

	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(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): RONALD STIVEN APELLIDOS: DAZA DAZA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): DINAEI APELLIDOS: GUEVARA IBARRA

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): MODELOS DE DOS RAYOS MODIFICADO APLICADO EN PROBLEMAS DE RADIO PROPAGACIÓN: EFECTOS DIFRACTIVOS POR PERFILES DEL TERRENO

RESUMEN:

La creciente demanda de tecnologías de comunicación más eficientes en cobertura y calidad de servicio, han llevado a la necesidad de desarrollar modelos de caracterización de canal más precisos y eficientes que permitan evaluar el comportamiento de las ondas de radiofrecuencia. La identificación adecuada de los factores que afectan la propagación de las ondas, constituye grandes dificultades en la consolidación de un modelo. Esta investigación contribuye con un modelo modificado de dos rayos que además de considerar los efectos de refracción de la atmósfera estándar, evalúa los efectos de difracción en una cuña perfectamente conductora. Este modelo está basado en los principios de óptica geométrica y la teoría uniforme de difracción. Los resultados se confrontaron con los obtenidos en la solución numérica SSPE, que se implementó en trabajos desarrollados en el Grupo de Antenas, Propagación y Teoría Electromagnética de la Universidad Federal de Minas Gerais. El modelo de dos rayos fue verificado al superponer las gráficas de pérdidas por camino frente al modelo SSPE, examinando su precisión estadísticamente a través del error medio absoluto, demostrando ser rápido y preciso.

PALABRAS CLAVES: REFRACCIÓN, DIFRACCIÓN, MODELO DE DOS RAYOS

MODIFICADO, SOLUCIÓN NUMÉRICA SSPE.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 64

PLANOS: 0

ILUSTRACIONES: 23

CD ROOM:

MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO APLICADO EN PROBLEMAS DE RADIO
PROPAGACIÓN: EFECTOS DIFRACTIVOS POR PERFILES DE TERRENO

RONALD STIVEN DAZA DAZA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CÚCUTA

2020

MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO APLICADO EN PROBLEMAS DE RADIO
PROPAGACIÓN: EFECTOS DIFRACTIVOS POR PERFILES DE TERRENO

RONALD STIVEN DAZA DAZA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

DIRECTOR: PhD. DINAEL GUEVARA IBARRA

CODIRECTOR: Mag. DIEGO ANDRÉS PARADA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CÚCUTA

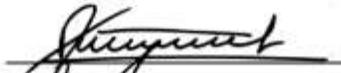
2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 21 DE OCTUBRE DE 2020
Hora: 16:00
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Título de la Tesis: "MODELO DE DOS RAYOS MODIFICADO APLICADO EN PROBLEMAS DE RADIO PROPAGACIÓN: EFECTOS DIFRACTIVOS POR PERFILES DE TERRENO."
Jurados: IE, MSc ÁNGELO JOSEPH SOTO VERGEL
IE, MSc EDWIN JOSÉ VERA ROZO
Director: IE, PhD DINAEL GUEVARA IBARRA
Codirector: IE, MSc DIEGO ANDRÉS PARADA ROZO

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
RONALD STIVEN DAZA DAZA	1161145	CUATRO, SIETE (4,7)

MERITORIA


ÁNGELO JOSEPH SOTO VERGEL


EDWIN JOSÉ VERA ROZO


DINAEL GUEVARA IBARRA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Electrónica



Vigilancia Mineducación



**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 LEMUS
Ciudad

Cordial saludo:

Yo, Ronald Stiven Daza Daza, identificado con la C.C. N° 1090504456, autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado Modelo de dos rayos modificado aplicado en problemas de radio propagación: efectos difractivos por perfiles de terreno y aprobado en el año 2020 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.

Ronald Daza

Ronald Stiven Daza Daza
C.C. 1090504456 de Cúcuta

Dedicatoria

Dedicado principalmente a Dios por la vida y sus bendiciones.

A mis padres, Héctor Daza y Olga Daza que desde niño me inculcaron valores y con mucho esfuerzo y sacrificio permiten que siga cumpliendo mis sueños.

A mis hermanos Angie daza y Kevin Daza por su compañía y por todas las sonrisas compartidas.

A mi abuelita, mis tías y toda mi familia que me han ayudado a comprender el verdadero significado de amor y siempre vieron de mi todo lo mejor como estudiante.

A mi novia Karen Triana por el apoyo incondicional y la motivación que necesito para seguir cumpliendo mis sueños.

Agradecimientos

Al mi director el Doctor Dinael Guevara Ibarra por su confianza y apoyo en esta investigación.

A mi codirector el Mag. Diego Andrés Parada Rozo por su gran orientación en este proyecto.

*A mi compañero y amigo Roger Badillo, quien durante toda la carrera fue un apoyo y una guía
para mí.*

*A todos mis amigos y compañeros de la carrera donde me enseñaron a compartir los sueños y a
no rendirme hasta cumplirlos.*

*A todos los docentes y administrativos de la Universidad Francisco de Paula Santander por sus
consejos en mi camino académico.*

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Descripción del Problema	16
1.1. Planteamiento del problema	16
1.2. Pregunta del problema	17
1.3. Justificación	17
1.3.1. Impacto esperado	18
1.3.2. Beneficios tecnológicos	18
1.3.3. Beneficios institucionales y académicos	19
1.4. Alcance	19
1.5. Limitaciones	20
1.6. Delimitaciones	20
1.7. Objetivos	20
1.6.1. Objetivo General.	20
1.6.2. Objetivos Específicos.	21
2. Marco referencial	22
2.1. Antecedentes y estado del arte	22
2.2. Marco Teórico	23
2.2.1. Modelos de propagación	23
2.2.2. Óptica geométrica	24

2.2.3.	Reflexión	24
2.2.4.	Refracción	25
2.2.5.	Difracción	26
2.2.6.	Dispersión	27
2.2.7.	Polarización de onda	27
2.2.8.	Polarización paralela	28
2.2.9.	Polarización perpendicular	29
2.2.10.	Propagación troposférica	30
2.2.11.	Modelo de dos rayos	32
2.2.12.	UTD	33
2.3.	Marco legal	34
3.	Diseño metodológico	35
3.1.	Revisión bibliográfica	35
3.2.	Formulación del modelo	35
3.3.	Selección del perfil del terreno	35
3.4.	Implementación y simulación computacional	36
3.5.	Comparación de resultados	36
3.6.	Divulgación de resultados	36
4.	Resultados	37
4.1.	Revisión de las referencias	37
4.2.	Formulación del modelo matemático del trazado de rayos	38

4.2.1.	Lanzamiento del rayo directo	40
4.2.2	Lanzamiento de rayo incidente y rayo reflejado	41
4.2.3	Coefficientes de la teoría uniforme de la difracción	43
4.3	Escenario de estudio	45
4.4	Implementación y simulación computacional de los algoritmos matemáticos	49
4.4.1	Tierra plana	49
4.4.2	Superficie inclinada	50
4.4.3	Región de difracción	51
4.4.4	Segunda región de tierra plana	52
4.4.5	Modelo de dos rayos modificado con UTD	54
4.5	Comparación de los resultados	56
4.6	Verificación estadística	59
4.7	Divulgación de los resultados	60
	Conclusiones	61
	Referencias	62
	Anexos	64

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de simulación.	45
Tabla 2. Descripción de medidas del escenario de estudio.	46
Tabla 3. EAM para diferentes alturas de cuña	59

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ley de la reflexión. Tomado de [12].	25
Figura 2. Refracción de rayos. Tomado de [12]	26
Figura 3. Ejemplo de difracción.	27
Figura 4. Esquema de polarización paralela. Tomado de [15].	28
Figura 5. Esquema de polarización perpendicular. Tomado de [15].	29
Figura 6. Efecto del gradiente de refractividad en ondas electromagnéticas. Tomado de [4].	31
Figura 7. Modelo de dos rayos. Tomado de [17].	32
Figura 8. Cálculo de rayo directo	40
Figura 9. Cálculo de rayo incidente y rayo reflejado.	41
Figura 10. Geometría y variables de difracción en cuña. Tomada de [7].	43
Figura 11. Medidas sobre el perfil del terreno de investigación.	47
Figura 12. Directividad de dipolo infinitesimal	47
Figura 13. Campo eléctrico de un dipolo infinitesimal en coordenada Theta	48
Figura 14. Campo eléctrico en coordenada Z de un dipolo infinitesimal	48
Figura 15. Conformación de los rayos en la región plana del escenario	50
Figura 16. Perfil horizontal del modelo de dos rayos en superficie inclinada	51
Figura 17. Difracción en cuña perfectamente conductora.	52
Figura 18. Trazado de Rayos en tierra plana	53
Figura 19. Conformación de los rayos en escenario con cuña de 20m	54
Figura 20. Modelo de dos rayos modificado en cuña de 60m	55
Figura 21. Modelo de dos rayos modificado en cuña de 100m	56
Figura 22 Perfiles horizontales de pérdidas de camino para cuñas de: (a) 20m, (b) 60m y (c) 100m	57
Figura 23. Perfiles verticales de pérdidas de camino para cuñas de:(a)20m, (b) 60m y (c) 100m	58

Anexos

	Pág.
Anexo A. Correo de aceptación del artículo en IMOC 2019.	64

Introducción

La creciente demanda de tecnologías de comunicación más eficientes en cobertura y calidad de servicio, han llevado a la necesidad de desarrollar modelos de caracterización de canal más precisos y eficientes [1] específicamente en la investigación actual sobre aplicaciones 5G. La identificación adecuada de los factores que afectan la propagación de las ondas, como las variaciones atmosféricas, la caracterización electromagnética de las superficies y los factores de los escenarios (como perfiles de terreno, obstáculos, etc.), constituyen grandes dificultades en la consolidación del modelo [2].

