizar por medio de campañas de medidas en lugares estratégicos del entorno o también se pueden utilizar herramientas computacionales, basadas en algoritmos numéricos, que permiten simular y posteriormente predecir la cobertura radioeléctrica en un determinado ambiente.

Algunos algoritmos numéricos, tales como, FDTD (Diferencias finitas en el dominio del tiempo), FEM (Métodos de elementos finitos) y MoM (Método de Momentos) requieren alto costo computacional. Es por esto que los modelos basados en soluciones analíticas despiertan el interés de los investigadores, ya que arrojan resultados en tiempo récord a bajo costo.

La aplicación de técnicas y algoritmos fundamentados en Trazados de rayos, ha demostrado su papel e importancia en el análisis de la propagación troposférica. El trazado se realiza, lanzando rayos en varios ángulos, dirigidos a las posiciones de los puntos receptores específicos.

En este documento se presenta la verificación matemática y la aplicación de un Modelo de Dos Rayos Modificado, basado en GO (Óptica Geométrica) y los principios de UTD (Teoría Uniforme de la Difracción).

Para la verificación del modelo se tomó en cuenta un escenario disipativo, lineal e isotrópico, una atmósfera estándar con un gradiente de refractividad constante en casos canónicos de radio propagación.

La elaboración de un modelo de propagación más minucioso, que tome en cuenta más características del entorno de estudio, establece como consecuencia un método más preciso, para ser aplicado a entornos reales.

Los resultados de la implementación del modelo en el escenario planteado, fueron comparados con el algoritmo SSPE (Split Step Parabolic Equation) que ha sido verificado anteriormente con otras técnicas, este método utiliza un abordaje numérico con discretización del dominio computacional y es usado como referencia para verificar la precisión y aplicabilidad del modelo propuesto.

1. Descripción del problema

En este capítulo se define el planteamiento del problema, la justificación, los alcances, objetivos, limitaciones y delimitaciones, marco referencial, marco teórico que se establecieron para llevar a cabo esta investigación.

1.1. Planteamiento del Problema

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos, usados para representar las características de radio de un ambiente dado (Torrecillas, 2008, pág. 12)

La mejora de los sistemas de comunicación causada por el aumento de la demanda y la evolución de la tecnología actual, implica la necesidad de desarrollar modelos de cobertura con un menor costo computacional y resultados rápidos (Mendes, Rego, Parada, Batista, & Guevara, 2019, pág. 1)

Los modelos basados en soluciones numéricas son muy aproximados para regiones urbanas donde la información topográfica y morfológica es detallada; sin embargo, consumen demasiados recursos de computación y tiempo de ejecución (Bernal, Díaz, Paéz, & Bustamante, 2008, pág. 2)

Para la implementación de métodos enfocados en el análisis de radio propagación de ondas de radio, se puede utilizar modelos de soluciones analíticas o modelos basados en métodos numéricos. En este trabajo de investigación se planteó la verificación del Modelo de Dos Rayos Modificado que ofrece una alternativa a los modelos basados en soluciones

numéricas. Se fundamenta en la óptica Geométrica (GO) y se complementa con la teoría uniforme de la difracción UTD, utilizada para incluir las difracciones causadas por las discontinuidades de los bordes de los obstáculos. El modelo considera tanto la ruta directa como la ruta de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor (Rappaport, 1996, pág. 85). El método original no consideraba características reales que se pueden presentar en los diferentes entornos más complejos ya que toma como consideración que los rayos viajan en línea recta, asemejándose a un rayo óptico. La propuesta de la investigación ofrece un enfoque diferente para el abordaje clásico del modelo, específicamente para rayos curvados por efectos de refractividad atmosférica que no considera el modelo original. Otro factor importante que influye en la precisión del modelo es la cuenta incompleta de todos los tipos de rayos (reflejados, difractados y refractados). Cuantos más rayos se tengan en cuenta y características particulares del terreno se consideren, más tiempo de cómputo se necesita (Izkander & Yun, 2002, pág. 4) . Por lo cual elegir un diferencial adecuado influye directamente en la precisión del modelo.

Con la inclusión de efectos y fenómenos físicos, como los expuestos anteriormente, en el modelo de radio propagación, se podrá llegar a una solución más aproximada.

Con base en lo descrito anteriormente se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Se puede validar el modelo de Dos Rayos Modificado aplicado a un escenario que presente efectos refractivos de la atmósfera estándar, con obstáculos y superficies con pérdidas?

1.2. Justificación

La evaluación precisa de las características de propagación de ondas de radio en un entorno complejo se ha convertido en un tema de investigación en el campo de la tecnología de comunicaciones móviles. En la interacción con un perfil de terreno irregular, la onda propagante es afectada por múltiples reflexiones, difracciones y posiblemente otros fenómenos, por lo que considerar condiciones realísticas de los terrenos es el factor indispensable para obtener la precisión suficiente de las características de propagación de la onda (Bai, Liao, Sheng, & Zhang, 2013, pág. 4).

Los modelos de propagación de ondas de radio, tienen un factor clave en la planificación, análisis y optimización de las redes inalámbricas. Las comunicaciones móviles continúan creciendo, requiriendo una capacidad cada vez mayor para determinar la ubicación y la potencia óptimas de la estación base, proporcionándoles tasas de datos adecuadas y estimando su cobertura, sin realizar una serie de mediciones sobre el terreno, ya que son muy costosas y toman mucho tiempo. Por lo tanto, es importante desarrollar modelos de propagación efectivos para comunicaciones móviles, a favor de proporcionar pautas de diseño para sistemas móviles (Eanennam, 2008, pág. 3)

La refractividad atmosférica, provoca el desvanecimiento de múltiples rutas y efectos de interferencia, que afecta considerablemente el rendimiento en la predicción de los sistemas de comunicación (Pavel & Pavel, 2006, pág. 3).

El modelo de Dos Rayos Modificado toma en cuenta los efectos refractivos causados por una atmosfera estándar y otros factores característicos de un escenario complejo, que no son considerados en el modelo original. Se incluyó condiciones, que acerquen el entorno de investigación a la realidad, como las diferentes conductividades de las superficies que

configuran el medio, e irregularidades donde se pueda presentar reflexión y difracción en el camino de propagación de la onda de radio.

1.2.1. Tipo de proyecto

El tipo de proyecto realizado es una investigación científica. Tiene como objetivo principal, comparar y evaluar la aplicabilidad de un modelo de dos rayos modificado, que actúa conjuntamente con UTD. La precisión del modelo es verificada a través de la comparación entre los resultados obtenidos de la técnica propuesta y el algoritmo DMFT-SSPE.

1.2.2. Impacto Esperado

Por medio de la aplicación del método de Dos Rayos Modificado, obtener una herramienta de simulación, para el problema de propagación electromagnética, que permita cumplir con los objetivos planteados, para dar solución al problema de investigación.

El algoritmo SSPE se utilizará para verificar el modelo, estableciendo las ventajas de la implementación de un modelo analítico contra con una método basado en soluciones numéricas, se espera obtener resultados, que determinen la precisión en la predicción de cobertura radioeléctrica en escenarios caracterizados con la mayoría de los detalles realísticos de los ambientes, que permita predecir la propagación de campo eléctrico, esto, aporta al desarrollo tecnológico, específicamente en el área de las telecomunicaciones para el estudio de la propagación de ondas de radio.

1.2.3. Beneficios tecnológicos

- Estudiar la propagación de ondas de radio, usando métodos clásicos como alternativa a los algoritmos numéricos contribuye al desarrollo de modelos con un menor costo computacional y resultados rápidos.
- El desarrollo de modelos de propagación de ondas de radio rápidos y robustos son un factor clave en la planificación, análisis y optimización de las redes inalámbricas.
- Utilizar Matlab como herramienta de simulación para la implementación y comparación del modelo de Dos Rayos Modificado, genera beneficios tecnológicos al desarrollar herramientas de radio propagación utilizando este lenguaje de programación.

1.2.4. Beneficios Institucionales

- El desarrollo de investigaciones de los estudiantes da reconocimiento a la institución y al programa académico, mejorando los índices de calidad y el deber institucional.
- El compromiso para el desarrollo de proyectos de investigación liderado por docentes como orientadores de los estudiantes, facilitando los recursos para la ejecución del proyecto demuestra el compromiso del programa de Ingeniería Electrónica con la educación de alta calidad.

1.2.5. Beneficios Académicos

- El desarrollo de trabajos de investigación, posibilita que los estudiantes desarrollen capacidades investigativas aplicando; habilidades específicas y conciencia social que ayuden al avance tecnológico de la región.
- La divulgación de la investigación en revistas técnicas, seminarios nacionales e internacionales, entre otros da a conocer las capacidades investigativas de los estudiantes del programa.

1.3. Objetivos

Para el desarrollo de este proyecto, los siguientes objetivos fueron establecidos:

1.3.1. Objetivo General

Verificar la aplicabilidad del modelo de Dos Rayos Modificado en escenarios que consideran la caracterización electromagnética de los terrenos y los efectos refractivos de una atmósfera estándar.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los modelos de propagación basados en óptica geométrica.
- Obtener los modelos matemáticos de un método de Dos Rayos Modificado aplicado en una atmósfera estándar y en ambientes de propagación que incluyan diferentes perfiles de terrenos caracterizados electromagnéticamente.

- Establecer los casos canónicos para aplicar el modelo de dos rayos obtenido, y definir los parámetros de simulación.
- Implementar computacionalmente en Matlab los modelos y algoritmos obtenidos
- Comparar los resultados obtenidos de la implementación del modelo de dos rayos modificado con los resultados del algoritmo numérico DMFT-SSPE.
- Divulgar los resultados obtenidos del proyecto de investigación.

1.4. Limitaciones y Delimitaciones

El escenario que se planteó para evaluar el modelo de Dos Rayos Modificado con UTD contra el algoritmo DMFT-SSPE, tiene características que limitan y delimitan el proyecto de investigación, las cuales son descritas a continuación.

1.4.1. Limitaciones

La verificación del modelo de Dos Rayos, planteada sobre un escenario canónico se realizó por medio de diferentes simulaciones.

El entorno que se planteó para el trabajo investigativo, presenta diferentes parámetros electromagnéticos que caracterizan la superficie; consiste en un suelo conductor y una cuña que obstaculizó la propagación de la onda de radio.

Las simulaciones están restringidas por el uso de la licencia del software Matlab.

1.4.2. Delimitaciones

El desarrollo de este proyecto se realizó con los recursos disponibles en el grupo de investigación y desarrollo en electrónica y telecomunicación GIDET de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Los principales fundamentos matemáticos que delimitan conceptualmente el desarrollo del proyecto son: el modelo de Dos Rayos Modificado, reflexión y difracción de ondas de radio (UTD).

Esta investigación se llevó a cabo en un periodo de 6 meses, contados a partir de la fecha de aprobación.

2. Marco Referencial

Con fines de realizar el marco referencial se tomó antecedentes relacionados con modelos para la predicción de propagación de ondas electromagnéticas de radio basados en óptica geométrica.

2.1. Antecedentes

A continuación, se describe algunas investigaciones que se tomaron como base para el desarrollo del proyecto.

El artículo “Método SSPE que incluye un término retroactivo para un estudio de caso real de propagación EM” describe la mejora del algoritmo SSPE; adicionando el término hacía atrás, el cual, es causado por la reflexión de la onda con obstáculos, por lo tanto, parte de la onda se devuelve en el sentido contrario a la dirección de propagación. El modelo se verificó con mediciones y la técnica de Momentos a una frecuencia de 144 MHz. Este método será utilizado para la verificación del modelo de Dos-Rayos.

El artículo “Medidas de señales UHF y predicción usando modelos de propagación”, realizó un examen detallado sobre la intensidad de la señal en un área de La Universidad Estatal de Feira de Santana (UEFS), comparando algunos modelos de propagación, donde se evidenció una diferencia en los resultados. De las simulaciones de los modelos contra con las mediciones se concluyó que el modelo de Dos Rayos tiene un rendimiento similar a los valores medidos con respecto a otros modelos. El estudio se realizó sobre un terreno plano que no presentaba mayor complejidad, lo que deja como posterior investigación; evaluar el desempeño del modelo en un escenario que presente mayor irregularidad.

El artículo “Análisis vectorial del modelo de Dos Rayos” considera un modelo de Dos Rayos de banda UHF para dos antenas elevadas sobre una tierra plana, que consiste en un rayo que llega al receptor a lo largo de una línea recta y un rayo que llega al receptor después de una reflexión en el suelo. El modelo es analizado con y sin aproximaciones. Para el modelo analizado sin aproximaciones, se supone un dipolo ideal como una antena transmisora y se hace un análisis vectorial. Para el modelo analizado con aproximaciones, solo se realiza una suma algebraica. El modelo aproximado tiene mayor diferencia en la polarización paralela comparado con el modelo sin aproximaciones.

El artículo “Herramienta para la predicción de la radio propagación en una celda inalámbrica” desarrolló una herramienta de software basada en el modelo electromagnético de Dos Rayos junto con el modelo de difracción planteado por Vogler. Se verificó el uso del modelo con mediciones realizadas en un campo rural de la ciudad de Bogotá, Colombia, utilizando un analizador de espectro, un sistema de adquisición de datos, antenas y un automóvil, donde se obtuvo resultados aceptables y se determinó que la combinación de los dos modelos matemáticos mencionados anteriormente permite una excelente predicción de los niveles de potencia para ambientes urbanos.

2.2. Marco teórico

Para aplicar el modelo de Dos Rayos Modificado y su posterior evaluación, se establecieron las bases teóricas descritas a continuación.

2.2.1. Concepto y clasificación de los modelos de propagación

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de una onda de radio en un ambiente

dado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi - empíricos).

Mientras que los modelos empíricos o estadísticos se basan en mediciones, los modelos teóricos lo hacen en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio y a diferencia de los anteriores no se sustentan sobre amplias mediciones sino que se dispone de detalles del entorno con lo que se puede estimar la propagación de la señal (García & Rodríguez, 2002, pág. 5).

2.2.2. Modelos basados en técnicas de trazado de rayos

El trazado de rayos es una técnica basada en la óptica geométrica (GO) con la cual se puede obtener fácilmente una estimación de los niveles electromagnéticos a alta frecuencia en un determinado sistema. La óptica geométrica asume que la energía radiada es enviada por tubos infinitesimalmente pequeños considerados rayos. Estos se encuentran a lo largo de la dirección de propagación y viajan en línea recta siempre que el índice de refracción del medio en el que se encuentre sea constante, es decir, que se considere un medio homogéneo. Por lo tanto, la propagación de señales puede ser modelada por una serie de rayos que se propagan en línea recta (CampilloTorrecillas, 2008, pág. 23).

Los rayos son lanzados desde un transmisor y su interacción con el canal de propagación será descrita posteriormente usando las teorías acerca de la transmisión, reflexión y difracción.

2.2.3. Índice de refracción

El índice de refracción (n) o también llamado coeficiente de refracción está definido como el cociente de la velocidad de la luz (c) respecto a la velocidad de fase (v_p) en dicho medio.

En general, la rapidez de la onda en cualquier material es menor que en el vacío. Es conveniente definir el índice de refracción n de un medio como la relación (Serway & Jewett, 2008, pág. 986):

$$n = \frac{c}{v_p} \quad 5.01$$

2.2.4. Rayos reflejados

El cálculo de los rayos reflejados se basa en la ley de reflexión de Snell, teniendo en cuenta la aparición de un coeficiente de reflexión. Así pues, el ángulo reflejado es el mismo que el ángulo incidente en plano definido por el rayo incidente, la normal a la superficie sobre la que incide y el rayo reflejado. En la *Figura 1*. Incidencia sobre una superficie. Imagen adaptada de .

se describe el fenómeno (Torrecillas, 2008, pág. 46). La ley de Snell se define entonces como:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2) \quad (5.02)$$

Donde n_1 y n_2 corresponden a los coeficientes de refracción del primer y segundo medio, respectivamente.

Cuando una onda de radio que se propaga en un medio incide sobre otro medio que tiene diferentes propiedades eléctricas, la onda se refleja parcialmente (ver *Figura 1*. Incidencia sobre una superficie. Imagen adaptada de .

) y se transmite parcialmente. Si la onda incide en un dieléctrico perfecto. Parte de la energía se transmite al segundo medio y parte de la energía se refleja nuevamente en el primer medio, y no hay pérdida en la absorción. Si el segundo medio es un conductor

perfecto, entonces toda la energía incidente se refleja en el primer medio sin pérdida de energía. La intensidad del campo eléctrico de las ondas reflejada y transmitida puede estar relacionada con la onda incidente en el medio de origen a través del coeficiente de reflexión de Fresnel (Rappaport, 1996).