En este documento se verifica la aplicación y precisión de un modelo de radiopropagación basado en óptica geométrica (GO) denominado trazado de rayos, teniendo como referencia el modelo SSPE(Split Step Parabolic Equation) [3]. La elección de los dos métodos consistió en que ambos se usaran comúnmente en un problema de propagación que involucrara la refracción en la atmósfera inferior y el terreno irregular[4]. En el enfoque GO, se considera que el transmisor emite una gran cantidad de rayos en diferentes ángulos, por lo que la onda electromagnética está representada por rayos perpendiculares al frente de onda, por tanto, es posible conocer la trayectoria y ajustar la distancia y la fase punto a punto. El problema es entonces analizar los rayos que alcanzan un plano investigado. El método de ecuación parabólica (PE), a su vez, analiza la radiopropagación, por medio de una solución numérica eminentemente rápida, en comparación con otras técnicas numéricas. Este método consiste en determinar un perfil de campo vertical, calculado paso a paso y resuelto aplicando el algoritmo de paso dividido mediante transformada rápida de Fourier, denominado SSFT por sus siglas en inglés[5]. En la formulación UTD, la técnica de trazado de rayos consiste en un enfoque determinista y presenta un análisis satisfactorio de la

propagación por trayectos múltiples, sin embargo, los coeficientes de difracción y las definiciones angulares pueden ser complejas de definir. Por lo general, la determinación de los coeficientes depende de la geometría de la cuña y de las posiciones del transmisor y el receptor [6] [7].

Este trabajo contribuye con un modelo modificado de dos rayos que, además de considerar los efectos refractivos de la atmósfera estándar, también evalúa los efectos de difracción, para estimar la cobertura radioeléctrica. El ángulo de lanzamiento del rayo depende de la ubicación del punto receptor, por lo que la formulación asegura la llegada de un rayo de línea directa y un rayo reflejado en un punto receptor específico. Por lo tanto, para cada rayo reflejado se calcula el ángulo de lanzamiento correspondiente, satisfaciendo la ley de Snell [1].

La precisión del algoritmo de trazado de rayos modificado se probó en una cuña conductora eléctrica perfecta. En este estudio los resultados se confrontaron con la solución numérica SSPE, que se implementó en trabajos anteriores desarrollados en el Grupo de Antenas, Propagación y Teoría Electromagnética (GAPTEM) de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG).

Este documento se encuentra dividido en cuatro capítulos, el primer capítulo plantea la problemática a investigar, presentando los objetivos, la justificación, los alcances y delimitaciones del proyecto. En el segundo capítulo se encuentra el marco referencial con el conjunto de conceptos referentes a la propagación de ondas de radio. El tercer capítulo se conforma del diseño metodológico llevado a cabo para cumplir con los objetivos de la investigación y el cuarto capítulo describe los resultados obtenidos en la comparación de ambos modelos de radiopropagación.

1. Descripción del Problema

En esta sección se presenta la descripción del problema y pregunta de investigación, así como también el alcance, la justificación, las limitaciones y la delimitación del proyecto.

1.1. Planteamiento del problema

La globalización trae consigo un proceso tecnológico a nivel mundial y por tanto un crecimiento de gran magnitud en las telecomunicaciones. La necesidad de realizar estas últimas de manera instantánea ha obligado a ingenieros a diseñar, evaluar y comprobar diferentes modelos que evalúen el comportamiento de las ondas de radiofrecuencia para el diseño de sistemas de comunicación.

La consolidación de un modelo de propagación que evalúe de manera fiel y correcta el comportamiento de la propagación de la onda se dificulta al tener en cuenta factores del medio como las variaciones atmosféricas, la caracterización electromagnética de la superficie y elementos de los escenarios como el perfil del terreno u obstáculos[1]. Un modelo completo de propagación electromagnética, basado tanto en abordajes analíticos o en algoritmos numéricos, demanda un proceso costoso desde la perspectiva de gasto computacional y tiempo de simulación.

El modelo de propagación de dos rayos es un método determinístico de reflexión terrestre basado en óptica geométrica y considera la transmisión directa y una componente de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor [2]. El método basado en GO solo considera los rayos directos, reflejados y transmitidos, sin embargo es común encontrar escenarios con perfiles irregulares de terreno con ciertos obstáculos o cuñas, en esta situación se genera dispersión o difracción de la onda propagada, y por lo tanto es necesario el aporte de la UTD (Teoría

Uniforme de la Difracción) que junto con la GO permite incluir el efecto de los rayos difractados en el modelo de dos rayos [9].

Por lo tanto, la propuesta del presente trabajo es encontrar un modelo de propagación que utilice los principios de GO y de la UTD que sea preciso y computacionalmente viable para resolver problemas de propagación en condiciones más realísticas.

1.2. Pregunta del problema

¿Es la propuesta de un Modelo de Dos Rayos Modificado junto con UTD, un abordaje capaz de garantizar resultados precisos en el modelado de propagación electromagnética para el caso de escenarios con cuñas y con variación de refractividad atmosférica?

1.3. Justificación

La predicción y el modelo de los canales de radiocomunicación surgen de la necesidad de modelar un área geográfica para predecir la potencia con la que llegan a cierto punto la ondas de radiofrecuencia; no obstante son una de las partes más complicadas en el diseño de sistemas de comunicación, puesto que fenómenos ondulatorios como la reflexión, la difracción y la refracción atmosférica son factores importantes en estas predicciones pero que su definición dentro del modelo es complicada de obtener.

Algoritmos numéricos como FDTD (Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo), FEM (Método de Elementos Finitos) y MoM (Método de los momentos)[2] para resolver ecuaciones integrales demandan un alto costo computacional para procesar resultados, aunque también existen

soluciones numéricas más rápidas, como las utilizadas para resolver modelos (PE), que pueden no ser tan precisas en ciertas condiciones críticas de radiopropagación. Por las razones anteriores, un nuevo modelo que obtenga una buena predicción de la propagación de ondas de radiofrecuencias con un bajo costo de recursos como tiempo y procesamiento, genera una propuesta de investigación.

Este trabajo contribuye con un modelo de dos rayos modificado que, además de considerar los efectos refractivos de la atmósfera estándar, también evalúa los efectos de difracción, para estimar la cobertura radioeléctrica. Un aspecto para resaltar dentro del modelo propuesto es que el ángulo de lanzamiento del rayo depende de la ubicación del punto del receptor, por lo que la formulación garantiza la llegada de un rayo en línea directa y un rayo reflejado en un punto del receptor.

1.3.1. Impacto esperado

El presente proyecto pretende conseguir un modelo de propagación de ondas de radiofrecuencia que tenga respuesta rápida, garantizando resultados precisos para el problema de predicción de cobertura en cierto escenario canónico utilizando el método determinístico de trazado de dos rayos teniendo en cuenta métodos asintóticos.

1.3.2. Beneficios tecnológicos

- La solidificación de un modelo de propagación que evalúe de manera confiable y precisa el comportamiento de ondas de radiofrecuencias considerando los efectos atmosféricos a un bajo costo de procesamiento computacional y tiempo.

- La simulación en el software Matlab del modelo de dos rayos modificado en un escenario canónico que será de base para el desarrollo de futuras investigación en condiciones más robustas.

1.3.3. Beneficios institucionales y académicos

- El desarrollo de proyectos de investigación por parte de los estudiantes realizando publicaciones sobre éstos mismos a nivel nacional e internacional dará reconocimiento de educación de alta calidad y compromiso institucional a la universidad y al programa de ingeniería electrónica.
- Trabajar en el área investigativa permitirá que los estudiantes ayuden a suplir las necesidades tecnológicas y científicas de la región posibilitando acceder a futuros estudios de postgrados en el área de las telecomunicaciones.

1.4. Alcance

El proyecto se clasifica como investigación aplicada, debido a que está orientado a la aplicación de conocimientos sobre ondas electromagnéticas para el estudio del modelado de dos rayos modificado en un medio conductor con atmosfera estándar.

El proyecto tendrá como alcance la verificación del modelo de trazado de rayos modificado que considerará los efectos refractivos de una atmosfera estándar y estudiará el comportamiento de los rayos difractados por una cuña conductora perfecta por medio de una simulación en el software especializado Matlab y se realizará un estudio comparativo con los resultados obtenidos por la solución numérica dada por el método SSPE.

1.5. Limitaciones

La evaluación del modelo de dos rayos modificado se realizará por medio de un algoritmo en la herramienta computacional Matlab por lo tanto se limitará en la licencia que se posea del software y las características hardware del equipo.

Además, los resultados obtenidos serán comparados con la solución numérica SSPE que se aportó por parte del Grupo de Antenas, Propagación y Teoría Electromagnética (GAPTEM) de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) en trabajos desarrollados anteriormente por lo que se limitará a la cantidad de información suministrada.

1.6. Delimitaciones

El proyecto investigativo se llevó a cabo en la universidad Francisco de Paula Santander dentro del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones (GIDET) que basado en estudios realizados allí y conocimientos sobre modelos de propagación y trazado de rayos, fundamentado en GO y UTD, realizó la investigación del estudio de dispersión por una cuña conductora perfecta considerando fenómenos ondulatorios en una atmosfera estándar.

1.7. Objetivos

Los objetivos que orientan la realización de la presente investigación son establecidos:

1.6.1 Objetivo General.

Evaluar la aplicabilidad de un modelo de dos rayos modificado en ambientes de propagación que considere perfiles de terrenos y efectos refractivos de una atmosfera estándar.

1.6.2 Objetivos Específicos.

- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con la aplicación de óptica geométrica y UTD en problemas de radiopropagación.
- Deducir un modelo de dos rayos que incluya el efecto de variación de refractividad atmosférica.
- Incorporar en el modelo de propagación los efectos difractivos usando UTD.
- Definir los casos canónicos para aplicar y evaluar el modelo de rayos modificado.
- Implementar computacionalmente el modelo de dos rayos modificado y la UTD.
- Comparar los resultados obtenidos de la implementación del modelo de dos rayos modificado con los resultados del algoritmo numérico SSPE.
- Divulgar los resultados obtenidos del proyecto de investigación.

2. Marco referencial

Se requiere de fundamentación teórica para disponer de un punto de partida sobre los modelos de propagación con el método del trazado de dos rayos, por lo tanto, se realiza una revisión de la literatura relacionada. A continuación, se presentan antecedentes, un marco teórico y marco legal.

2.1. Antecedentes y estado del arte

Se han realizado investigaciones sobre los modelos de propagación y los efectos atmosféricos. Uno de ellos es el artículo “Una comparación entre un modelo de dos rayos modificado con efectos atmosféricos y el método SSPE para un estudio de caso de propagación EM” el cual muestra una comparación del modelo de dos rayos modificado que incluye los efectos refractivos de la atmosfera contra el método SSPE, evaluando los modelos en un terreno plano perfectamente conductor y condiciones atmosféricas estándar. Los resultados que se obtuvieron demostraron que el modelo de dos rayos modificado puede incluir favorablemente los fenómenos atmosféricos[1].

Otro artículo importante es “Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil” donde se realiza una comparación entre los modelos más comúnmente empleados, los cuales son el de *Espacio Libre*, Okumura-Hata y el de *Dos rayos* para analizar la predicción de la pérdida de propagación de una señal de 893 MHz proveniente de una estación base de telefónico celular en el estado Falcon, Venezuela. La investigación muestra que el mayor error promedio en la predicción de pérdida de potencia lo presentan los modelos de Okumaura-Hata y el de dos rayos en comparación al del espacio libre. También se pudo concluir que el modelo de espacio libre y el de dos rayos predicen por defecto la pérdida de propagación en comparación con la información real, mientras que el de Okumura-hata lo hace exageradamente[8].

2.2. Marco Teórico

Esta sección se conforma de varios conceptos y consideraciones relevantes, originando una fundamentación sobre la principal temática en la cual el proyecto es enfocado.

2.2.1. Modelos de propagación

El camino que siguen las ondas de radiofrecuencias desde el receptor hasta el transmisor se percibe como una línea con una trayectoria directa, sin embargo, esto no ocurre así, el rayo transmitido muchas veces se ve afectado por fenómenos ondulatorios como la reflexión, la refracción y la difracción debido a obstáculos o características del terreno como montañas, árboles o edificios que se encuentra en medio de estos transmisores. Por tal razón el modelado de los sistemas de radiocomunicación inalámbrica son una de las partes más complicadas e importantes que intervienen en el diseño de sistemas de comunicación puesto que nos permite determinar la cobertura de la señal, la viabilidad de los proyectos que se desean implementar incluso las características de potencia y costos para cada elemento que conforman estos sistemas de comunicación.

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio en un ambiente dado. Por lo general estos modelos se puede clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos y la combinación de estos dos llamados semi-empíricos [10].

Los modelos empíricos se basan en mediciones realizadas sobre la potencia disipada en el área de trabajo y posteriormente el modelado de los resultados obtenidos. Desde el punto de vista teórico o determinístico, se puede enfrentar el estudio de las ondas por medio de las ecuaciones de maxwell aplicando las condiciones de frontera, como también por el método de la óptica

geométrica que consiste en reemplazar la onda por un rayo, de esta manera las ecuaciones de maxwell se reemplazan por definiciones más sencillas; es denominada la teoría del rayo óptico.[11]

2.2.2. Óptica geométrica

La óptica geométrica (GO) es un método aproximado aplicable a altas frecuencias, que parte del supuesto de que la luz se desplaza en una dirección fija y en línea recta cuando pasa por un medio no uniforme, y cambia su dirección en el momento en que se encuentra con la superficie de un medio diferente donde las propiedades ópticas del medio no son uniformes[12]. El comportamiento de los campos electromagnéticos se abarca desde un punto de vista de una teoría de rayos, que incluye la reflexión en superficies y la ley de Snell para la refracción de un rayo cuando cruza las fronteras entre dos medios. Con la GO se pueden determinar las contribuciones correspondientes al campo procedentes de la onda incidente, reflejada y refractadas de una forma más sencilla que si se aplicase un análisis con las ecuaciones de maxwell. [9]

2.2.3. Reflexión

La reflexión ocurre cuando la onda electromagnética incide sobre un objeto cuyas dimensiones son mucho más grandes que su longitud de onda. La ley de reflexión establece que el ángulo θ_1 que forma el rayo incidente con la normal al medio, es igual al ángulo que se forma entre el rayo reflejado y la normal, es decir $\theta_1 = \theta_1'$ (figura 1). En las telecomunicaciones, las reflexiones en la tierra, montañas, edificios y demás obstáculos producen ondas reflejadas que se sumaran constructiva o destructivamente en el receptor [13].

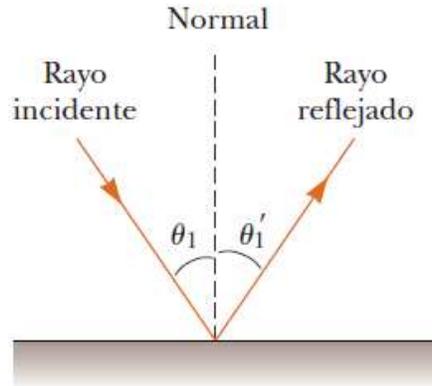


Figura 1. Ley de la reflexión. Tomado de [12].

2.2.4. Refracción

La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar la frontera de otro medio material. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación y si estos tienen índices de refracción distintos. El índice de refracción es un numero sin dimensiones que relaciona la velocidad de la luz en el vacío con la velocidad de la luz en el medio y está dado por:

$$n = \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en un medio}} = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Como se observa en la figura 2, un rayo incidente genera un rayo reflejado y otro rayo que atraviesa el medio cambiando su dirección, llamado rayo refractado[12]. Esto es debido al cambio de velocidad de propagación de la onda cuando atraviesa un medio con características diferentes.