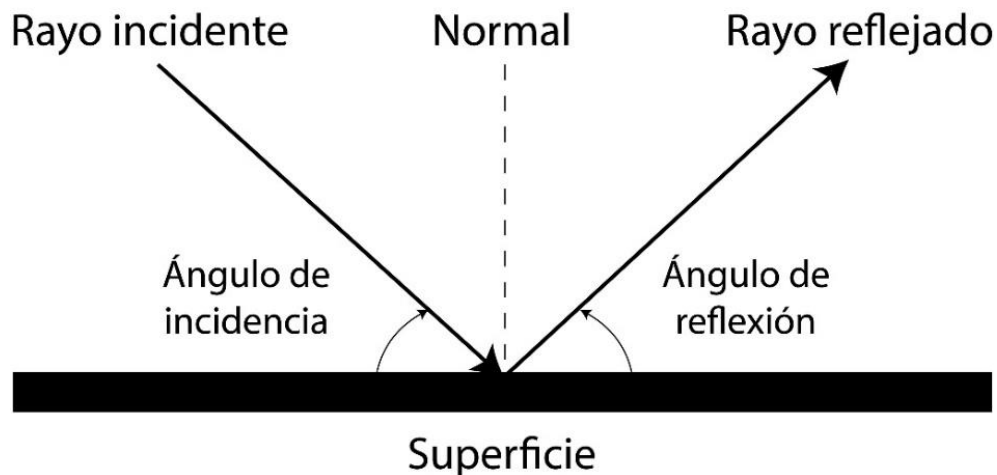


Figura 1. Incidencia sobre una superficie. Imagen adaptada de (Eanennam, 2008).

2.2.5. Tipos de polarización

Existen dos tipos de polarización, caracterizados según el plano en el que se encuentre el campo eléctrico, ya sea paralelo al plano de incidencia (incidencia normal) o perpendicular al mismo (incidencia normal) a continuación, se define las diferentes polarizaciones:

2.2.5.1. Polarización paralela

Para el caso de polarización paralela, se tiene que el plano que contiene en campo eléctrico es el mismo al plano de incidencia. La Figura 2. Polarización paralela. Imagen adaptada de muestra las componentes eléctrica y magnética de campo (Sadiku, 2003, pág. 453). El coeficiente de reflexión para este caso está determinado por la ecuación 5.03.

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_t - n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_i} \quad (5.03)$$

Donde n_1 y n_2 representan la impedancia intrínseca del medio 1 y 2 respectivamente, θ_i corresponde al ángulo incidente y θ_t representa el ángulo con el que el rayo es transmitido. Estos ángulos se calculan utilizando la ecuación de la ley de Snell.

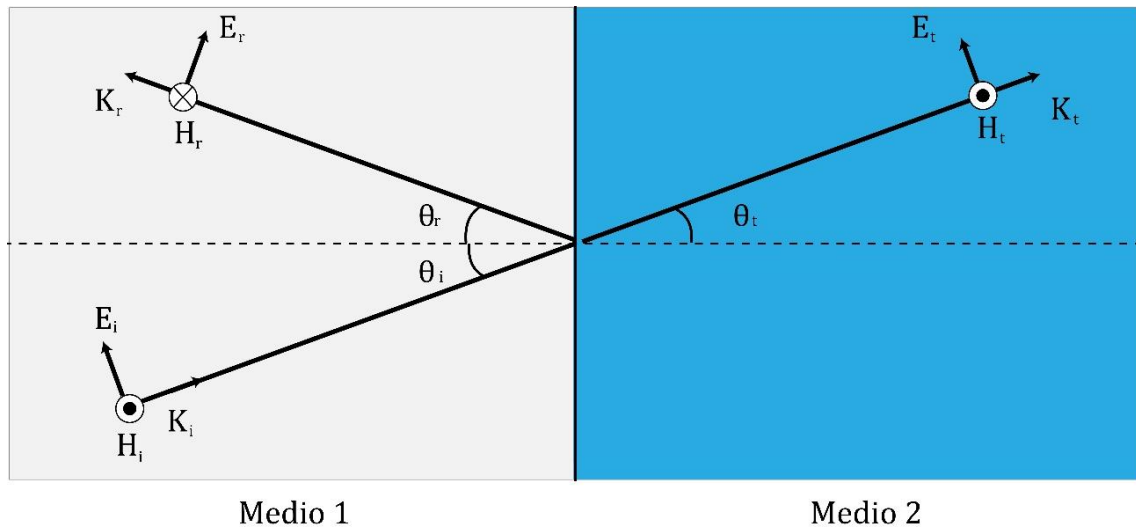


Figura 2. Polarización paralela. Imagen adaptada de (Sadiku, 2003).

2.2.5.2. Polarización perpendicular

En este caso la componente eléctrica de campo es perpendicular al plano de incidencia, el campo magnético es paralelo a la misma superficie (Sadiku, 2003, pág. 456), esta situación es ilustrada en la Figura 3. Polarización perpendicular. Imagen adaptada de. La ecuación 5.04 puede ser utilizada para calcular el coeficiente de reflexión.

$$\Gamma_{\perp} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (5.04)$$

Para calcular la intensidad de campo eléctrico que se refleja, se hace uso de la ecuación 5.05.

$$E_r = \Gamma E_i \quad (5.05)$$

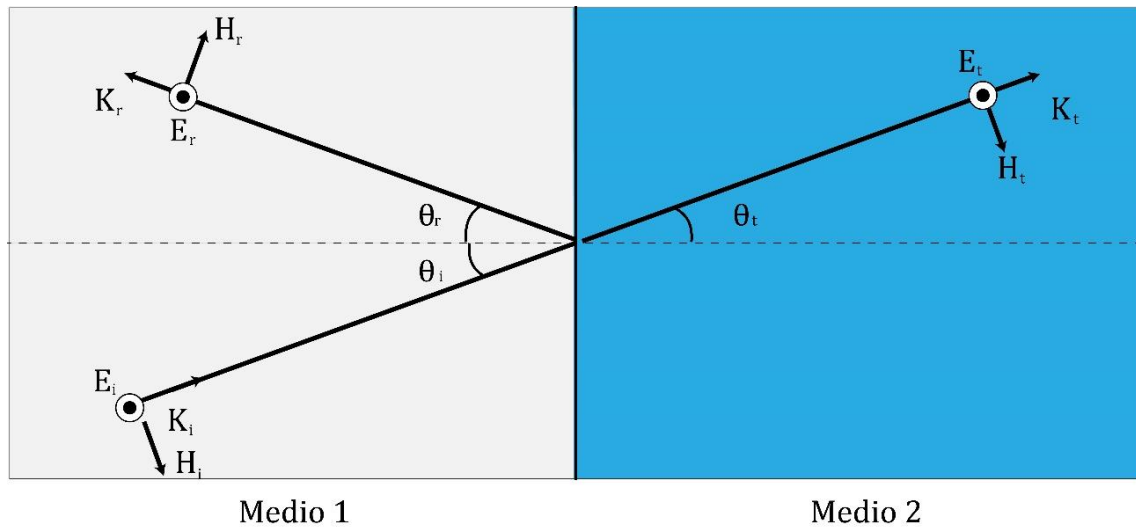


Figura 3. Polarización perpendicular. Imagen adaptada de (Sadiku, 2003).

2.2.6. Modelo de Dos Rayos

El modelo de reflexión de tierra de dos rayos que se representa en la Figura 4. Ilustración del modelo de Dos-Rayos. Imagen adaptada de es un modelo de propagación que se basa en la óptica geométrica y considera tanto la ruta directa como la ruta de propagación reflejada en el suelo entre el transmisor y el receptor. Se ha encontrado que este modelo es razonablemente preciso para predecir la intensidad de la señal a gran escala en distancias de varios kilómetros para sistemas de radio móviles que usan torres altas (alturas que excedan los 50 metros) (Rappaport, 1996, pág. 86).

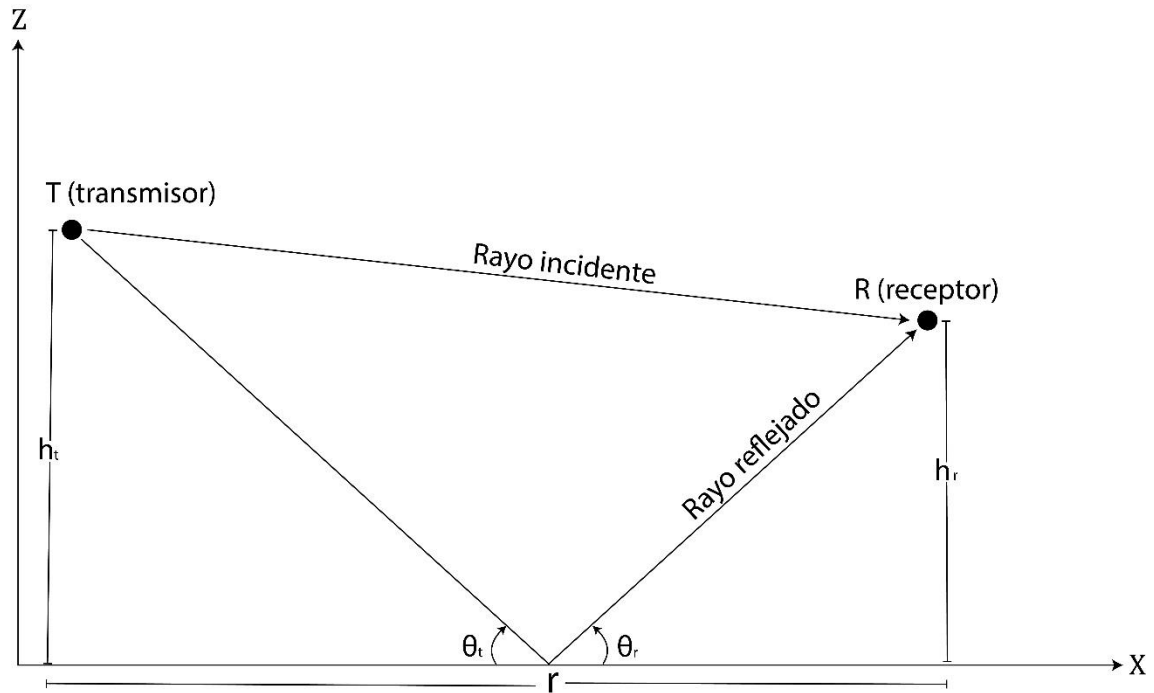


Figura 4. Ilustración del modelo de Dos-Rayos. Imagen adaptada de (Silva, 2004).

En la GO, la onda electromagnética está representada por rayos perpendiculares al frente de onda. Analizando la propagación de la onda (Silva, 2004, pág. 1), el campo eléctrico (E) que llega al punto definido por el rayo directo está determinado por la ecuación 5.06. Donde r' es la distancia comprendida entre la antena receptora y transmisora, h_T es la altura del transmisor, h_R representa la altura de la antena receptora y E_o es la magnitud de campo eléctrico en el punto transmisor.

$$E = E_o \frac{e^{-jkr'}}{r'} \quad (5.06)$$

La magnitud de la componente de campo eléctrico reflejado se puede calcular utilizando la ecuación 5.07. Donde Γ representa el coeficiente de reflexión en polarización paralela o perpendicular, según sea el caso y r'' es la distancia entre el transmisor y el receptor, tomando la ruta reflejada por el plano paralelo a tierra; como se ilustra en la Figura 5.

Ilustración de las distancias referidas en la ecuación 5.07..

$$E = \Gamma E_0 \frac{e^{-jkr''}}{r''} \quad (5.07)$$

La potencia de la señal que llega de un emisor a un receptor, separados por una distancia r esta dada por:

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{r^4} \quad (5.08)$$

Donde P_r es la potencia recibida, P_t la potencia transmitida, G_t ganancia de la antena transmisora, h_t altura del transmisor y h_r altura del receptor.

La potencia de señal recibida puede ser calculada mediante la ecuación:

$$P(\text{dB}) = 40 \log(d) - [(10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) + 20 \log(h_t) + 20 \log(h_r))] \quad (5.09)$$

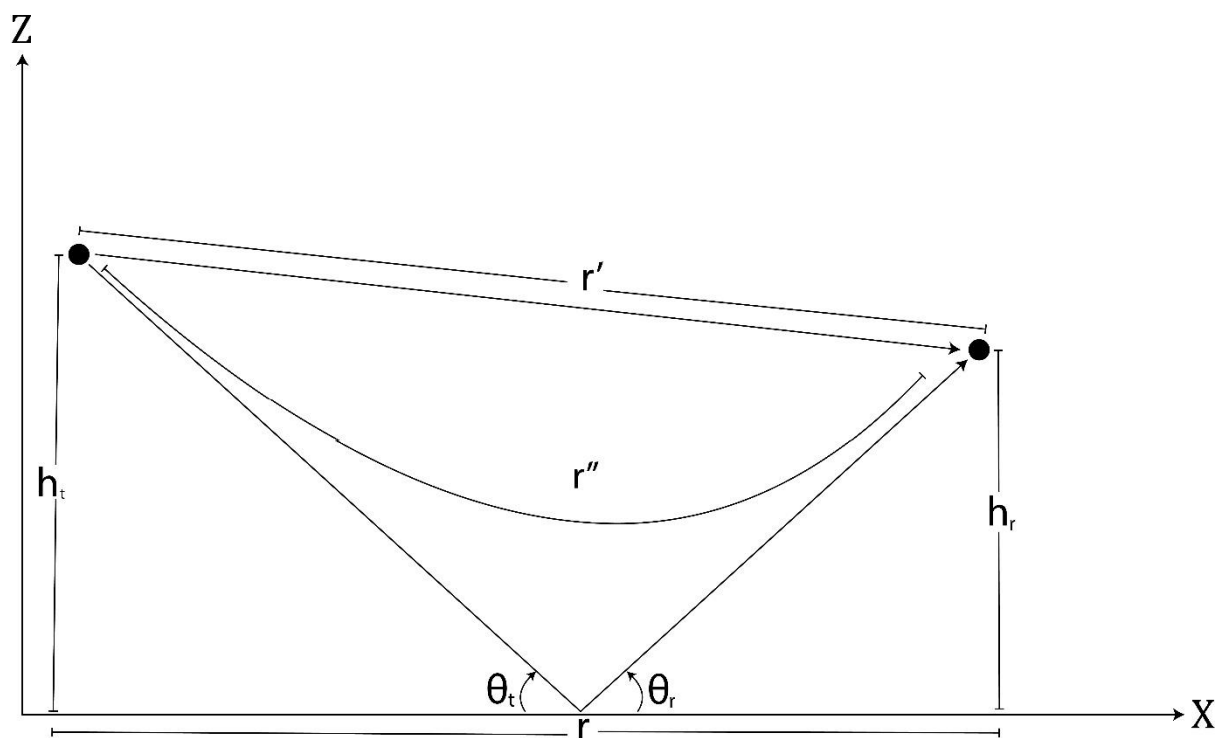


Figura 5. Ilustración de las distancias referidas en la ecuación 5.07.

2.2.7. Refractividad atmosférica

La óptica geométrica considera que los caminos de intensidad de campo eléctrico de las diferentes ondas de radio son rectos. La atmósfera altera la dirección de propagación de estos rayos, describiendo ahora una trayectoria no lineal. Desde el punto de vista de la propagación, la refracción se refiere a la propiedad que un medio tiene de curvar la trayectoria de una onda electromagnética que pasa por él. Una medida de la cantidad de refracción es el índice de refracción n , $n = c/v$ donde c es la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre y v la velocidad de la onda en el medio en cuestión (Costa Balvedi & Walter, 2005, pág. 3). El índice de refracción depende de la temperatura absoluta, presión atmosférica y presión parcial debida al vapor de agua (Pavel & Pavel, Tropospheric refraction modeling using ray-tracing and parabolic equation, 2005, pág. 1). La refracción se debe a la troposfera, a cambios en su densidad, temperatura, contenido de vapor de agua y conductividad relativa (Tomasi, 2003, pág. 445).