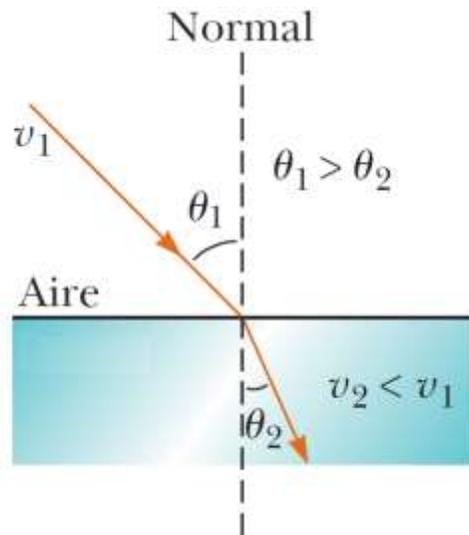


Figura 2. Refracción de rayos. Tomado de [12]

La refracción de las ondas es un fenómeno común y se puede representar bajo un modelo matemático llamado la ley de refracción de Snell [12]. Esta ecuación está descrita por:

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2 \quad (2)$$

Donde n_1 corresponde al índice de refracción del medio donde se encuentra el rayo incidente y n_2 el medio del rayo refractado, θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y refracción respectivamente.

2.2.5. Difracción

Se entiende a la difracción como el esparcimiento de las ondas en los límites o bordes de una superficie permitiendo así, que las ondas lleguen a zonas obstruidas por el perfil del terreno[13].

La figura 3 muestra como la onda se difracta y genera una nueva fuente de esta señal llegando a las secciones obstruidas.

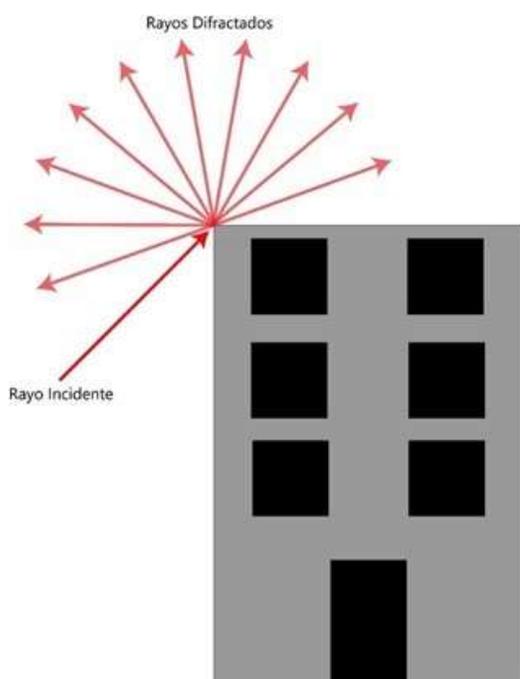


Figura 3. Ejemplo de difracción.

2.2.6. Dispersión

El efecto de dispersión ocurre cuando las ondas de radio atraviesan algún objeto cuyo tamaño es grande comparado a la longitud de la onda incidente y el número de obstáculos es significativamente superior y debido a su naturaleza aleatoria es muy difícil su predicción. Muy comúnmente este fenómeno se le relaciona con la lluvia puesto que, si el diámetro de la gota de lluvia es mayor a la longitud de onda, la atenuación aumentará.

2.2.7. Polarización de onda

Cuando una onda electromagnética procedente de un medio se encuentra con otro diferente, sucede lo anteriormente nombrado, será parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, las proporciones de la onda incidente por ser reflejada y por ser transmitida depende del ángulo que

forma con la normal a la superficie y las propiedades eléctricas como la permeabilidad de los medios implicados [14]. Existen dos tipos de polarización, una con su campo eléctrico paralelo al plano de incidencia, llamada polarización paralela y otra con el campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia, denominada polarización perpendicular[15].

2.2.8. Polarización paralela

En esta polarización el campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia y el campo magnético asociado es perpendicular al plano. En la figura se observan las disposiciones de los campos relacionadas a la onda incidente, reflejada y transmitida.

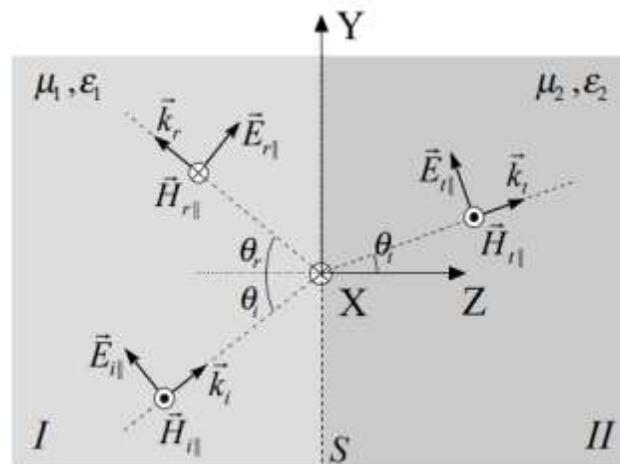


Figura 4. Esquema de polarización paralela. Tomado de [15].

Las expresiones para los *coeficientes de reflexión* Γ y *transmisión* τ se muestran en las ecuaciones (3) y (4) respectivamente.

$$\Gamma_{||} = \frac{\eta_2 \cdot \cos\theta_t - \eta_1 \cdot \cos\theta_i}{\eta_2 \cdot \cos\theta_t + \eta_1 \cdot \cos\theta_i} \quad (3)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{2\eta_2 \cdot \cos\theta_i}{\eta_2 \cdot \cos\theta_t + \eta_1 \cdot \cos\theta_i} \quad (4)$$

Donde η_1 y η_2 son las impedancias intrínsecas de cada medio, y θ_i y θ_t los ángulos de incidencia y transmisión formados con la normal a la frontera.

2.2.9. Polarización perpendicular

La polarización el campo eléctrico es perpendicular al plano XY como se observa en la figura 5 y el campo magnético de la onda es paralelo a este mismo.

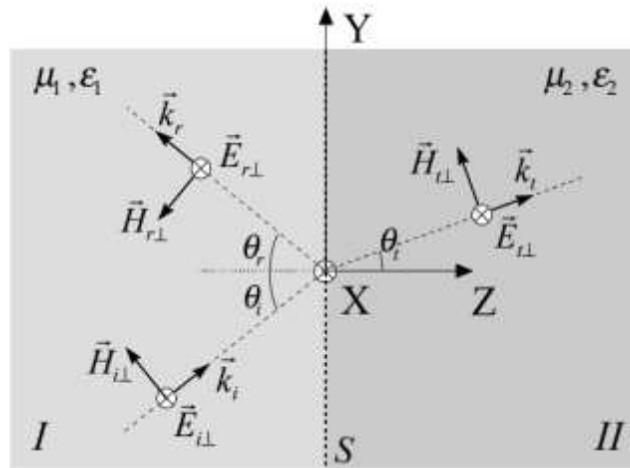


Figura 5. Esquema de polarización perpendicular. Tomado de [15].

Las expresiones para los *coeficientes de reflexión* Γ y *transmisión* τ para la incidencia se muestran en las ecuaciones (5) y (6)

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\eta_2 \cdot \cos\theta_i - \eta_1 \cdot \cos\theta_t}{\eta_2 \cdot \cos\theta_i + \eta_1 \cdot \cos\theta_t} \quad (5)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{2\eta_2 \cdot \cos\theta_i}{\eta_2 \cdot \cos\theta_i + \eta_1 \cdot \cos\theta_t} \quad (6)$$

2.2.10. Propagación troposférica

La propagación troposférica es un modo de comunicación que ocurre en la capa de la atmosfera que está en contacto con la tierra, tiene un espesor de 17 km en el Ecuador terrestre y solo 8 km en los polos, aquí se forman las nubes y la temperatura cambia constantemente. La troposfera se caracteriza por ser un medio estratificado mayormente horizontal debido a que el índice de refracción depende de factores como la temperatura absoluta, la presión atmosférica y la presión parcial de vapor de agua, los cuales varían en relación a la altura de la atmosfera[16]. Las propiedades refractivas del aire se pueden expresar en términos del índice de refracción n o la refractividad N , donde:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (7)$$

El índice de refracción del aire en la superficie de la tierra es aproximadamente 1,003. La atmósfera estándar se expresa como una disminución lineal del índice de refracción a baja altitud, y el promedio a largo plazo del gradiente del índice de refracción es igual a $-40 N/Km$, por tal razón las ondas de radio se desvían como consecuencia de un índice de refracción no constante[4]. El efecto del gradiente de refractividad se puede expresar usando el radio de la curvatura del rayo que representa la onda electromagnética. Este radio de curvatura ρ puede aproximarse mediante[4]:

$$\rho = -\frac{1}{dn/dz} \quad (8)$$

El radio de curvatura de la tierra es $\rho_t = 6378 \text{ km}$. El radio de la curvatura del rayo bajo un gradiente estándar es mucho mayor que el radio de curvatura de la tierra, pero ambos radios son iguales cuando $dN/dz = -157 \text{ N/Km}$ permitiendo la propagación transhorizonte de la onda[4]. Por consiguiente, una nueva definición de índice de refracción m modificado y refracción modificada M se presenta en:

$$M = N + 157z, \quad M = (m - 1) \cdot 10^6 \quad (9)$$

Los efectos de varios gradientes de refractividad se pueden ver en la figura 2, donde se muestra que para gradientes de refractividad positivos los rayos se curvan hacia arriba y para gradientes de refractividad estándar los rayos se doblan hacia abajo. Los gradientes de menos de -157 N/km producen conductos donde la curvatura de los rayos excede la curvatura de la tierra y la onda viaja a una distancia muy larga detrás del horizonte de radio[4].

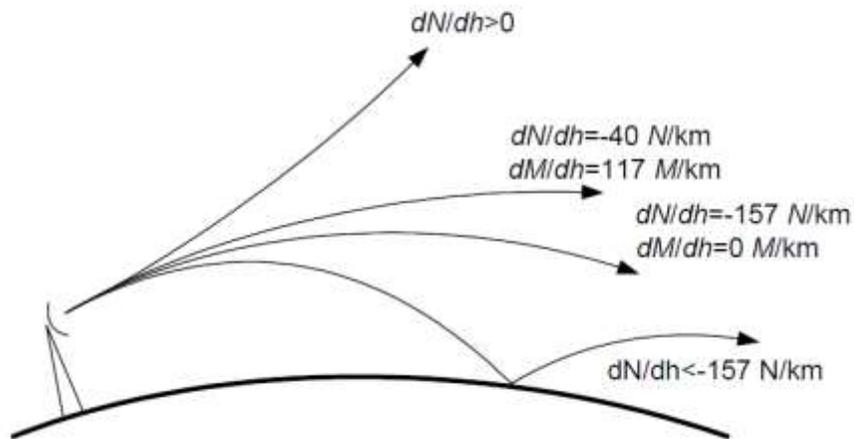


Figura 6. Efecto del gradiente de refractividad en ondas electromagnéticas. Tomado de [4].

2.2.11. Modelo de dos rayos

En canales de radio, un único camino directo entre la estación transmisora y la receptora rara vez es el único medio físico para la transmisión. El modelo de reflexión terrestre de dos rayos que se encuentra en la figura 7 es un modelo de propagación útil que se basa en la óptica geométrica y considera tanto la ruta directa como la ruta reflejada por la tierra. Se ha conocido que este modelo es razonablemente preciso para predecir la intensidad de la señal a gran escala en distancias de unos varios kilómetros para sistemas de comunicaciones inalámbricas con torres altas que no superen los 50 metro de altura, así como también para canales de línea de visión en zonas urbanas. [17]

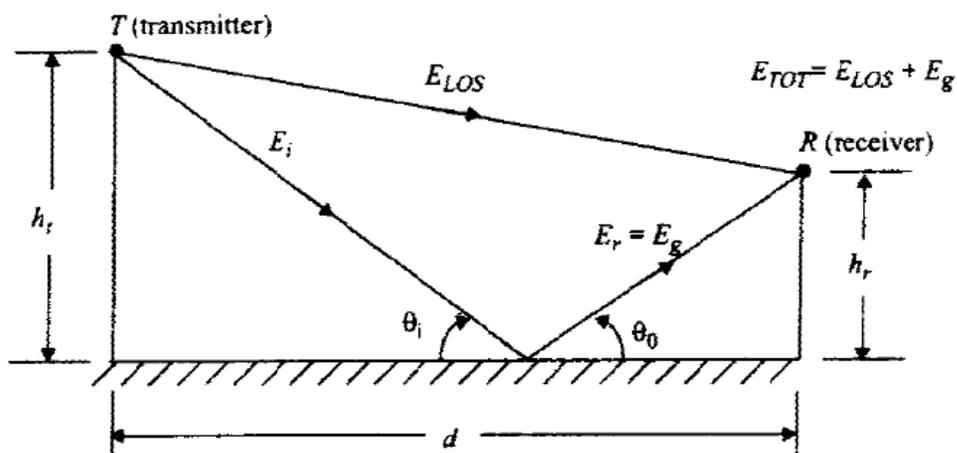


Figura 7. Modelo de dos rayos. Tomado de [17].

En muchos sistemas de comunicación móvil, la máxima separación de las bases transmisoras y receptoras es de apenas unos cuantos kilómetros, por lo tanto, la superficie de la tierra puede

considerarse plana. El campo eléctrico total recibido, E_{TOT} , es entonces el resultado de la componente directa de visión E_{LOS} y la componente reflejada E_g . [17]

Basados en la figura 7, h_t es la altura del transmisor y h_r la altura del receptor y d la distancia entre las antenas. De acuerdo a la ley de reflexión de Snell donde $\theta_i = \theta_o$ y $E_g = \Gamma E_i$ donde Γ es el coeficiente de reflexión de la superficie. [17]

Para el modelo de dos rayos modificados la onda que llega al receptor está dada por la ecuación (10). Donde E_o es el campo eléctrico en el espacio libre en v/m y D_o es la distancia de referencia menor a D . [17]

$$E_{TOT}(d) = \frac{2 E_o D_o 2\pi h_t h_r}{\lambda d^2} \quad (10)$$

La potencia recibida para el modelo de dos rayos se puede expresar en decibeles como (11)[8]:

$$P(dB) = 40 \log(d) - [(10 \log(G_t) + 10 \log(G_r) + 20 \log(h_t) + 20 \log(h_r))] \quad (11)$$

El modelo de dos rayos se enfrenta con los fenómenos ondulatorios como la reflexión, la difracción, la refracción atmosférica y la dispersión. Es por tal razón que la óptica geométrica contempla la reflexión de la onda y la teoría uniforme de la difracción tiene en cuenta la difracción de los obstáculos y la dispersión causada por lluvias para que no afecten los modelos de propagación que se estudian a altas frecuencias [17].

2.2.12. UTD

La teoría uniforme de la difracción (UTD o Uniform Theory of Diffraction) es una extensión de la GO para predecir el campo en regiones de sombra causada por un obstáculo o una cuña. En la teoría de los rayos el cual 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 la difracción múltiple y reflexiones. Por lo tanto, los métodos numéricos utilizados para estimar los campos electromagnéticos deben ser sólidos y precisos para todo tipo de condiciones. La 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[6].

2.3. Marco legal

En esta sección se enuncian los aspectos legales a tener en consideración en el desarrollo del proyecto de investigación

En la RESOLUCIÓN 181 DE 2019 de la agencia nacional del espectro (ANE), se establece el uso de espectro electromagnético, más específicamente en el título II establecimiento de planes de banda para los servicios de radiocomunicación móvil y fijo en los rangos de frecuencias HF, VHF y UHF. Donde se habla de los requerimientos necesarios para trabajar en estas bandas.(https://normograma.mintic.gov.co/mintic/docs/resolucion_ane_0181_2019.htm) [18]

El software requerido para desarrollar la implementación es Matlab y para utilizarlo se necesita la licencia de uso académico proporcionada por Mathworks, en La Ley 44 de 1993 (<http://www.derechodeautor.gov.co/documents/10181/182597/44.pdf/7875d74e-b3ef-4a8a-8661->

704823b871b5)se dictan sanciones disciplinarias para entidades que hagan uso indebido de software licenciado, como piratería de software. [19]

3. Diseño metodológico

Para el desarrollo de los objetivos, se han planteado los siguientes procedimientos:

3.1. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica relacionada con el modelo de propagación del trazado de dos rayos predominando principalmente documentos referentes al desarrollo de este modelo con la inclusión de fenómenos ondulatorios y geometrías de los escenarios.

3.2. Formulación del modelo

Después del planteamiento de las bases teóricas se modificó el método del trazado de rayos complementándolo con la inclusión de UTD que considera los fenómenos de la reflexión y difracción de las ondas que implican pérdidas de la cobertura radioeléctrica por interferencias en la superficie o condiciones del medio.

3.3. Selección del perfil del terreno

Al obtener información referente al desarrollo del tema, se establecieron las condiciones del escenario a estudiar como la forma de la cuña, la altura de las antenas de transmisión y todos los demás parámetros posibles que pudieran incluir los fenómenos ondulatorios estudiados en esta investigación.

3.4. Implementación y simulación computacional

Después de precisar las condiciones del medio y la geometría de la cuña estudiada, se implementó computacionalmente en el software Matlab los códigos para la predicción de los rayos reflejados y difractados aplicando el método de trazado de dos rayos que considera los fenómenos anteriormente planteados para la cuña del escenario de estudio.

3.5. Comparación de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la simulación de los algoritmos matemáticos fueron verificados al comparar los resultados del método de dos rayos modificados con los obtenidos en el modelo de solución numérica SSPE, los cuales fueron proporcionados por parte del Grupo de Antenas, Propagación y Teoría Electromagnética (GAPTEM) de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) en trabajos desarrollados anteriormente. Estos resultados se analizaron en tres situaciones distintas al variar la altura de la cuña y evidenciando que la solución del método de dos rayos modificados es similar al SSPE.