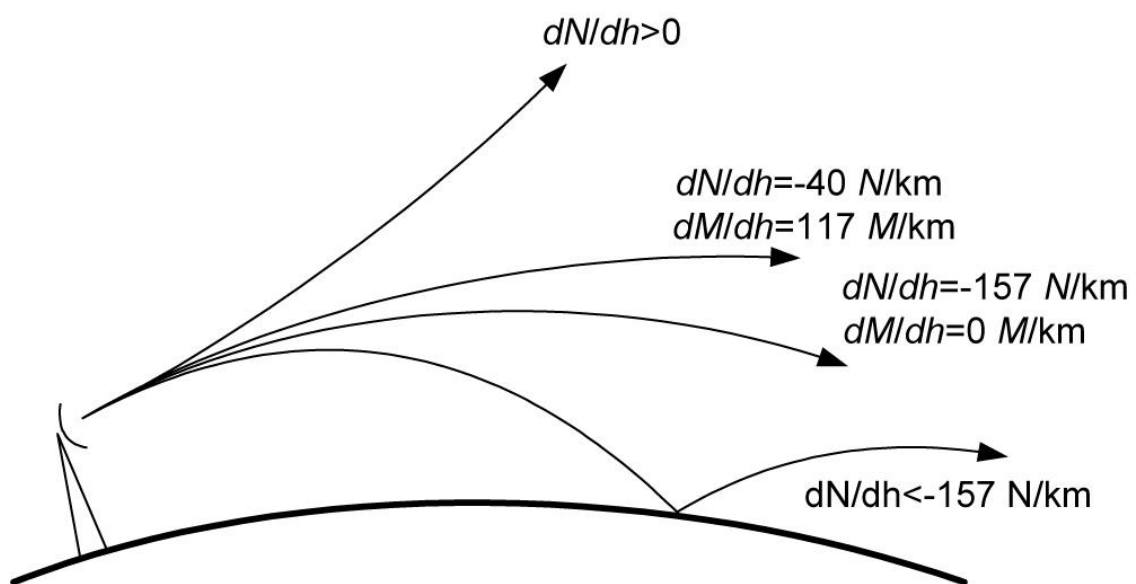


Figura 6. Efectos de refractividad debido a diferentes gradientes. Imagen tomada de (Pavel & Pavel, Tropospheric refraction modeling using ray-tracing and parabolic equation, 2005).

En la Figura 6. Efectos de refractividos debido a diferentes gradientes. Imagen tomada de . se ilustra el efecto de diferentes valores de refractividad, los gradientes de refracción positivos doblan los rayos hacia arriba, para gradientes de refractividad estándar (negativos) los rayos se doblan hacia abajo y para índices nulos ($dN/dh = 0$), seguirá la trayectoria de un rayo óptico, es decir, el trazo es descrito por una línea recta.

El índice de refracción atmosférico depende de la temperatura absoluta, presión atmosférica y presión parcial debida al vapor de agua (Pavel & Pavel, Tropospheric refraction modeling using ray-tracing and parabolic equation, 2005, pág. 2), estos factores varían en todo momento, para el caso de investigación, se propuso una atmosfera estándar. Las propiedades refractivas del aire pueden expresarse en términos del índice de refracción n o de la refractividad N , donde:

$$N = (n - 1) \times 10^{-6} \quad (5.10)$$

De la misma manera, se define el gradiente de refractividad M modificado (Pavel & Pavel, Analytic tropospheric ray-tracing model for constant refractivity gradient profiles, 2006, pág. 1), por medio de la ecuación 5.11, donde z representa la altura en kilómetros.

$$M = N + 157z \quad (5.11)$$

2.2.8. Características electromagnéticas de los materiales

En esta sección se describe los tipos de medios de propagación, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética.

2.2.8.1.1. Permitividad Eléctrica, permeabilidad magnética y conductividad

La aplicación de un campo eléctrico tiene el efecto de desplazar las cargas ligeramente, lo cual genera formación de conjuntos de dipolos eléctricos. La medida en que esto ocurre se mide por medio de la permitividad relativa o constante eléctrica, la constante de permitividad en el espacio libre tiene una magnitud medida en faradio por metro (F/m),

$$\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \text{ F/m} \quad (5.12)$$

De la misma manera que se define una característica de un material que sea susceptible a un campo eléctrico. La permeabilidad magnética se define como la capacidad que tiene un material de ser susceptible a un campo magnético (Hayt, 2001, pág. 276). Esta magnitud está definida por la relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético (B/H), el valor de la constante permeabilidad en el espacio libre μ_0 :

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ Tm/A} \quad (5.13)$$

La conductividad es una propiedad macroscópica de un medio material que define la capacidad del paso a la corriente eléctrica. Se caracteriza por un parámetro llamado conductividad (σ). Los materiales usualmente se clasifican en función del valor de conductividad en conductores, semiconductores o aislantes, según su valor.

2.2.8.1.2. Medios lineales, homogéneos e isotrópicos

Un medio homogéneo tiene propiedades idénticas en todos los puntos del espacio, es decir, sus características físicas (densidad de masa, estructura molecular, etc.) no varían de punto a punto. En este tipo de medio la permitividad y permeabilidad no dependen de las coordenadas. Otra variante de medio, es el lineal, tiene una relación con un campo electrostático si la densidad de flujo eléctrico es proporcional a la intensidad de campo eléctrico. Por último, para el medio isotrópico, se describe como aquel cuyas propiedades son

independientes de la dirección. Es decir, las propiedades de estos medio no dependen de la orientación o dirección escogida de los campos (Escobar Salguero & Cortés Soto, 2000, pág. 11).

2.2.9. Difracción

El fenómeno de difracción se produce cuando una onda incide sobre una discontinuidad del entorno como lo puede ser una arista de una esquina o uno de los lados de una ventana, etc. La arista actúa como un emisor de ondas secundario; según el principio de Huygens, de forma que radia parte de la energía de la onda incidente hacia zonas que inicialmente serían de sombra. A frecuencias altas la difracción depende de la geometría de la discontinuidad y de las características de la onda electromagnética que incide sobre ella (amplitud, fase y polarización) (CampilloTorrecillas, 2008, pág. 56).

2.2.9.1. Teoría uniforme de la difracción (UTD)

La teoría uniforme de la difracción o UTD, es una extensión de la GO para predecir el campo en regiones de sombra causada por un obstáculo o una cuña. Es la teoría de los rayos que se basa en el lanzamiento de millones de rayos ópticos donde cada rayo es único y se analiza individualmente; entonces su amplitud y dirección es impredecible debido a las múltiples reflexiones y difracciones. Por lo tanto, los métodos numéricos utilizados para estimar los campos electromagnéticos deben ser sólidos y precisos para todo tipo de condiciones. UTD es una solución asintótica utilizada en gran medida para predecir la propagación de dispersión en entornos urbanos. La difracción ocurre cuando un rayo encuentra una cuña, que genera múltiples rayos nuevos determinados por un cono de difracción de acuerdo con el principio de Huygens. La formulación de UTD es rigurosa porque los coeficientes de difracción y las definiciones angulares son bastante complejos y

tienen muchas excepciones, dependiendo de la geometría de la cuña y las posiciones del transmisor y el receptor (Tami, y otros, 2008, pág. 1).

La Figura 7. Ejemplo de difracción. Imagen propia. ilustra un ejemplo clásico de difracción, para este caso, el fenómeno es causado por la incidencia de un rayo en la discontinuidad del borde del edificio, como se puede observar, los rayos difractados salen en todas direcciones.

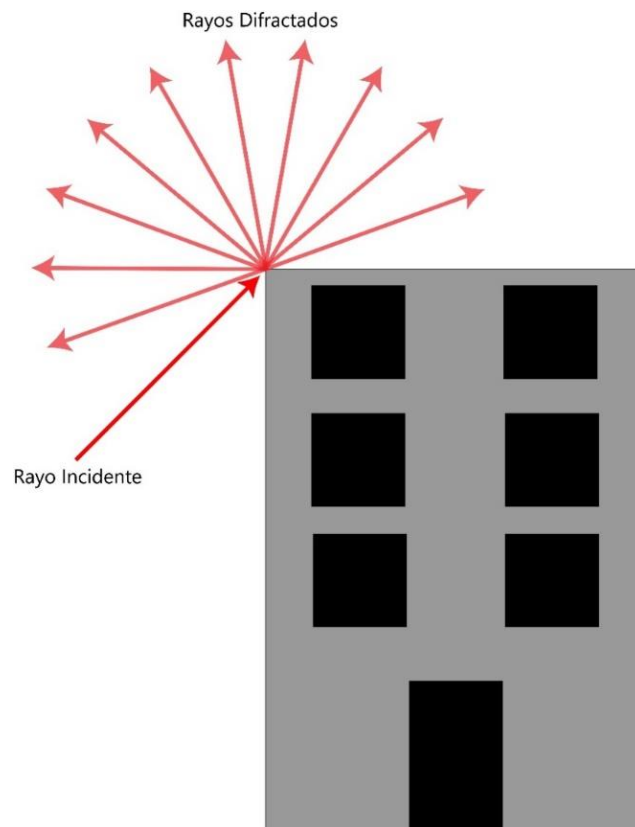


Figura 7. Ejemplo de difracción. Imagen propia.

3. Diseño Metodológico

A continuación, se describe la metodología que se utilizó para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, establecidos para el cumplimiento del trabajo de investigación propuesto.

3.1. Metodología Propuesta

Para el desarrollo del trabajo de investigación, se estableció la metodología descrita en los siguientes ítems.

3.1.1. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión de las referencias relacionadas con el desarrollo de los modelos de propagación de ondas de radio basados en óptica geométrica. Tomada de artículos de revista, tesis magistrales y libros. También se consultó información para establecer bases teóricas relacionadas con los fenómenos de reflexión y difracción de ondas de radio.

3.1.2. Obtención de los modelos matemáticos

Se obtuvo los modelos matemáticos de radio propagación, específicamente el del método de Dos Rayos aplicado en atmósfera estándar y en ambientes de propagación que incluyan perfiles de terrenos caracterizados electromagnéticamente. En el desarrollo de los modelos también se tuvo en cuenta que la onda de radio presenta reflexión y difracción, debido a las condiciones que se establecieron en la configuración del escenario de estudio para la verificación del modelo.

3.1.3. Establecer los casos y parámetros de simulación

Se estableció los casos canónicos que configuran el escenario en el que se verificó el modelo; de la misma manera, se definió los parámetros que se tomaron en cuenta para las diferentes simulaciones.

3.1.4. Implementación de los modelos

Se implementó en Matlab los algoritmos de los correspondientes modelos matemáticos bajo las condiciones que se establecieron como escenario de investigación para aplicar el método de Dos Rayos modificado.

3.1.5. Comparación de los resultados

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos matemáticos representados por los algoritmos desarrollados en Matlab, utilizando el algoritmo DMFT-SSPE como referencia para establecer la precisión del modelo.

3.1.6. Divulgar los resultados

Se dio a conocer a la comunidad universitaria los resultados obtenidos del cumplimiento de los objetivos mediante ponencias, posters y/o publicaciones en revistas.

4. Resultados

En esta sección se presenta y describe los resultados obtenidos de la verificación del modelo de Dos Rayos Modificado, complementado con UTD, utilizando como referencia el método DMFT-SSPE, aplicado en un escenario de investigación, que presenta diferentes casos canónicos de investigación.

4.1. Revisión de las referencias bibliográficas

En esta sección se describe los aportes de los principales autores en el desarrollo de los modelos matemáticos, relacionados con el problema de investigación.

El artículo “A vectorial analysis of the two-ray model” realizado por los autores Edgar Silva Junior y Gilberto Arantes Carrijo en el año 2004, presenta un abordaje del modelo de Dos Rayos. Describe una ecuación para calcular el ángulo de lanzamiento del haz y la intensidad de campo eléctrico que llega al punto receptor.

Del artículo “The radio propagation affected by variation of the refractive index” del autor Li Wei Liang Yitao Fu Maixia, publicado el año 2009, se tomó las ecuaciones, aproximaciones y constantes relacionadas con el efecto de la refractividad atmósfera sobre la trayectoria en el trazado de los rayos.

Los autores Pavel Valtr y Pavel Pechac en los artículos “Analytic tropospheric ray-tracing model for constant refractivity gradient profiles” y “Tropospheric refraction modeling using Ray-Tracing”, publicados en el año 2006 y 2005, respectivamente, describen una ecuación para calcular la longitud óptica de un rayo. Se obtuvo información complementaria sobre la incidencia de la refracción atmosférica en un modelo de radio propagación, específicamente el método ecuación parabólica PE, por sus siglas en inglés.

El artículo “Analysis of heuristic uniform theory of diffraction coefficients for electromagnetic scattering prediction” de los autores Diego Tami, Cássio G. Rego, Dinael Guevara y otros, realiza una formulación del modelo asintótico UTD, resalta la importancia de implementación en entornos complejos, donde se presenten obstáculos que puedan dispersar la propagación, esto genera múltiples rayos nuevos. El principal objetivo de esta teoría es determinar con alta precisión el ángulo y la magnitud de campo eléctrico de los rayos difractados.

4.2. Características del terreno, parámetros de simulación y tipo de transmisor

Las condiciones de simulación que se establecieron, incluyen una atmosfera estándar con un gradiente de refractividad uniforme G , magnitudes lineales y homogéneas; conductividad de la superficie del terreno σ , permitividad eléctrica relativa ϵ_r y permeabilidad magnética relativa μ_r , bajo una frecuencia de operación f_o , los valores de estas características son presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de simulación. Elaboración propia.

Parámetro	Valor
G	$\frac{2}{1 * 10^7} \frac{N}{km}$
σ	$0,012 \frac{S}{m}$
ϵ_r	15
μ_r	1
f_o	2 GHz

La Figura 8. Terreno de simulación. Imagen propia. ilustra el terreno en el que se aplicará el modelo, el cual consiste en una cuña y dos tramos de tierra plana.

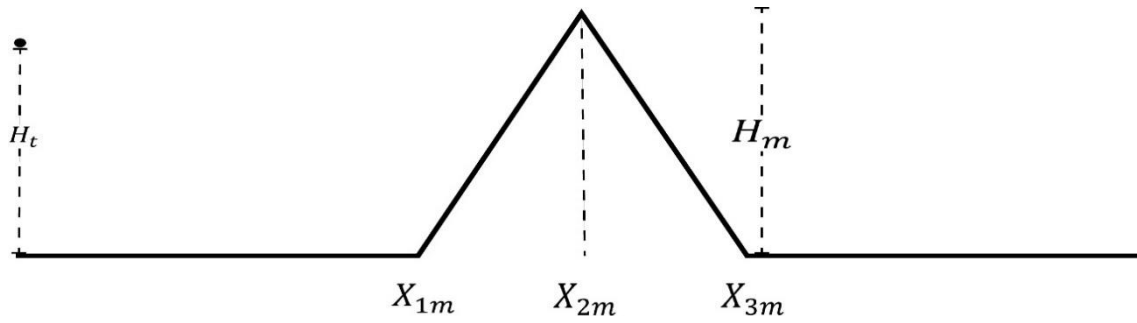


Figura 8. Terreno de simulación. Imagen propia.

Los valores de las medidas referidas en la *Figura 8*. Terreno de simulación. Imagen propia. son presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Medidas del terreno. Elaboración propia.

Descripción	Valor
Altura del transmisor (H_t)	80 m
Altura de la montaña (H_m)	100 m
Inicio pendiente positiva de la cuña (X_{1m})	18 000 m
Fin pendiente positiva (X_{2m})	20 000 m
Fin de la pendiente negativa (X_{3m})	22 000 m

En el caso canónico propuesto se presentan las siguientes situaciones:

- Tierra plana.
- Superficie recta inclinada.
- Regiones de sombra.
- Difracción causada por cuña.

En la *Figura 9*. Casos canónicos de simulación. Imagen propia. ilustra el caso de tierra plana (1), superficie inclinada (2) y región de sombra (3).

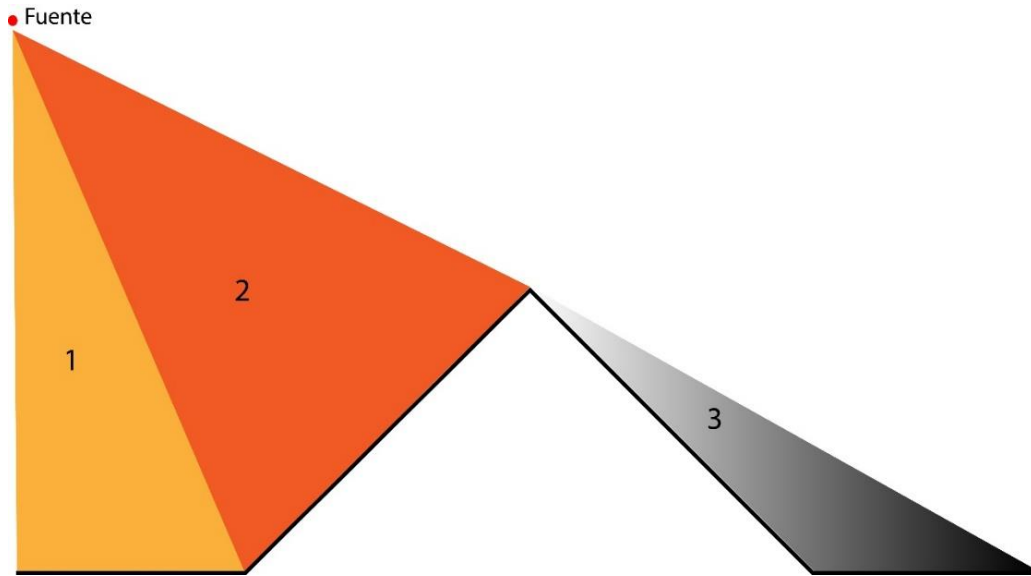


Figura 9. Casos canónicos de simulación. Imagen propia.