3.6. Divulgación de resultados

Se divulgó los resultados obtenidos del proyecto de investigación por medio de un artículo científico del mismo y ponencias donde se explicó la metodología y las conclusiones del proyecto.

4. Resultados

Esta sección muestra el desarrollo de la metodología llevada a cabo para obtener los resultados de la investigación.

4.1. Revisión de las referencias

A continuación, se presentan todos los artículos y documentos importantes que favorecieron el desarrollo de los objetivos de la investigación.

El artículo “The Influence of Horizontally Variable Refractive Index Height Profile on Radio Horizon Range” de los autores Pavel Valtr y Pavel Pechac, demostró el efecto del cambio del gradiente de refractividad vertical a lo largo de un enlace de radio, extendiendo el horizonte hasta varios kilómetros dependiendo del valor del gradiente. Este artículo aporta una expresión matemática que define la trayectoria de un rayo doblado debido a una atmósfera estándar.

Del artículo “Variation of Radio Refractivity with Height above Ground” de los autores E. Valma, M. Tamosiunaite, S. Tamosiunas y otros, se obtiene la definición del índice de refracción, como también las ecuaciones del gradiente de refractividad junto con sus aproximaciones matemáticas y así modelar este efecto que complementa el modelo de dos rayos.

En el artículo “A Comparison Between a Modified Two-Ray Model with Atmospheric Effects and the SSPE Method for an EM Propagation Case Study” de los autores Diego Parada, Dinael Guevara, Cássio G. Rego, y otros, presenta la formulación de un modelo de dos rayos que incluye efectos refractivos de la atmosfera y propone una alternativa al cálculo del ángulo de lanzamiento que garantiza la llegada del rayo reflejado en un punto receptor específico.

El artículo “Analysis of Heuristic Uniform Theory of Diffraction Coefficients for Electromagnetic Scattering Prediction” de los autores Diego Tami, Andrés Navarro 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 y se genere múltiples rayos. 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. Formulación del modelo matemático del trazado de rayos

El análisis matemático del trazado de rayos presentado aquí se origina de la solución de la ecuación diferencial de rayos de luz. Considerando un campo armónico de alta frecuencia en un medio no homogéneo y suponiendo pequeñas variaciones del índice de refracción en comparación con la longitud de onda, se obtiene la ecuación que determina la trayectoria del rayo [12].

$$\frac{d}{dl} \left(n(\mathbf{r}) \frac{d\mathbf{r}}{dl} \right) = \nabla n(\mathbf{r}) \quad (12)$$

Donde l representa la longitud de arco del rayo y \mathbf{r} es la coordenada asociada a la trayectoria.

Este método analiza la incidencia y reflexión de rayos para obtener el campo en un punto, por lo tanto, es necesario expresar la trayectoria de los rayos teniendo en cuenta la refracción del medio. Asumiendo las dos dimensiones de propagación en coordenadas cartesianas cuando $n(z)$ es una función de la altura, se desarrolla la ecuación anterior como:

$$\frac{d}{dx} \left(n(z) \frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dx} n(z) + \frac{d}{dz} n(z) \quad (13)$$

Hasta aquí $n(z)$ es la relación del índice de refractividad dependiendo de altura en la atmosfera, representada por un valor del índice de refracción de la superficie n_o y el gradiente de la altura δ , x y z representan la distancia y la altura respectivamente.

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{d}{dz} n(z) \quad (14)$$

Sustituyendo el valor de $n(z)$ en la ecuación (3)

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{d}{dz} (n_o + \delta z) \quad (15)$$

Derivando el término de la derecha en (15) respecto a z resulta:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \delta \quad (16)$$

Como último paso se procede a integrar nuevamente la ecuación (16) resultando:

$$\frac{dz}{dx} = \delta x + K \quad (17)$$

$$z = \frac{\delta X^2}{2} + KX + Z_T \quad (18)$$

La ecuación final es la que se presenta en (18), concluyéndose que existe una dependencia con tres términos importantes, la trayectoria del rayo en la coordenada x , la altura del transmisor Z_T y en el ángulo de lanzamiento inicial K , donde $K = \tan(\alpha)$.

4.2.1. Lanzamiento del rayo directo

Como se habló anteriormente, el modelo de dos rayos considera la transmisión directa del rayo y la componente reflejada con el suelo entre las dos antenas, sin embargo, estos rayos no poseen un camino recto como lo describe la óptica geométrica, sino que, al incluir los efectos refractivos de la atmosfera, los rayos adquieren una trayectoria curvilínea como se muestra en la figura 4.

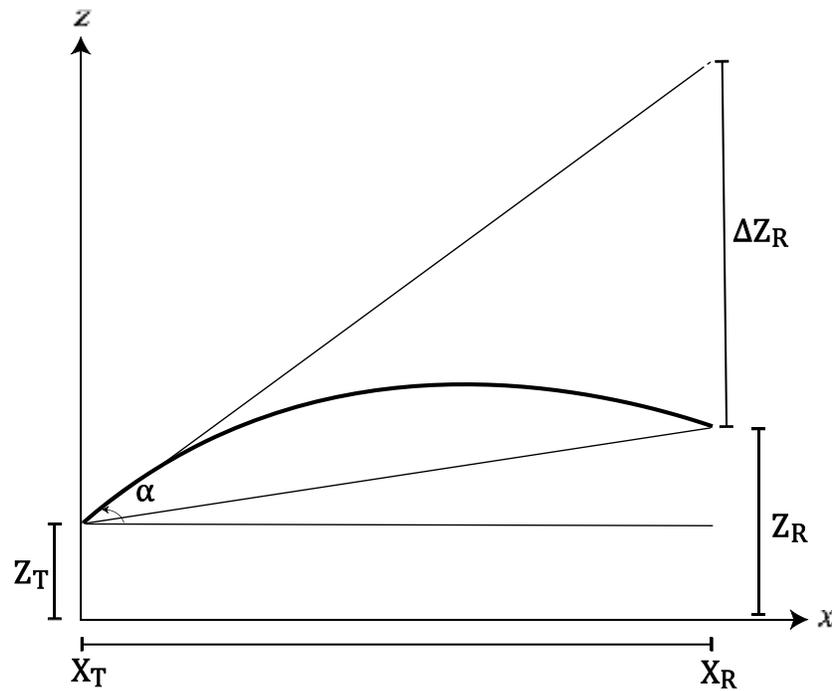


Figura 8. Cálculo de rayo directo

Para una distancia conocida entre el transmisor y el receptor R y para una altura conocida de transmisor Z_T y receptor Z_R , el ángulo de lanzamiento inicial α se puede obtener así:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z_R + Z_R - Z_T}{X} \right) \quad (19)$$

Donde

$$\Delta Z_R = \frac{\delta X_R^2}{2} \quad (20)$$

4.2.2 Lanzamiento de rayo incidente y rayo reflejado

Para la deducción del rayo incidente y el rayo reflejado se observa la figura 9.

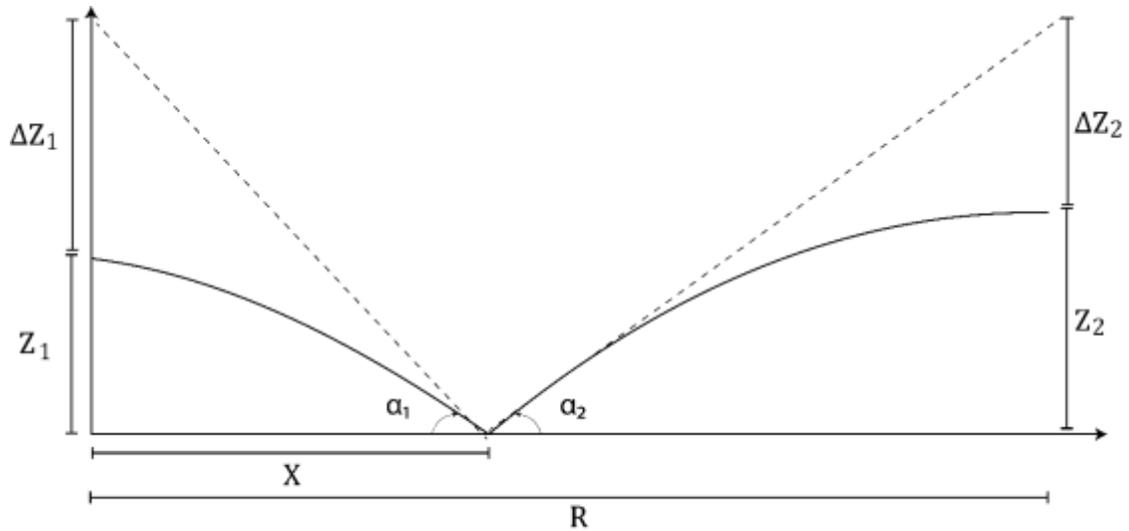


Figura 9. Cálculo de rayo incidente y rayo reflejado.