Para calcular un perfil horizontal de campo los puntos receptores se distribuyen de acuerdo a la Figura 10. Perfil horizontal de simulación. Imagen propia., se traza la trayectoria de los rayos a una altura constante a lo largo del terreno, con un paso Δ_x específico. De acuerdo con la trayectoria planteada, se calcula la intensidad de campo eléctrico en el punto receptor, tomando en consideración la distancia recorrida, obtenida de la longitud óptica del rayo.

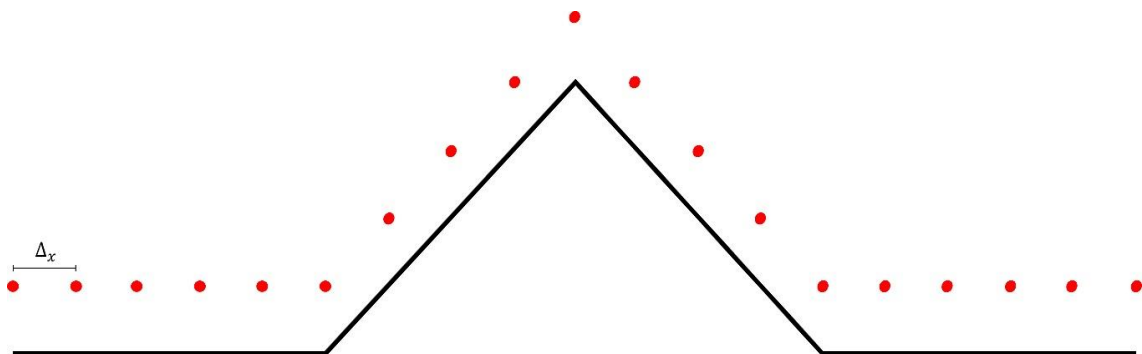


Figura 10. Perfil horizontal de simulación. Imagen propia.

Posteriormente, para el cálculo de un perfil vertical de campo, los puntos receptores se disponen de la manera ilustrada en la Figura 11. Perfil vertical de simulación. Imagen propia., se

realizan los trazos de los caminos de campo eléctrico a una distancia de receptor (X_R) constante, para diferentes alturas de receptor (h_r).

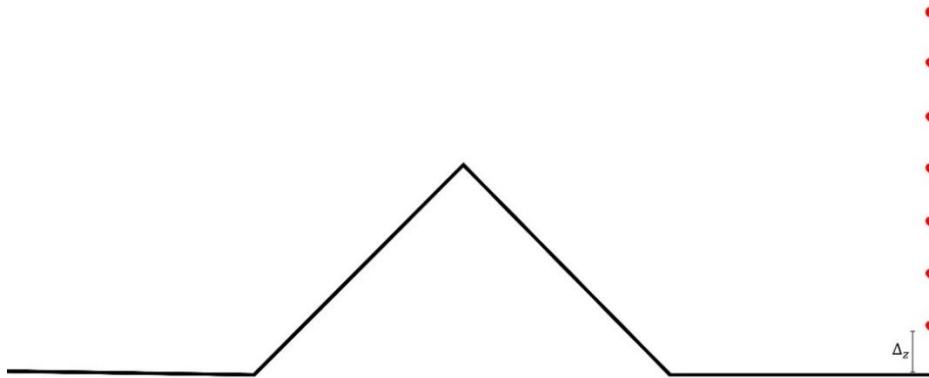


Figura 11. Perfil vertical de simulación. Imagen propia.

Para esta investigación se utilizó como transmisor, un dipolo infinitesimal altamente directivo, con un patrón de radiación mostrado en la Figura 12. Patrón de Radiación. Imagen propia.

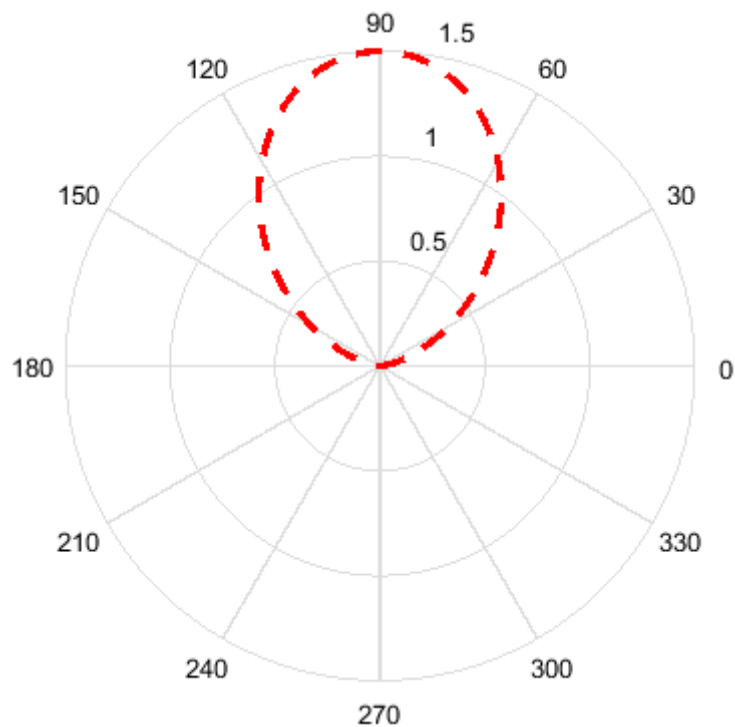


Figura 12. Patrón de Radiación. Imagen propia.

La magnitud de campo electrico en la dirección theta de propagación, se comporta de acuerdo a la Figura 13. Magnitud de campo eléctrico en theta. Imagen propia..

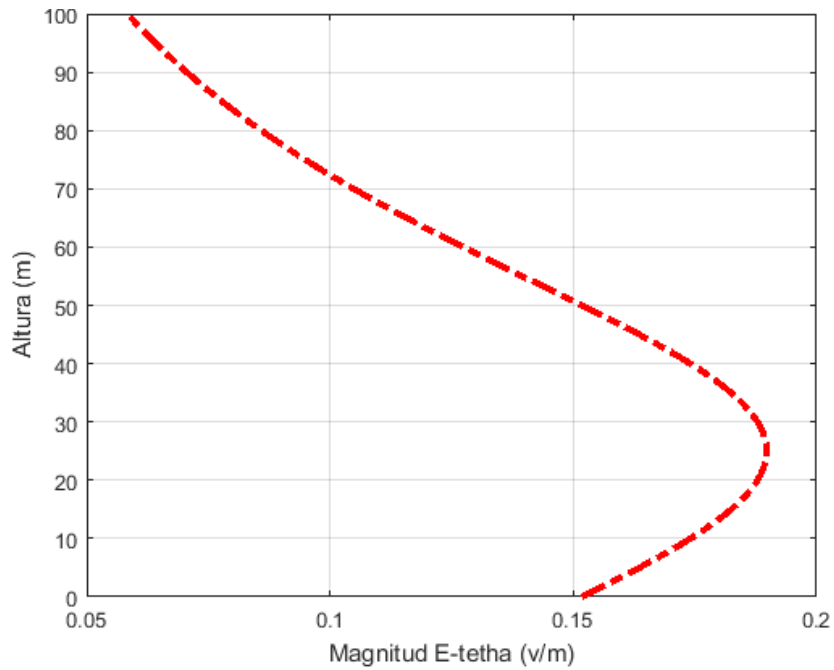


Figura 13. Magnitud de campo eléctrico en theta. Imagen propia.

En dirección z, la magnitud de campo eléctrico es descrita sinusiodalmente, como se muestra en la Figura 14. Magnitud de campo eléctrico en dirección z. Imagen propia..

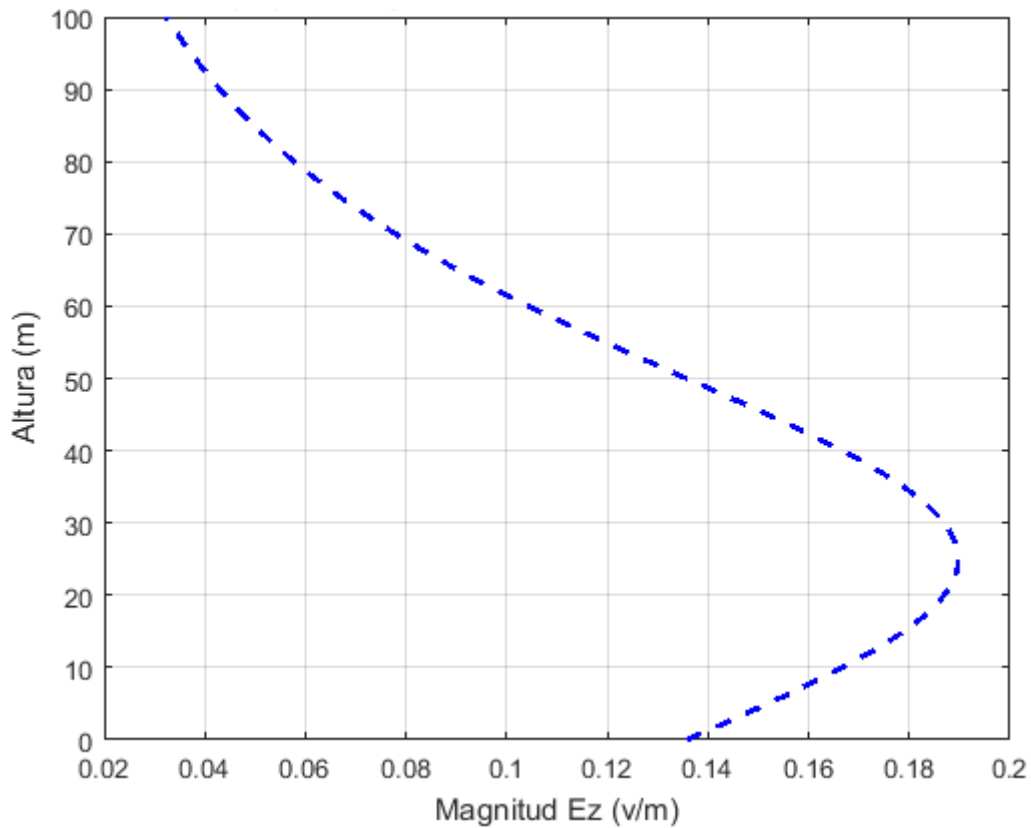


Figura 14. Magnitud de campo eléctrico en dirección z. Imagen propia.

4.3. Desarrollo de los modelos matemáticos

En esta sección se describe la verificación matemática del modelo de dos rayos, específicamente para el trazado del rayo directo y reflejado, en los diferentes casos ideales de radio propagación.

4.3.1. Rayo directo

Para el modelo de Dos-Rayos en el que se incluya efectos refractivos de la atmósfera, los rayos ya no son considerados como ópticos rectilíneos sino por el contrario, ahora describen una trayectoria curvada como se muestra en la Figura 15. Modelo de Dos-Rayos, rayo directo.

Imagen adaptada de ..

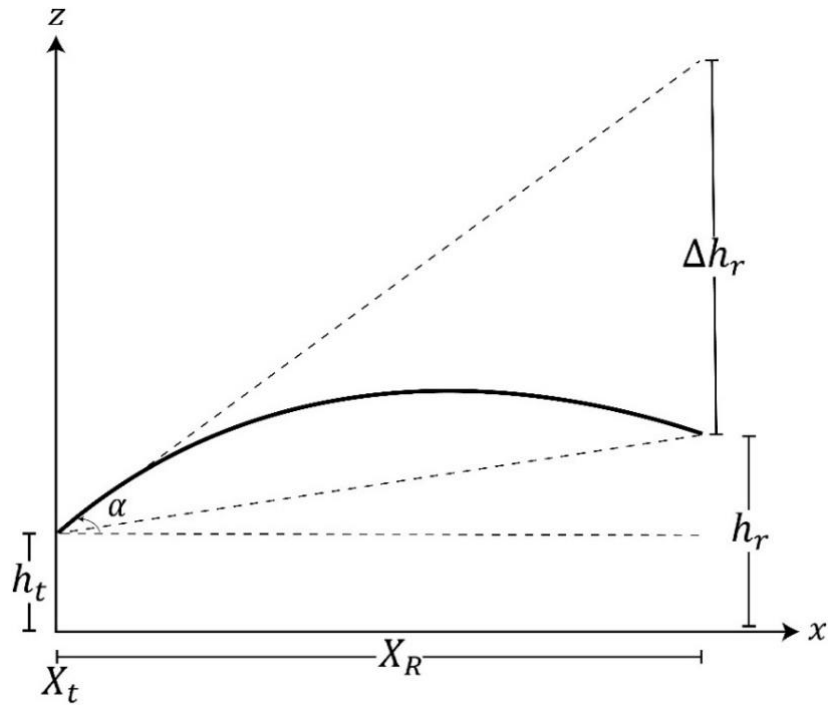


Figura 15. Modelo de Dos-Rayos, rayo directo. Imagen adaptada de (Parada, y otros, 2019).

Cuando se usan rayos para representar la propagación de ondas electromagnéticas en la troposfera, la siguiente fórmula se puede usar para expresar la trayectoria de los rayos que dependen del gradiente de refractividad (Pavel & Pavel, Analytic tropospheric ray-tracing model for constant refractivity gradient profiles, 2006, pág. 2):

$$\frac{d}{dl} \left(n(r) \frac{dr}{dl} \right) = \nabla n(r) \quad (7.1)$$

Para un análisis bidimensional de radio propagación en coordenadas cartesianas como el mostrado en la *Figura 15*. Modelo de Dos-Rayos, rayo directo. Imagen adaptada de ., la ecuación 7.1 queda como muestra la ecuación 7.2.

$$\frac{d}{dx} \left(n(z) \frac{dz}{dx} \right) = \nabla n(z) \quad (7.2)$$

Resolviendo la derivada y aplicando el gradiente, se obtiene:

$$\frac{d(n(z))}{dx} * \frac{dz}{dx} + n(z) * \frac{d^2z}{dx^2} = \frac{d}{dx} n(z) + \frac{d}{dz} n(z) \quad (7.3)$$

Donde $n(z) = n_0 + \delta z$.

Como $n(z)$ es una función dependiente únicamente de la variable z , se tiene:

$$\frac{d(n(z))}{dz} = \frac{d}{dz}(n_0 + \delta z) = \delta \quad (7.4)$$

Por lo tanto, la ecuación 7.3 queda:

$$n(z) * \frac{d^2z}{dx^2} = \frac{d}{dz}n(z) \quad (7.5)$$

El índice de refracción es muy cercano a uno (1.000350) en el aire (Hum, 2013, pág. 1), por lo tanto, la ecuación diferencial queda determinada por:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{d}{dz}n(z) \quad (7.6)$$

La solución a la ecuación diferencial obtenida, se propone de la siguiente manera:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{d}{dz}(n_0 + \delta z) = \delta \quad (7.7)$$

$$d^2z = \delta * dx^2 \quad (7.8)$$

$$dz = (\delta X + K)dx \quad (7.9)$$

$$Z = \frac{\delta X^2}{2} + KX + h_t \quad (7.10)$$

Donde Z y X representan la altura y la distancia del trazo, respectivamente, del punto de la trayectoria en cuestión. Esta ecuación es utilizada para calcular la componente directa de los rayos y se representa la altura como función del gradiente de refractividad.

La ecuación 7.10 depende de la trayectoria del rayo en la coordenada X , la altura del transmisor h_T , en el ángulo de lanzamiento inicial del rayo (α), donde $K = \tan(\alpha)$. Para una distancia conocida entre el transmisor y el receptor X_R , altura del transmisor h_T y el receptor

h_R , el ángulo de lanzamiento inicial se obtiene por trigonometría, como se establece en la ecuación 7.11.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta h_R + h_R - h_T}{X_R}\right) \quad (7.11)$$

Donde,

$$\Delta h_R = \frac{\delta X_R^2}{2} \quad (7.12)$$

La solución al problema se abordó desde el punto de vista de que el rayo es lanzado desde el emisor hacia el receptor, usando el teorema de reciprocidad se puede calcular desde receptor a emisor para obtener como resultado la misma trayectoria.

4.3.2. Rayo reflejado por plano paralelo a tierra

La Figura 16. Rayo incidente y rayo reflejado. Imagen adaptada de . ilustra la trayectoria de un rayo incidente que se refleja debido al suelo, en $x = X$, dónde se forma un ángulo α_1 con el plano paralelo a tierra y la onda reflejada forma un ángulo α_2 con respecto al mismo plano, estos ángulos se pueden calcular con las ecuaciones 7.13 y 7.14.

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{\Delta h_{r1} + h_{r1}}{X}\right) \quad (7.13)$$

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{\Delta h_{r2} + h_{r2}}{R - X}\right) \quad (7.14)$$

Sustituyendo la ecuación 7.12 en las ecuaciones 7.13 y 7.14, se tiene:

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{\frac{-\delta X^2}{2} + h_t}{X}\right) = \arctan\left(\frac{-\delta X}{2} + \frac{h_t}{X}\right) \quad (7.15)$$

$$\alpha_2 = \arctan \left(\frac{\frac{-\delta(R-X)^2}{2} + h_r}{R-X} \right) = \arctan \left(\frac{-\delta(R-X)}{2} + \frac{h_t}{R-X} \right) \quad (7.16)$$

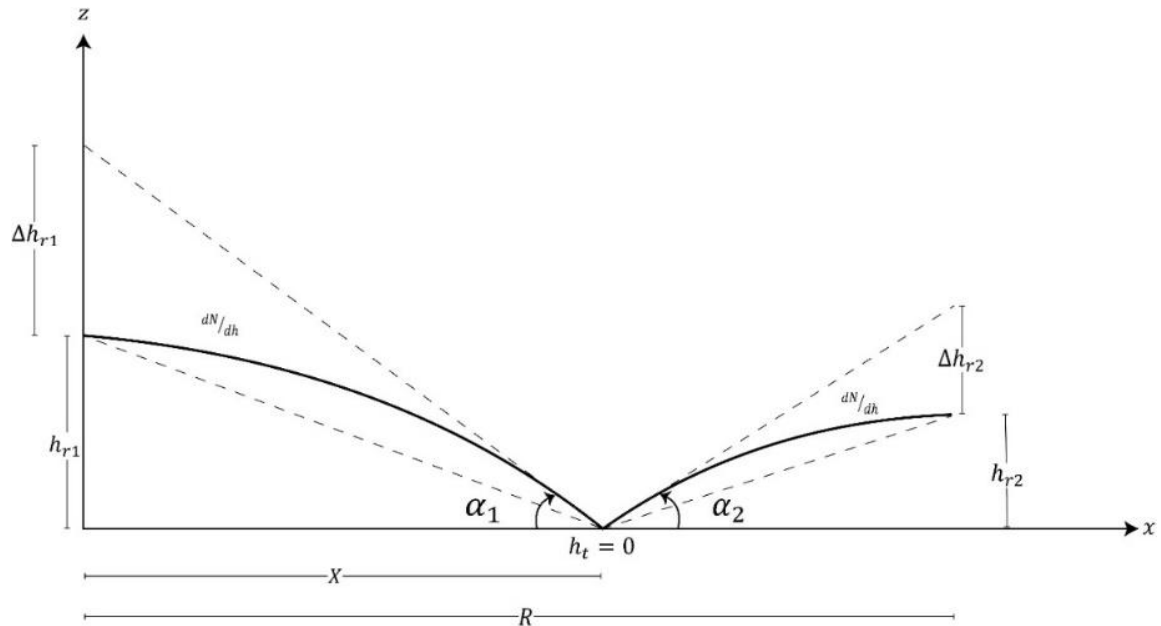


Figura 16. Rayo incidente y rayo reflejado. Imagen adaptada de (Parada, y otros, 2019).

Igualando α_1 y α_2 de las ecuaciones 7.15 y 7.16, se obtiene la siguiente igualdad:

$$\arctan \left(\frac{-\delta X}{2} + \frac{h_t}{X} \right) = \arctan \left(\frac{-\delta(R-X)}{2} + \frac{h_t}{R-X} \right) \quad (7.17)$$

Aplicando tangente en ambos lados de la igualdad, se obtiene:

$$\frac{-\delta X}{2} + \frac{h_t}{X} = \frac{-\delta(R-X)}{2} + \frac{h_t}{R-X} \quad (7.18)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación por el mínimo común múltiplo de todos sus denominadores:

$$2X(R-X) \left(\frac{-\delta X}{2} + \frac{h_t}{X} \right) = 2X(R-X) \left(\frac{-\delta(R-X)}{2} + \frac{h_t}{R-X} \right) \quad (7.19)$$

$$-\delta X^2(R-X) + 2h_t(R-X) = -\delta RX(R-X) + \delta X^2(R-X) + 2h_r \quad (7.20)$$

Agrupando términos semejantes a un solo lado de la igualdad, la ecuación 7.20 queda de la siguiente manera:

$$X^3(2\delta) - X^2(3\delta R) + X(\delta R^2 + 2(-h_t - h_r)) + 2Rh_t = 0 \quad (7.21)$$

Factorizando y reordenando, la ecuación 7.21 queda:

$$X^3(\delta) - X^2\left(\frac{3\delta R}{2}\right) + X\left(\frac{\delta R^2}{2} - h_t - h_r\right) + Rh_t = 0 \quad (7.22)$$

Donde X es la distancia desde el transmisor hasta el punto de reflexión, cuya solución a la ecuación cúbica viene dada por una raíz real, mínima y positiva.

4.3.3. Cálculo de la longitud óptica del rayo

Para calcular la intensidad de campo eléctrico que llega al receptor es necesario obtener la distancia recorrida por el rayo.

Los rayos afectados por difracción de la atmósfera describen trayectorias curvadas, para la calcular la longitud óptica del rayo, se divide la curva en pequeños segmentos, como el mostrado e la Figura 17. Tramo del trazado de un rayo. Imagen propia.. La longitud de la sección se puede calcular aproximadamente, asemejando el tramo a la hipotenusa de un triángulo (línea de color rojo), haciendo uso del teorema de Pitágoras se obtiene la ecuación 7.23.

$$l = \sqrt{(x_{(end)} - x_{(end-1)})^2 + (z_{(end)} - z_{(end-1)})^2} \quad (7.23)$$

La suma de todas las hipotenusas de cada pequeño tramo corresponde aproximadamente a la longitud total del rayo.

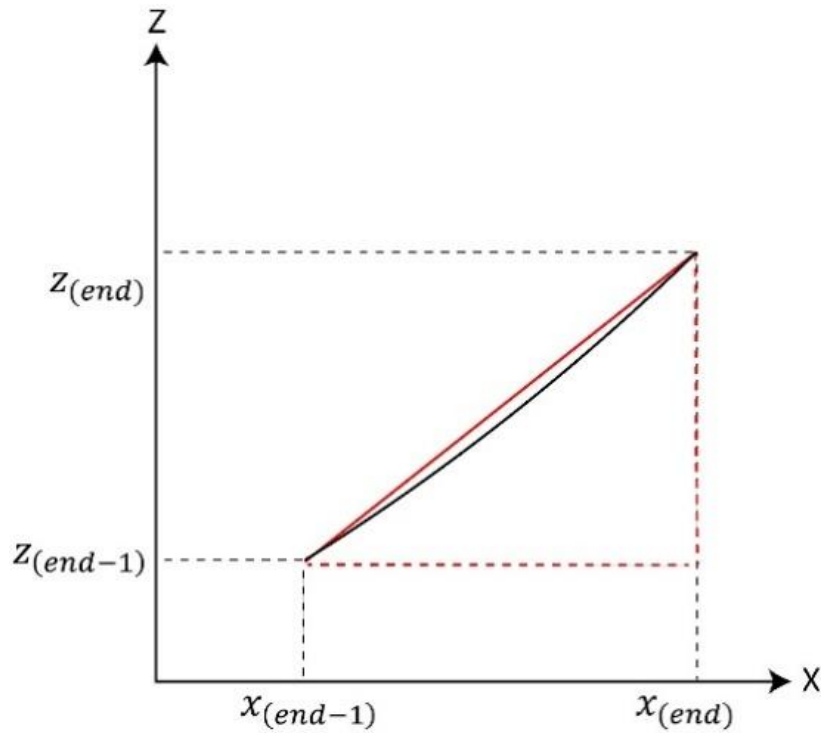


Figura 17. Tramo del trazado de un rayo. Imagen propia.

4.3.4. Formulación de UTD

En el análisis de terrenos con regiones de sombra, se debe considerar que la porción de energía reflejada y difractada, influye significativamente en la pérdida de camino por trayectoria (Mendes, Rego, Parada, Batista, & Guevara, 2019, pág. 3).

Para el desarrollo de las ecuaciones relacionadas con UTD, al igual que para los anteriores modelos, se considera un plano bidimensional, superficies límite conductoras con pérdidas en un medio homogéneo, lineal e isotrópico aplicado a una cuña semiinfinita con bordes rectos y ángulo exterior $n\pi$. En el sistema de coordenadas elegido, el borde recto de la cuña está a lo largo del eje z , las caras de la cuña están en $\varphi = 0$ (cara 0) y $\varphi = n\pi$ (cara n), la fuente incide con ángulo de $\varphi = \varphi_i$ a una distancia $p = s_i$ desde el borde de la cuña y el punto de observación está en (s_d, φ_d) . Además, φ_i es el ángulo de la trayectoria del rayo incidente y

φ_d es el ángulo de la trayectoria del rayo difractado. La Figura 18. Geometría y variables de difracción por cuña. Imagen adaptada de . muestra la geometría del problema.

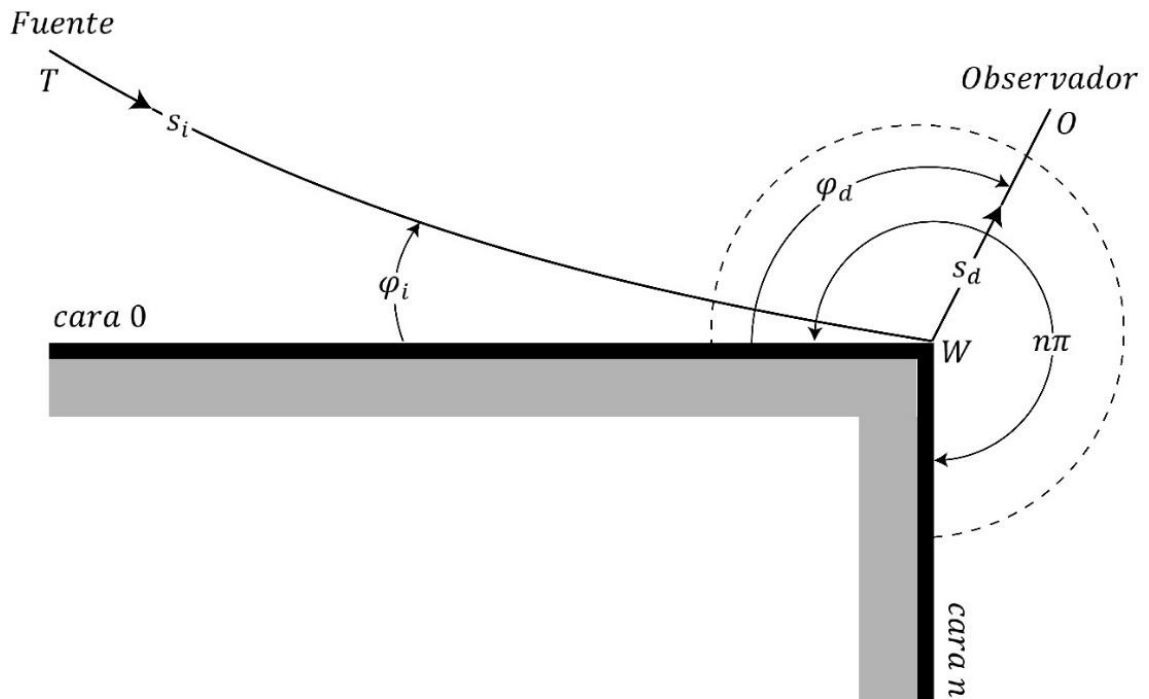


Figura 18. Geometría y variables de difracción por cuña. Imagen adaptada de (Tami, y otros, 2008).

Las distancias s_i y s_d se obtienen de la ecuación 7.24, fórmula utilizada para el cálculo de la longitud óptica del rayo (Pavel & Pavel, Analytic tropospheric ray-tracing model for constant refractivity gradient profiles, 2006, pág. 2).

$$l = \int_0^R n_0 \left[1 + \delta \left(\frac{\delta x^2}{2} + Kx + h \right) \right] \cdot \sqrt{1 + (\delta x + K)^2} dx \quad (7.24)$$

La solución general de UTD para calcular el campo eléctrico en un punto de observación es:

$$E_d(O) = E_i(W) \cdot \bar{D}A(s_d) e^{-jks_d} \quad (7.25)$$

Donde, $E_i(W)$ es el campo eléctrico incidente a la cuña, $A(s_d)$ es el factor de amplitud, s_d es la distancia entre la cuña y el observador y \bar{D} es el coeficiente diádico de difracción (A

Uniform Geometrical Theory of Diffraction for and Edge in a Perfectly Conducting Surface, 1974, pág. 5), dado por:

$$\bar{D}^{s,h} = G_0^{s,h} [D_2 + R_0^{s,h}(\alpha_0)D_4] + G_n^{s,h} [D_1 + R_n^{s,h}(\alpha_n)D_3] \quad (7.26)$$

Di, para $i = 1, 2, 3$ y 4 , son los coeficientes de difracción UTD, G_0 y G_n , son factores de incidencia, R_0 y R_n son coeficientes de reflexión de Fresnel, para las caras 0 y n , respectivamente.

La formulación UTD se basa en los coeficientes de reflexión de Fresnel, específicamente, los coeficientes de Lubbers son los ángulos de incidencia y de reflexión de los rayos incidentes y difractados. Lubbers define los ángulos α_0 y α_n , basado en los coeficientes de reflexión de Fresnel, como $\alpha_0 = \varphi_i$ y $\alpha_n = n\pi - \varphi_d$.

4.4. Diseño e implementación de los algoritmos

En esta sección se presenta los algoritmos desarrollados para la aplicación del modelo de Dos Rayos Modificado, en las diferentes condiciones canónicas que se establecieron como problema de investigación. De la misma manera, se ilustra y describe los trazos de los rayos obtenidos en cada caso y se describe las pérdidas por camino a lo largo del escenario.

4.4.1. Rayos directos

Para el trazado de los rayos ilustrados en la Figura 19. Trazado de rayos directos en tierra plana e inclinada. Imagen propia., se utilizó la ecuación 7.10.

En el caso de tierra plana, se tiene una altura de receptor constante, con variaciones Δ_x en el ancho del receptor X_R y para el tramo de tierra inclinada se considera una pendiente m

específica, que influye en la altura del receptor. La trayectoria de los rayos, describe una trayectoria curva debido al gradiente de refractividad que se estableció en la sección 7.1.

Para evidenciar el efecto que tiene la atmósfera en la trayectoria de los rayos, se realizó un trazado con refractividad nula ($G = 0$), en la Figura 20. Trazado de rayos directos. Imagen propia. se puede observar que la trayectoria de los rayos ahora se describe por una línea recta a diferencia de los rayos curvados mostrados en la Figura 19. Trazado de rayos directos en tierra plana e inclinada. Imagen propia..