Partiendo de un principio de reciprocidad para calcular los rayos desde la distancia donde se refleja el rayo hasta la altura del transmisor y el receptor respectivamente, se pueden escribir los ángulos α_1 y α_2 de la siguiente manera:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z_1 + Z_1}{X} \right) \quad (21)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z_2 + Z_2}{R - X} \right) \quad (22)$$

Del mismo modo que en el rayo directo, Δhr_1 y Δhr_2 corresponden a lo que se presenta en las ecuaciones (23) y (24). El signo negativo se aplica debido al análisis reverso que se realiza para esta situación.

$$\Delta Z_1 = -\frac{\delta X^2}{2} \quad (23)$$

$$\Delta Z_2 = -\frac{\delta(R-X)^2}{2} \quad (24)$$

Reemplazando (23) y (24) en (21) y (22) se reescriben los ángulos α_1 y α_2 :

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-\delta X}{2} + \frac{Z_1}{X} \right) \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(-\frac{\delta(R-X)}{2} + \frac{Z_2}{R-X} \right) \quad (26)$$

Basados en la ley de Snell, donde los ángulos de reflexión son equivalentes, igualamos α_1 y α_2 :

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (27)$$

$$\left(\frac{-\delta X}{2} + \frac{Z_1}{X} \right) = \left(-\frac{\delta(R-X)}{2} + \frac{Z_2}{R-X} \right) \quad (28)$$

Resolviendo lo presentado, se obtiene la ecuación cubica expresada a continuación:

$$(\delta)X^3 - \left(\frac{3}{2} \delta R \right) X^2 + \left(\frac{\delta R^2}{2} - Z_2 - Z_1 \right) X + (RZ_1) = 0 \quad (29)$$

Aquí X es la distancia desde la antena transmisora hasta el punto de reflexión, donde la solución a esta ecuación de tercer grado está dada por una raíz $X=X_I$ mínima y real.

4.2.3 Coeficientes de la teoría uniforme de la difracción

La inclusión del fenómeno de la difracción al modelo de dos rayos modificado es posible por medio de la teoría uniforme de la difracción (UTD) junto con los coeficientes de Luebber's, los cuales introducen los coeficientes de reflexión de Fresnel, definiendo los ángulos de incidencia y reflexión de los rayos incidentes y difractados.[6]

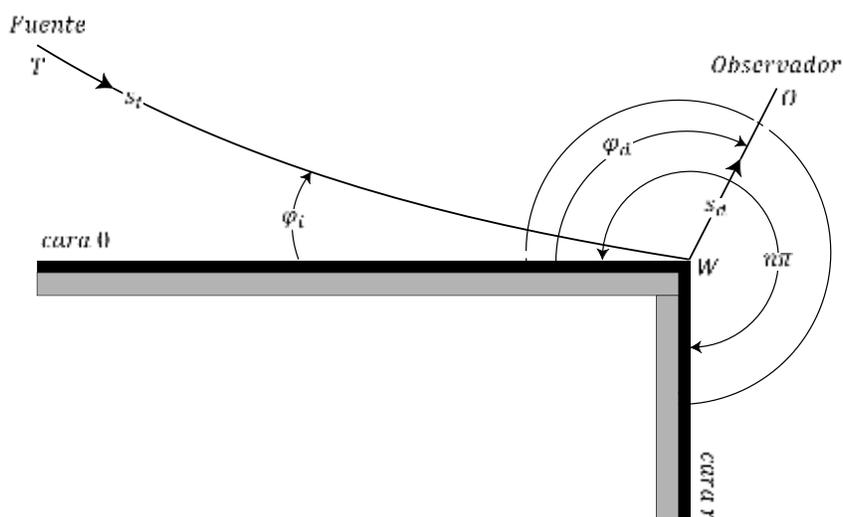


Figura 10. Geometría y variables de difracción en cuña. Tomada de [7].

Ahora consideremos el problema de la difracción en una cuña conductora de manera bidimensional, semi infinita con bordes rectos y con ángulo exterior $n\pi$, ver figura 10. En el sistema de coordenadas seleccionado, el borde recto está a lo largo del eje z , las caras planas están en $\varphi = 0$ y $\varphi = n\pi$, la fuente del rayo está en $\varphi = \varphi_i$ con distancia $\rho = s_i$ desde el borde de la cuña, y el punto de observación está en la coordenada (S_d, φ_d) . [6]

La solución de UTD para el campo eléctrico en un punto del observador es:

$$E_d(O) = E_i(W) \cdot \bar{D} A(s_d) e^{-jks_d} \quad (30)$$

Donde E_i es el campo eléctrico incidente en la cuña, $A(s_d)$ es el factor de amplitud que varía a lo largo del rayo, s_d es la distancia entre la cuña y el observador, y \bar{D} es el coeficiente de difracción diádico y tomando su notación clásica está dada por:

$$\bar{D}^{s,h} = G_0^{s,h} [D_2 + R_0^{s,h}(\alpha_0) D_4] + G_n^{s,h} [D_1 + R_n^{s,h}(\alpha_n) D_3] \quad (31)$$

Donde D_i , para $i = 1, \dots, 4$, son los coeficientes de difracción UTD, G_o y G_n , son factores de incidencia de pastoreo, R_o y R_n son los coeficientes de reflexión de Fresnel para las superficies 0 y n respectivamente.[6]

Finalmente, la definición de Luebber's para los ángulos α_0 y α_n , usando los coeficientes de Fresnel, es:

$$\alpha_0 = \phi_i \quad (32)$$

$$\alpha_n = n\pi - \phi_d$$

4.3 Escenario de estudio

El caso de estudio de radiopropagación planteado para la investigación que incluya factores del terreno y efectos atmosféricos, consta de una cuña perfectamente conductora centrada a 10km, una antena transmisora fija de 80m de altura y puntos de recepción a 10 de metros de altura a lo largo del terreno, de 100m a 20km.

En la tabla 1 se presentan las características que se consideraron en el perfil canónico. Estos parámetros son el gradiente de refractividad G , la conductividad de la superficie σ , la permitividad eléctrica relativa ϵ_r , la permeabilidad magnética μ_r y la frecuencia de operación f_o .

Tabla 1. Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
G	$-40 \frac{N}{km}$
σ	$\infty \frac{S}{m}$
ϵ_r	1
μ_r	1
f_o	2 GHz

Los tamaños del escenario que se muestra en la figura 11, son presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de medidas del escenario de estudio.

Descripción	Valor
Altura de la antena transmisora	80 m
Altura de la cuña	20 m, 60 m y 100m
Inicio de superficie inclinada (+) (inicio de la cuña)	8 km
Inicio de superficie declinada (centro de la cuña)	10 km
Fin de superficie declinada (-) (fin de la cuña)	12 km
Fin del terreno	20 km

Para el desarrollo de los algoritmos matemáticos, el escenario canónico se dividió en 4 secciones a lo largo de la coordenada x como se muestra en la figura 11, favoreciendo su aplicación y mejorando la manera de realizar el modelaje de cada escenario.

Los casos de estudio que se presentan en el escenario son: (1) superficie plana, (2) superficie inclinada, (3) región de difracción y (4) región secundaria plana.

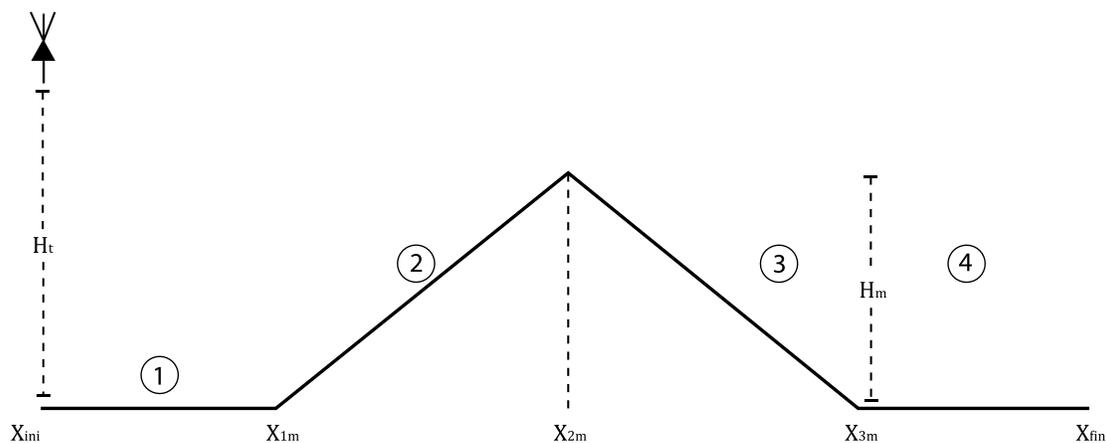


Figura 11. Medidas sobre el perfil del terreno de investigación.