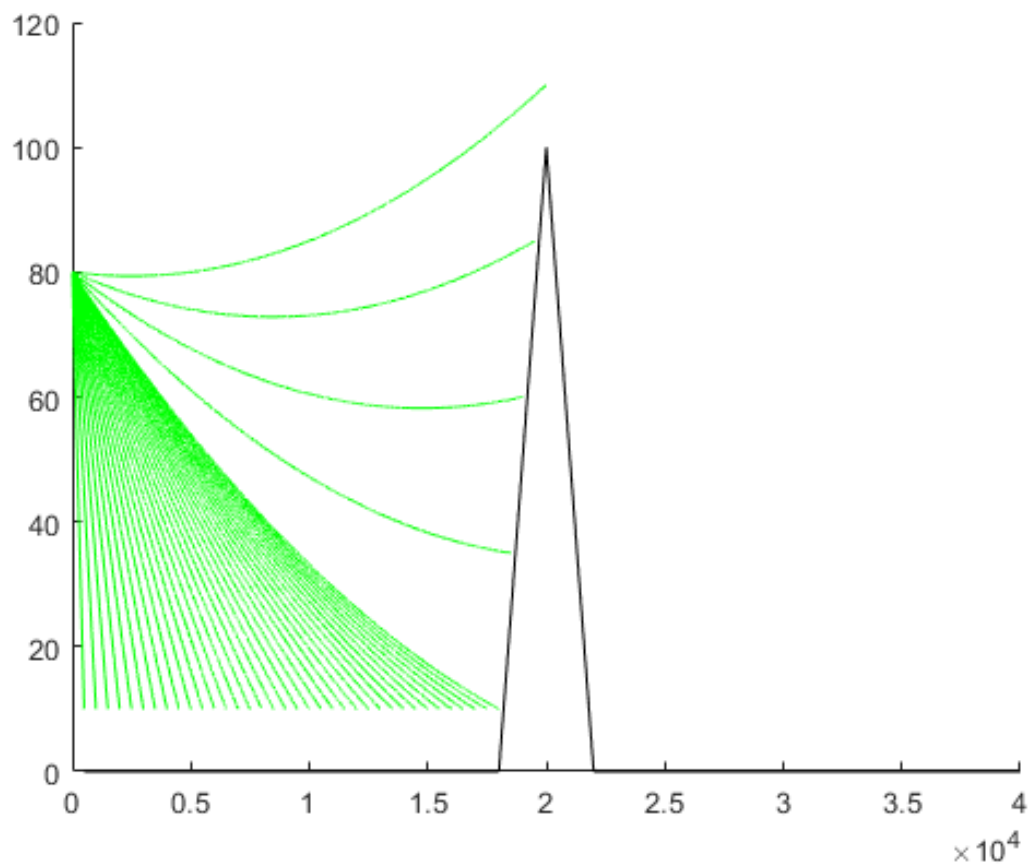


Figura 19. Trazado de rayos directos en tierra plana e inclinada. Imagen propia.

De la comparación de las dos figuras, se evidencia que los efectos de la refracción se hacen más evidentes para distancias grandes.

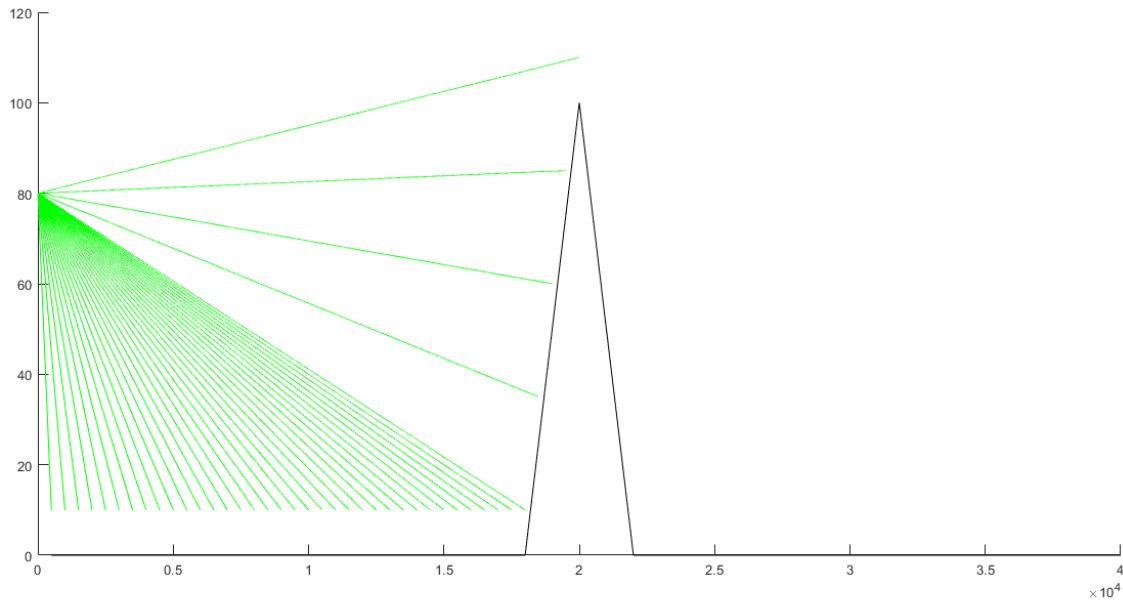


Figura 20. Trazado de rayos directos. Imagen propia.

4.4.2. Trazado de los rayos incidentes y reflejados en el suelo

Para el trazado de los rayos que inciden y se reflejan por la superficie plana e inclinada, se implementó un algoritmo computacional utilizando la ecuación 7.22, la fórmula matemática corresponde a una función cúbica para el cálculo de la coordenada x donde el rayo incide sobre el suelo, que arroja tres posibles soluciones de las cuales se toma en cuenta la respuesta que sea real, mínima y positiva. En la Figura 21. Trazado de los rayos incidentes y reflejados por la superficie. Imagen propia. se puede observar que para la parte inclinada existen dos rayos reflejados, ahora las componentes que llegan al receptor están compuestas por dos componentes reflejadas que se complementan con los trazos directos. Para el caso de tierra plana se tiene dos componentes de campo eléctrico; reflejado por plano de tierra y directo.

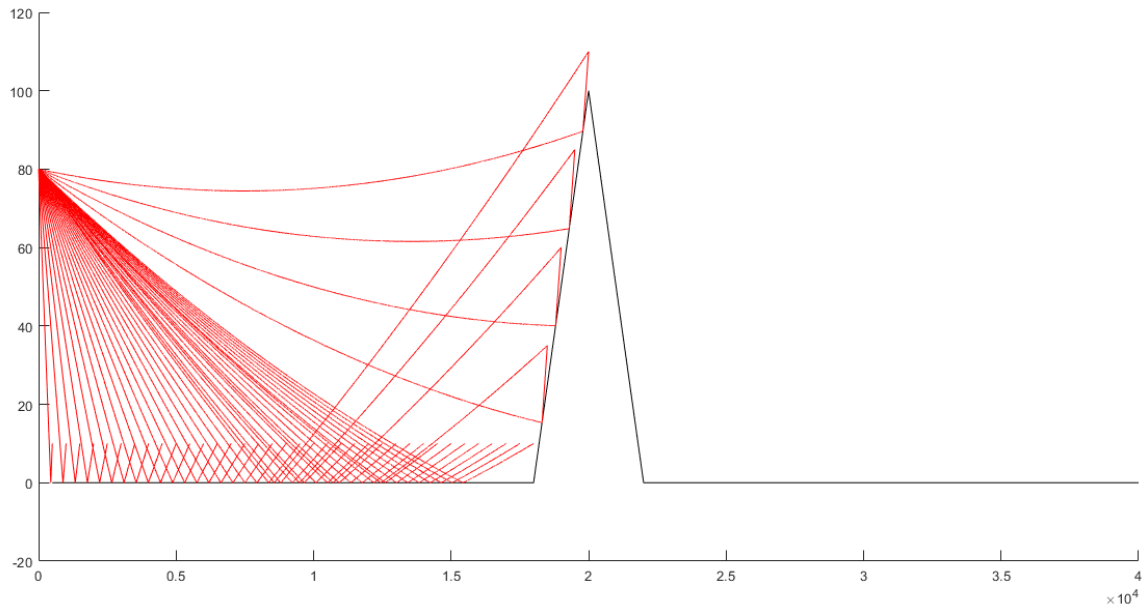


Figura 21. Trazado de los rayos incidentes y reflejados por la superficie. Imagen propia.

Para el cálculo de la intensidad de la componente de campo eléctrico reflejado se utilizó la ecuación 5.07, para los dos casos de polarización oblicua, ya sea normal o paralela, según sea el caso. En las componentes reflejadas de campo eléctrico se tiene en cuenta las características de la superficie, como, permitividad compleja (ϵ_c), permeabilidad magnética (μ) y conductividad (σ).

4.4.3. Rayo directo a la cuña

El algoritmo descrito en el diagrama de flujo de la Figura 22. Diagrama de flujo para encontrar el punto de difracción. Imagen propia., es utilizado como base en todos los casos canónicos para buscar puntos específicos del escenario, este algoritmo realiza un barrido iterativo para establecer la coordenada donde se encuentra la punta de la cuña, luego traza un camino directo desde el transmisor hasta el punto de difracción.

En la Figura 23. Trayectoria del rayo incidente en la cuña. Imagen propia., se ilustra el trazo del camino de propagación de rayo, el rayo incidente será descompuesto en nuevos rayos difractados, enviando rayos en todas las direcciones.

Como rayo incidente para el caso de difracción, se requiere calcular la longitud del rayo, de la misma manera que en las secciones descritas anteriormente, para obtener la distancia recorrida y poder calcular la intensidad de campo eléctrico, para la “nueva fuente” de emisión de señal.

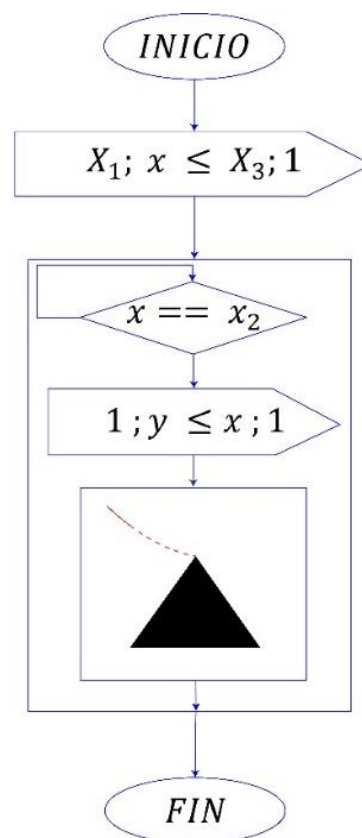


Figura 22. Diagrama de flujo para encontrar el punto de difracción. Imagen propia.

La implementación del algoritmo genera un único trazo, comprendido en la región $x = 0$ y $x = 20 \text{ Km}$, este rayo no tiene componente reflejada por plano paralelo a tierra.

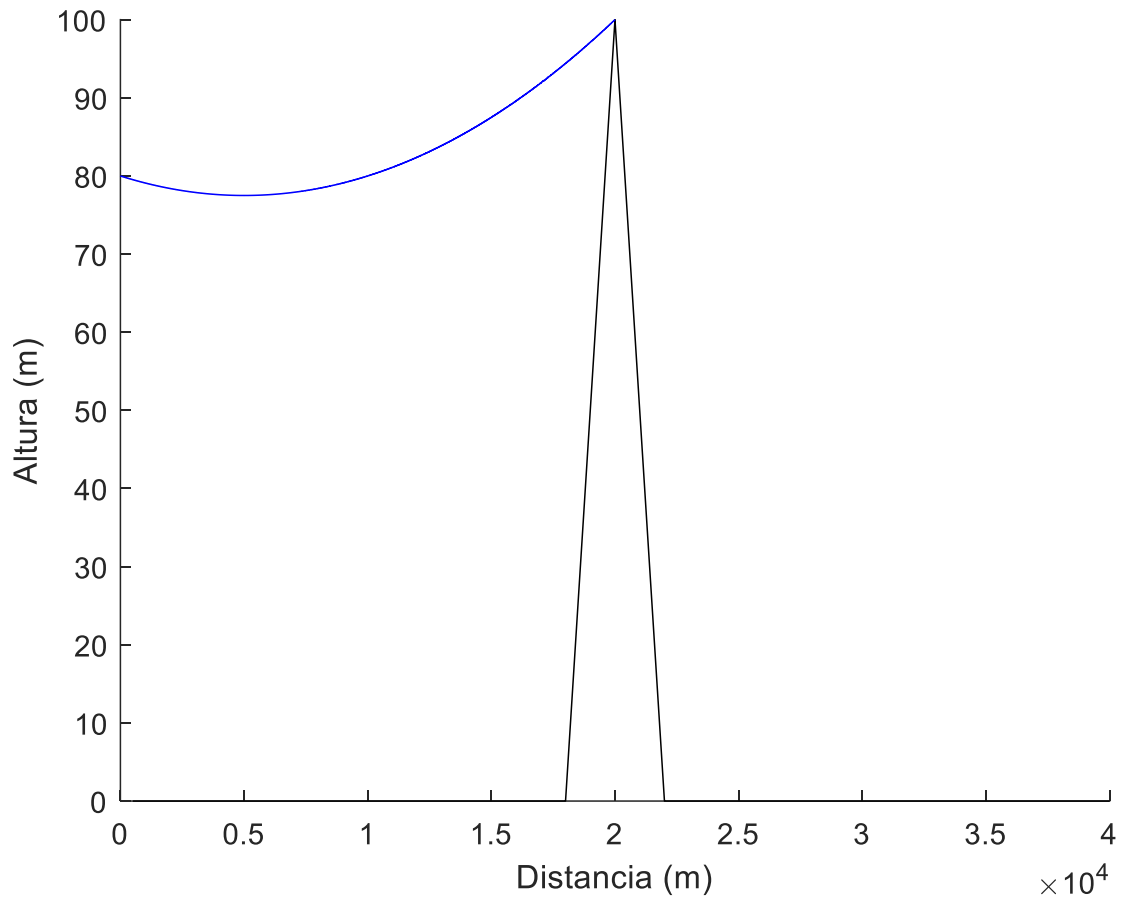


Figura 23. Trayectoria del rayo incidente en la cuña. Imagen propia.

4.4.4. Difracción por cuña

El rayo que se trazó en la sección 5.1.1 da origen a la difracción ilustrada en la Figura 24. Difracción por cuña. Imagen propia.; se muestra las componentes directas, incidentes y reflejadas que llegan a los diferentes puntos receptores situados en la región de sombra. Por la difracción se generan rayos que se irradian en todas las direcciones, en el trazo solo se toma en cuenta los caminos que toma el campo eléctrico que aporta componentes en los puntos receptores.

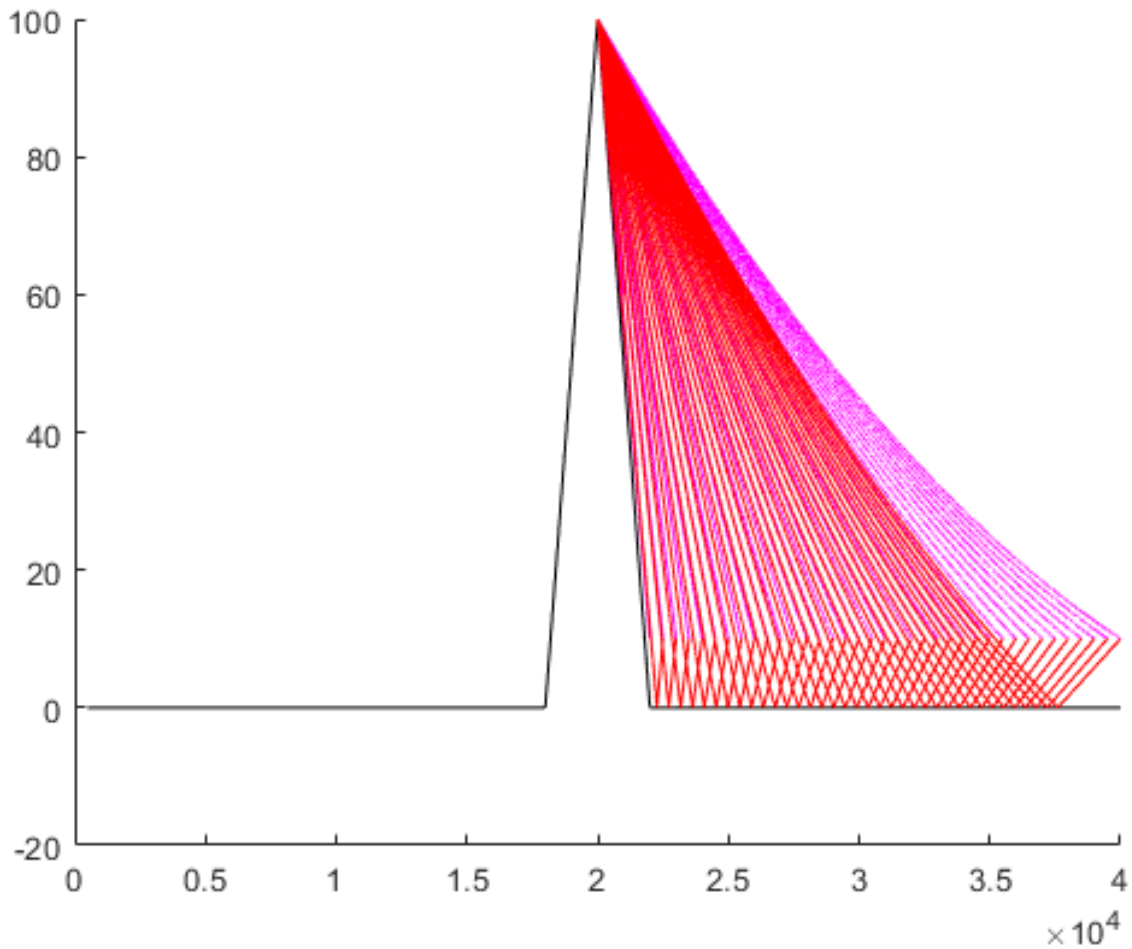


Figura 24. Difracción por cuña. Imagen propia.

4.4.5. Trazado de rayos

La Figura 25. Conformación de los rayos para calcular un perfil horizontal de campo. Imagen propia. ilustra el trazado de los diferentes tipos de rayos, presentes en el escenario de investigación, aplicando el modelo de Dos Rayos Modificado en combinación con UTD, a una frecuencia de operación de 2 GHz a una distancia de 40 km con puntos de receptor paralelos al plano de la superficie con pérdidas, con una altura de cuña de 100 metros y dos tramos de tierra plana. Esta figura evidencia el efecto de la refractividad atmosférica sobre la trayectoria de los caminos, y la “iluminación” de la región de sombra

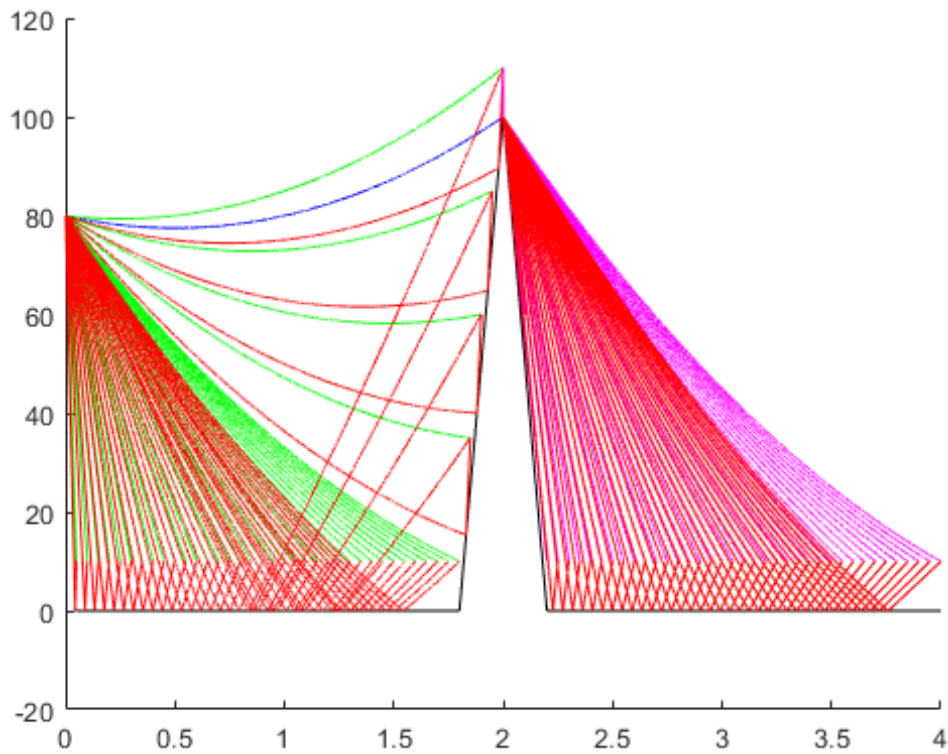


Figura 25. Conformación de los rayos para calcular un perfil horizontal de campo. Imagen propia.

La Figura 26. Conformación de los rayos para calcular un perfil horizontal de campo. Imagen propia. ilustra el trazado de los rayos, para un perfil vertical, para un ancho de receptor de 30 km, considerando diferentes alturas, separadas cada 20 m.

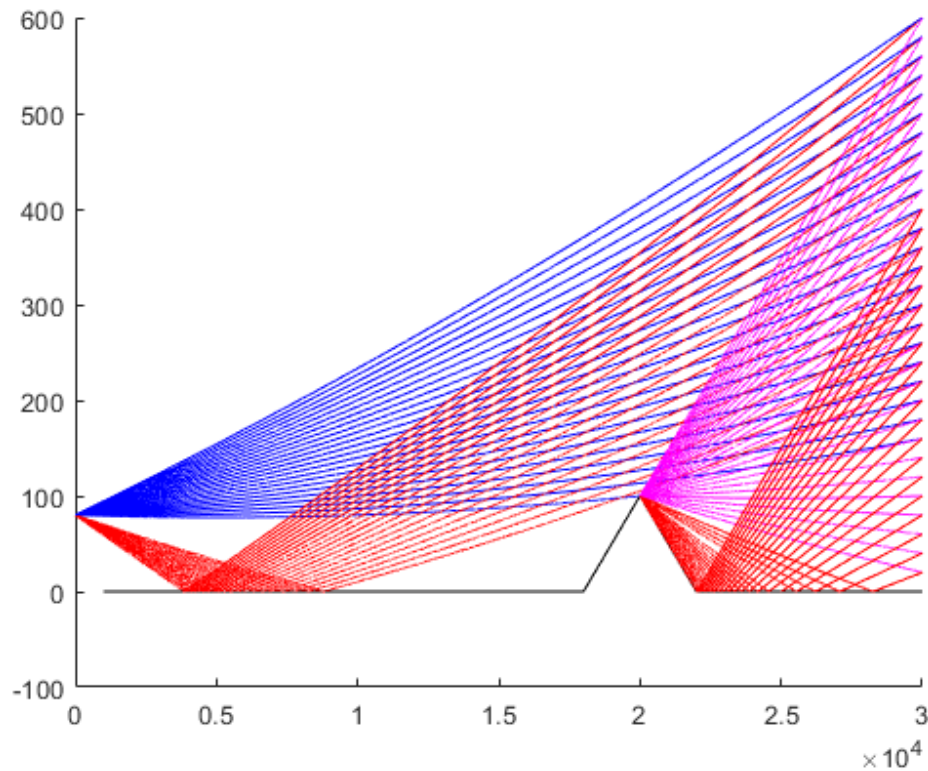


Figura 26. Conformación de los rayos para calcular un perfil horizontal de campo. Imagen propia.

4.4.6. Pérdidas de camino

Las gráficas de pérdidas por camino, muestran la reducción en la densidad de potencia (atenuación) de una onda electromagnética a medida que se propaga a través del espacio (Roelens, Van den Bulcke, W, Vemeeren, & Martens, 2006).

En la *Figura 27*. Curvas de pérdidas por camino para un perfil horizontal de 40 km. Imagen propia. se ilustra las curvas de pérdida de camino, obtenida a partir de la ecuación 7.27. Se evidencia la similitud del modelo de Dos Rayos Modificado y la GO en distancias relativamente cortas, pero a medida que aumenta considerablemente la distancia, ambos métodos empiezan a divergir.

$$E (dB) = 20 \log(E) \quad (7.27)$$

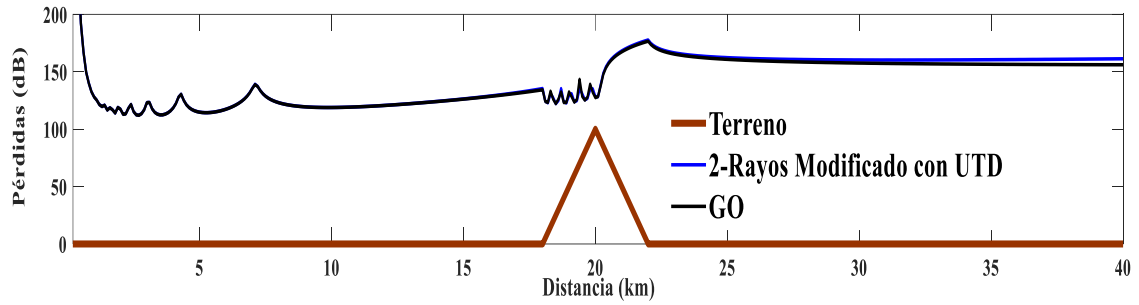


Figura 27. Curvas de pérdidas por camino para un perfil horizontal de 40 km. Imagen propia.

La Figura 27. Curvas de pérdidas por camino para un perfil horizontal de 40 km. Imagen propia., representa el comportamiento de las pérdidas por camino para un ambiente de propagación cuya extensión es 40 km.

En la Figura 28. Pérdidas de camino para un perfil vertical. Imagen propia. se presenta la pérdida por camino en un perfil vertical, para un intervalo de altura de 0 m a 600 m. Para este caso ocurre lo contrario con respecto al análisis horizontal realizado anteriormente ya que para alturas pequeñas ambos modelos difieren, pero para alturas relativamente grandes, los modelos se comportan de manera semejante, llegando casi a solaparse.

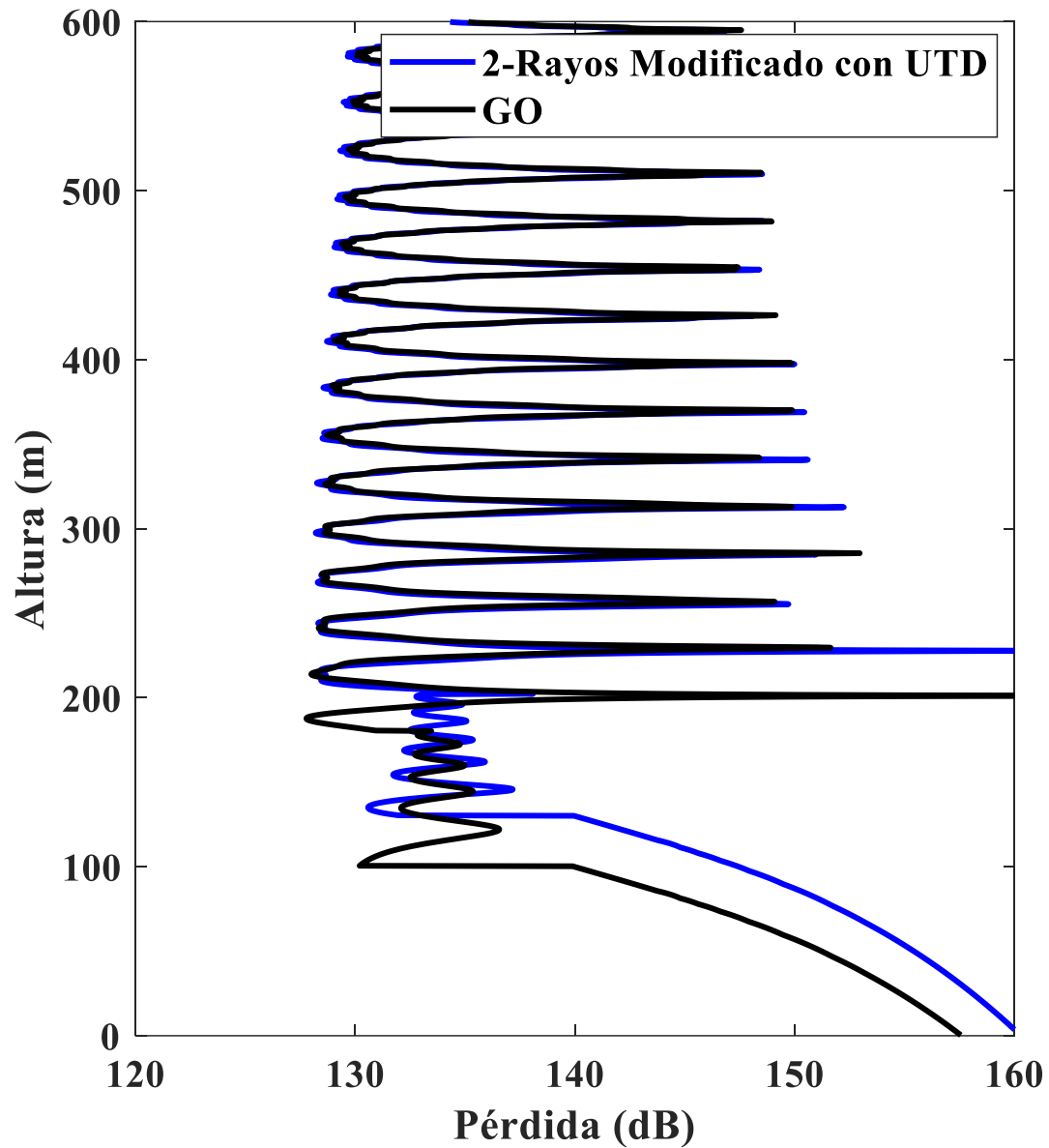


Figura 28. Pérdidas de camino para un perfil vertical. Imagen propia.

4.5. Verificación de los resultados

En esta sección se verifica los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Dos Rayos Modificado con UTD contra el algoritmo SSPE. La validación del modelo se realiza de manera gráfica y estadística.

Se incluye las gráficas de GO para demostrar las diferencias que se presentan al despreciar los efectos atmosféricos.

4.5.1. Perfil horizontal

En la Figura 29. Pérdidas en campo eléctrico para una cuña de (a) 100 m y 60 m. Imagen propia. se muestra una comparación entre el modelo de Dos Rayos Modificado con UTD versus GO y DMFT-SSPPE. Se ilustra los perfiles horizontales de pérdidas por trayectoria, a lo largo del terreno, para una cuña de (a) 100 m y (b) 60 m, respectivamente.

Los puntos de receptor se encuentran como se especificó en la sección 7.2 a 10 metros de altura a lo largo del terreno, partiendo de 100 m hasta 40 km.

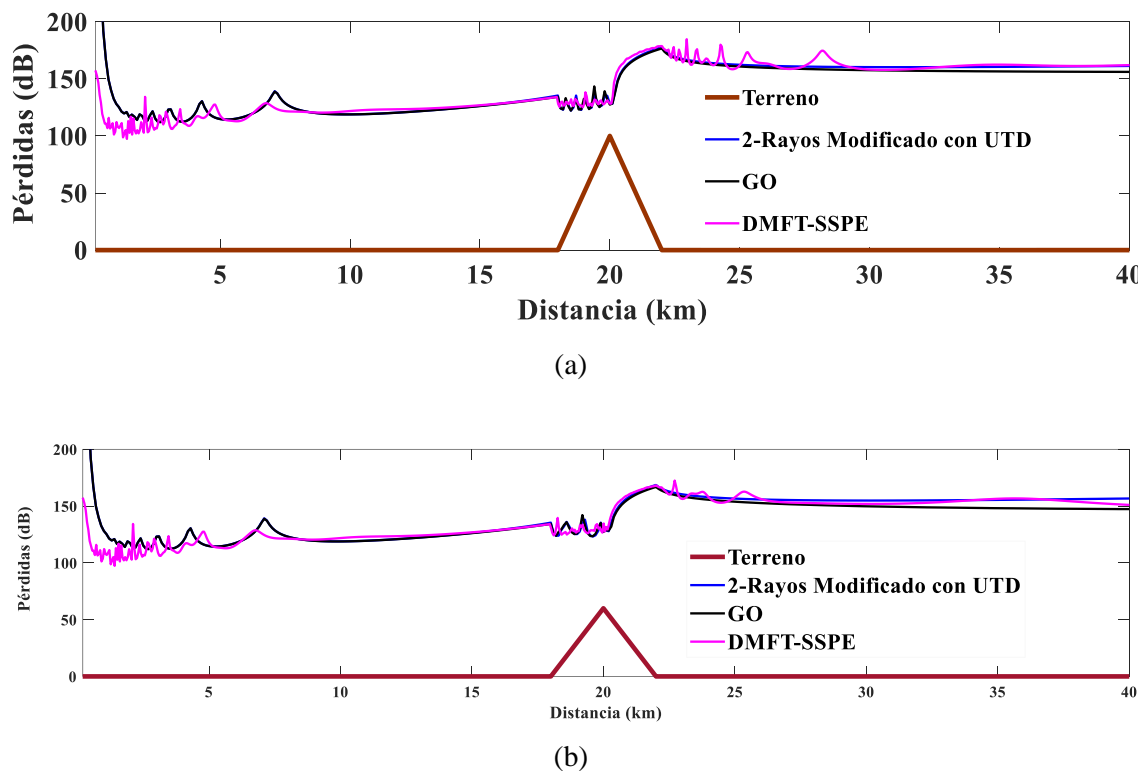


Figura 29. Pérdidas en campo eléctrico para una cuña de (a) 100 m y 60 m. Imagen propia.

Para distancias largas, los resultados obtenidos del modelo de Dos-Rayos Modificado con UTD y la solución numérica DMFT-SSPE están más cerca el uno del otro. Esto se debe a que los efectos atmosféricos se hacen más notables en este intervalo, Por lo que la propuesta clásica de GO no es precisa para este tipo de casos.

4.5.2. Perfil vertical

En las Figura 30. Pérdida por trayectoria en intensidad de campo para una cuña de 60 m. Imagen propia. y Figura 31. Pérdida por trayectoria en intensidad de campo para una cuña de 100 m. Imagen propia.

, se presentan los perfiles verticales de las pérdidas de camino, tomadas de la aplicación del modelo de Dos Rayos modificado junto con UTD, DMFT-SSPE y GO para una cuña de 60m y 100 m, respectivamente.

Incluir la UTD es adecuado para estimar la propagación en las zonas de sombra, ya que para el perfil vertical los dos modelos convergen en las primeras alturas, es decir, el método se comporta de manera similar con el algoritmo DMFT-SSPE para alturas cercanas a la región de sombra.

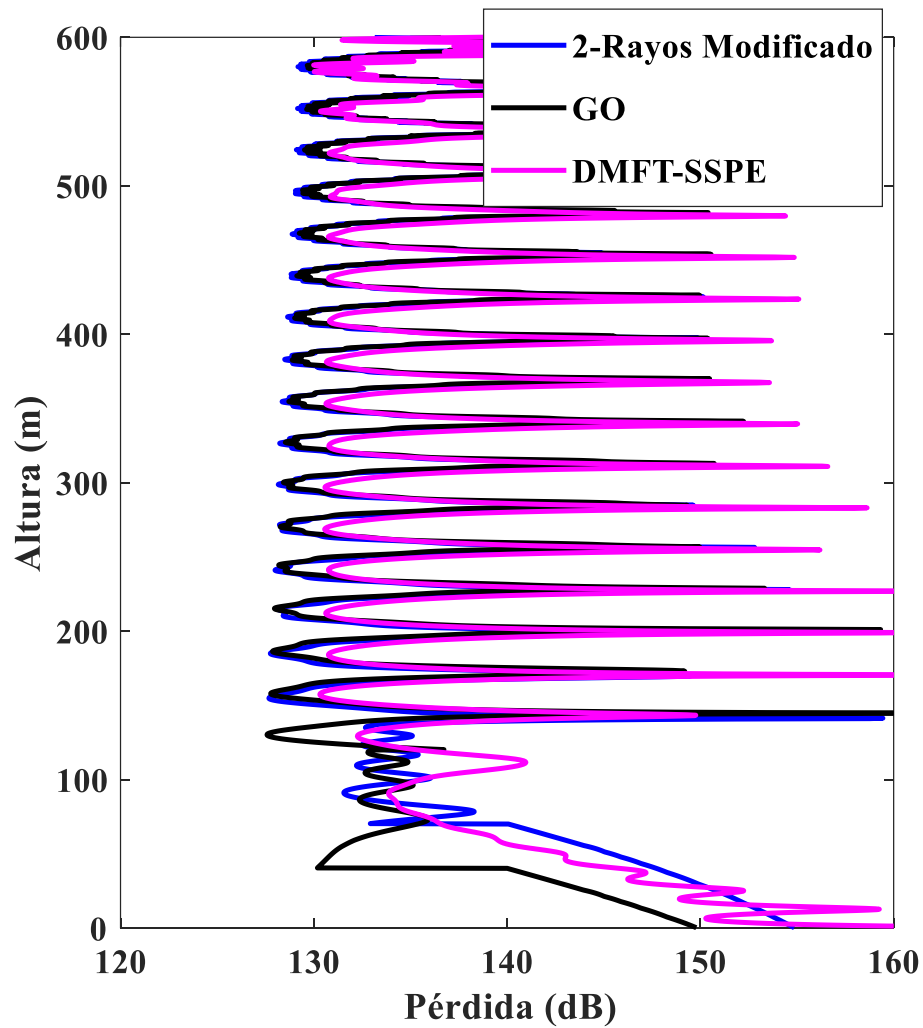


Figura 30. Pérdida por trayectoria en intensidad de campo para una cuña de 60 m. Imagen propia.

Las curvas de pérdidas de camino, obtenidas de las simulaciones para los dos tamaños de cuña, difieren de la GO en las primeras alturas, pero para alturas grandes, ambos métodos se comportan de manera semejante.

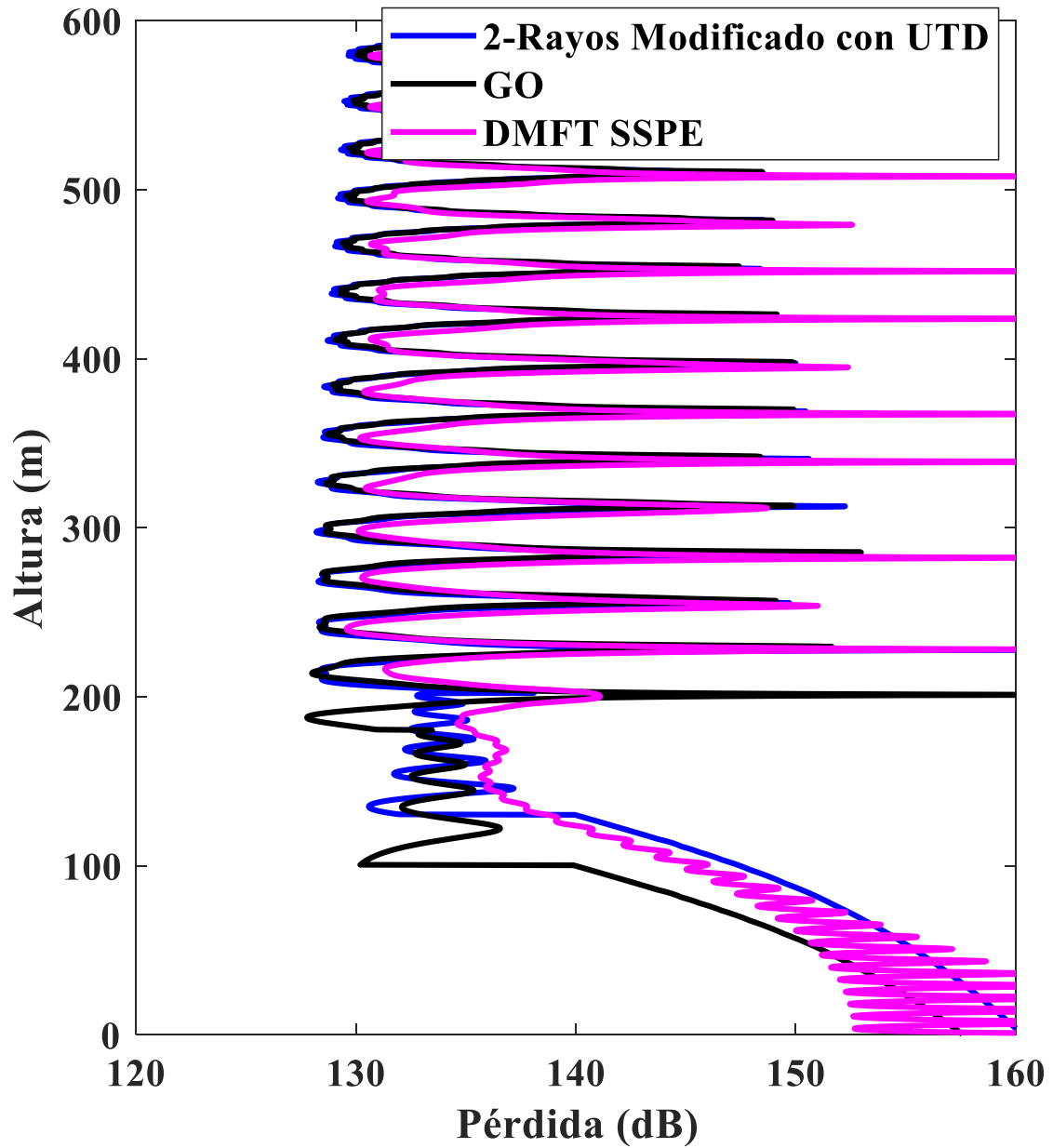


Figura 31. Pérdida por trayectoria en intensidad de campo para una cuña de 100 m. Imagen propia.

4.5.3. Verificación estadística

Para la verificación estadística se determinó el error medio absoluto (EMA) y la desviación estándar, utilizando las ecuaciones 7.28 y 7.29, respectivamente

Estas medidas establecen cierta precisión del Modelo de Dos Rayos Modificado con UTD, en comparación con el modelo DMFT-SSPE y la GO.

$$EMA = \frac{\sum |x_i - X|}{N} \quad (7.28)$$

Donde x_i es el valor del modelo (Dos Rayos Modificado o GO) y X representa el valor obtenido aplicado el modelo DMFT-SSPE y N la cantidad total de datos comparados.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X)^2}{N}} \quad (7.29)$$

Donde σ representa la desviación estándar.

La tabla 3 presenta los datos de la verificación del modelo para un perfil horizontal, con una cuña de 60 metros de altura.

Tabla 3. Verificación en Perfil horizontal Para una cuña de 60 m. Elaboración propia.

Modelo	Dos Rayos Modificado	GO
EMA	0.0050 dB	0.0162 dB
Desviación estándar	3.9314 dB	4.9539 dB

En la tabla 4 se muestra los valores estadísticos para una cuña de 100 metros en un perfil horizontal.

Tabla 4. Verificación en Perfil horizontal Para una cuña de 100 m. Elaboración propia.

Modelo	Dos Rayos Modificado	GO
EMA	0.0044 dB	0.0160 dB
Desviación estándar	4.1383 dB	5.0458 dB

Los resultados para un perfil vertical sobre una cuña de 60 metros de altura, son mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Verificación en Perfil vertical Para una cuña de 60 m. Elaboración propia.

Modelo	Dos Rayos Modificado	GO
EMA	0.0066 dB	0.0296 dB
Desviación estándar	3.7708 dB	6.1944 dB

En la tabla 6 se muestra los resultados del perfil vertical de pérdida por camino en el caso de una cuña 100 metros de altura.

Tabla 6. Verificación en Perfil vertical Para una cuña de 100 m. Elaboración propia.

Modelo	Dos Rayos Modificado	GO
EMA	0.0007 dB	0.0245 dB
Desviación estándar	3.6674 dB	5.3265 dB

En todas las tablas presentadas, se observa una mejor estadística de error, del Modelo de Dos Rayos Modificado sobre la GO, para los perfiles vertical y horizontal, en los dos tamaños de cuña.

4.6. Divulgación de los resultados

De los resultados obtenidos de la verificación del Modelo de Dos Rayos Modificado, donde se tomó como referencia el algoritmo DMFT-SSPE, se obtiene la aceptación del artículo científico titulado “Modified Two-Ray Model with UTD and Atmospheric Effects”

en la conferencia EUCAP 2020. En el anexo A se incluye el correo de aceptación de la investigación.

5. Conclusiones

De la revisión bibliográfica, se establecieron las bases teóricas, necesarias para el desarrollo de los modelos matemáticos, relacionados con el problema de investigación, aplicado al escenario propuesto.

Se verificó matemáticamente el método híbrido que combina el modelo de Dos Rayos Modificado, complementado con la teoría uniforme de difracción (UTD). Se tuvo en cuenta los efectos refractivos de una atmósfera estándar, con un gradiente de refractividad constante.

Para el trazado de los caminos de campo eléctrico, se evidenció trayectorias curvadas, en lugar de las trayectorias ópticas rectilíneas que aporta la GO. Las técnicas desarrolladas se aplicaron a un escenario que incluye los casos canónicos de tierra plana, superficie inclinada y región de sombra. De la implementación se obtuvo el trazado de rayos, directos, reflejados y difractados por cuña.

En la aplicación del modelo se incluyó como elemento adicional; las características disipativas no ideales del material de la superficie del terreno. Acercando el modelo a las condiciones de un ambiente de propagación, semejante a un escenario real.

Los resultados obtenidos de la comparación de ambos modelos, establecieron ciertas similitudes, en el comportamiento en las curvas de pérdidas por camino, mostrando más afinidad, para el caso de perfil horizontal, en distancias grandes, esto ocurre debido a que los efectos de refractividad son más notables. En el perfil vertical, ambos métodos convergen considerablemente, para alturas más bajas con respecto a la superficie, donde la difracción por cuña es más evidente.

Se verificó positivamente el Modelo de Dos Rayos Modificado con el algoritmo DMFT-SSPE, sobreponiendo gráficamente las curvas de pérdidas por camino, obtenidas de cada

modelo, y se complementó estadísticamente, la comparación, utilizando la desviación estándar y el error medio absoluto.

De la combinación del Modelo de Dos-Rayos con UTD, se pudo establecer las trayectorias de los rayos en una región de sombra.

6. Referencias

- A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for and Edge in a Perfectly Conducting Surface. (1974). *Proceedings of the IEE*.
- Bai, R., Liao, C., Sheng, N., & Zhang, Q. (2013). Prediction of wave propagation over digital terrain by parabolic equation model. *IEEE International Symposium on Microwave, Antennam Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*.
- Bernal, D., Díaz, C., Paéz, C., & Bustamante, R. (2008). *Herramienta para la predicción de la radiopropagación en una celda inalámbrica*. Barranquilla: Universidad de Norte.
- CampilloTorrecillas, V. (2008). *Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basado en GO y UTD*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Costa Balvedi, G., & Walter, F. (2005). Simulando la propagación de señales GPS en conductos troposféricos a través del método de trazado de rayos. *Instituto Tecnológico de Aeronáutica*.
- Eanennam, V. (2008). A souvey of propagation models used in vehicular and hoc network (vanet) research. *Paper written for course Mobile Radio Communication*, University of Twente.
- Escobar Salguero, L., & Cortés Soto, F. O. (2000). *Fundamentos de Teoría Electromagnética*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, J., & Rodríguez, O. (2002). Desempeño de los Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas Urbanas. *X Congreso Internacional de Telecomunicaciones*.
- Hayt, W. (2001). *Teoría electromagnética*. Nueva York: McGraw Hill.
- Hum, S. V. (2013). Atmospheric Effects. *Radio and Microwave Wireless Systems*.

- Izkander, M., & Yun, Z. (2002). Propagation prediction models for wireless communication systems. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*.
- Mendes, J., Rego, C., Parada, D., Batista, C., & Guevara, D. (2019). SSPE Method Including Backward Term for an EM Propagation Real Case Study. *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2.
- Parada, D., Guevara, D., Rego, C., Mendes, J., Araque, B., & Ramos, G. (2019). A comparison Between a Modified Two-Ray Model with Atmospheric Effects and the SSPE Method for an EM Propagation Case Study. *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*.
- Pavel, V., & Pavel, P. (2005). Tropospheric refraction modeling using ray-tracing and parabolic equation. *Radio Engineering Prague*.
- Pavel, V., & Pavel, P. (2006). Analytic tropospheric ray-tracing model for constant refractivity gradient profiles. *First European Conference on Antennas and Propagation*, 4.
- Rappaport, T. (1996). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR.
- Roelens, L., Van den Bulcke, S., W, J., Vemeeren, G., & Martens, L. (2006). Path loss model for wireless narrowband communication above flat terrain. *Electronics Letters*.
- Sadiku, M. (2003). *Elements de electromagnetismo*. Oxford: Oxford University Press.
- Serway, R., & Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*. Estados Unidos: Cengage Learning.
- Silva, E. (2004). A vectorial analysis of the two-ray model. *Ninth International Conference on Communications Systems*.

Tami, D., Rego, C., Guevara, D., Navarro, A., Moreira, F., Giménez, J., & Triana, H. (2008).

Analysis of heuristic uniform theory of diffraction coefficients for electromagnetic scattering prediction. *International Journal of Antennas and Propagation*.



Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Ciudad de México: Prentice Hall.

Torrecillas, V. C. (2008). Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Anexos

Anexo 1. Correo de aceptación del artículo científico.

[EuCAP 2020] Notification of your paper "Modified Two-Ray Model with UTD and Atmospheric Effects"

 **tpc@eucap2020.org** <tpc@eucap2020.org> 
11/12/2019 16:14

Para: Diego Parada; Andres Navarro; Dinael Guevara; Cássio Rego; Roger Alexander Badillo

Dear Mr. Diego Parada

As the EuCAP 2020 TPC Chairs, we are pleased to inform you that your paper #1570603567, entitled "**Modified Two-Ray Model with UTD and Atmospheric Effects**", has been accepted for inclusion in the programme of EuCAP 2020 (Copenhagen, Denmark, 15-20 March 2020) after the peer review by at least 3 reviewers and a meta-reviewer, as well as validation by us and the EuCAP Steering Committee.

We would like to thank you for your contribution to EuCAP's ongoing success and reputation for quality and offer our personal congratulations for being selected for inclusion in the conference programme.