Para el desarrollo de los modelos se trabajó con una antena transmisora tipo dipolo infinitesimal con ganancia unitaria. La directividad de esta antena se observa en la figura 12.

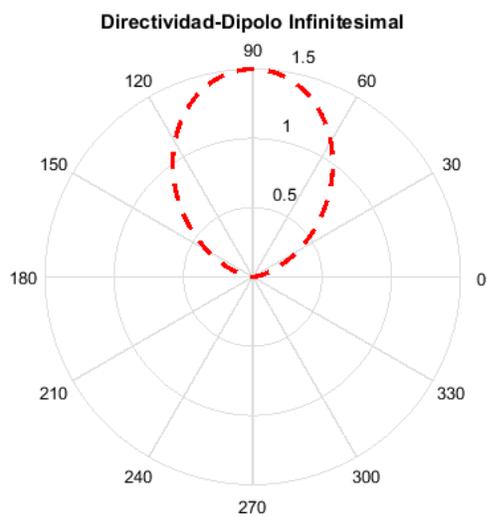


Figura 12. Directividad de dipolo infinitesimal

La figura 13 muestra el campo eléctrico inicial generado por un dipolo infinitesimal en la coordenada theta (θ).

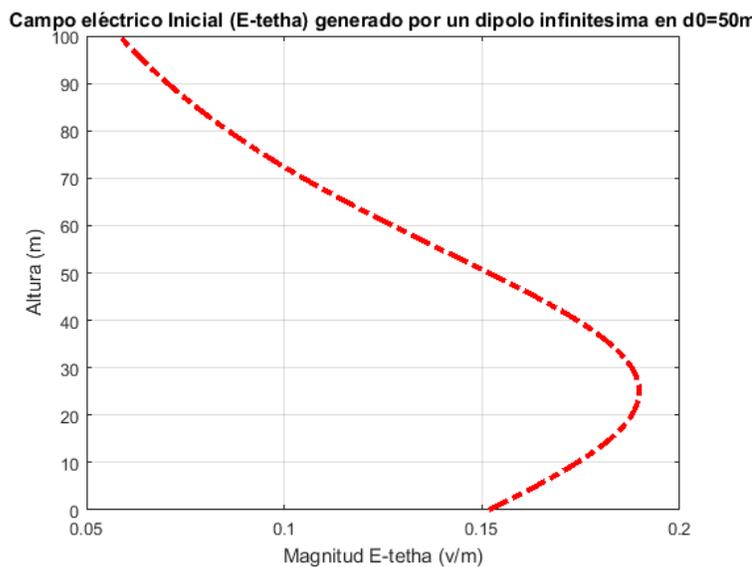


Figura 13. Campo eléctrico de un dipolo infinitesimal en coordenada Theta

La figura 14 muestra el campo eléctrico inicial por un dipolo infinitesimal en la coordenada z.

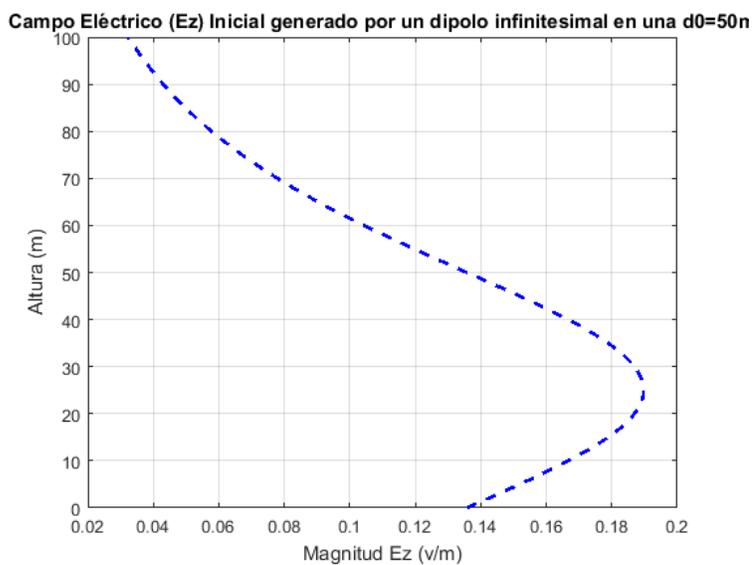


Figura 14. Campo eléctrico en coordenada Z de un dipolo infinitesimal

4.4 Implementación y simulación computacional de los algoritmos matemáticos

En esta sección se describe cada una de los escenarios de estudio y las simulaciones obtenidas de los algoritmos desarrollados en Matlab.

4.4.1 Tierra plana

El primer caso de estudio es el de tierra plana, su sección inicia en X_{ini} y termina en el inicio de la superficie inclinada correspondiente a X_{1m} . Se trata de una superficie que no posee pendiente o regiones de dispersión sino una superficie totalmente horizontal. El modelaje resultante del trazado de dos rayos modificado en tierra plana se evidencia en la figura 15.

La altura de la antena es de 80 metros y se establecieron puntos de recepción a 10 metros de altura. Se observa que las dos componentes del modelo de dos rayos como lo son el rayo directo de color azul y el rayo procedente de la reflexión a tierra en color rojo, sufren una pequeña curvatura debida al efecto de la refractividad. Este índice de refracción de modeló como:

$$n(z) = N(z) \times 10^{-6} + 1 \quad (33)$$

Donde,

$$N(z) = 304 - 40z \quad (34)$$

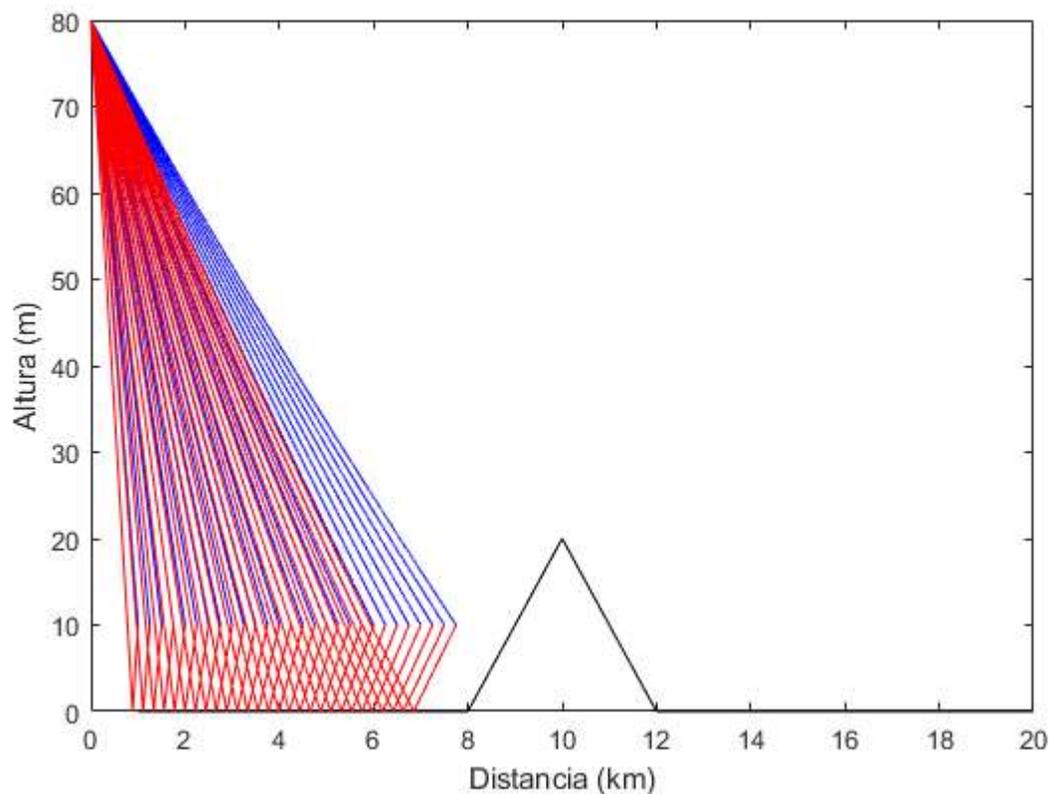


Figura 15. Conformación de los rayos en la región plana del escenario

4.4.2 Superficie inclinada

Un segundo caso analizado en este estudio es la superficie inclinada perteneciente a la pendiente positiva de la cuña, que inicia en el valor X_{1m} y va hasta la parte más alta de la cuña correspondiente a X_{2m} . En esta parte, el modelo de dos rayos se ajustó a la pendiente del terreno al calcular la distancia de la primera reflexión sobre la superficie de la cuña. La figura 16 muestra la simulación obtenida.

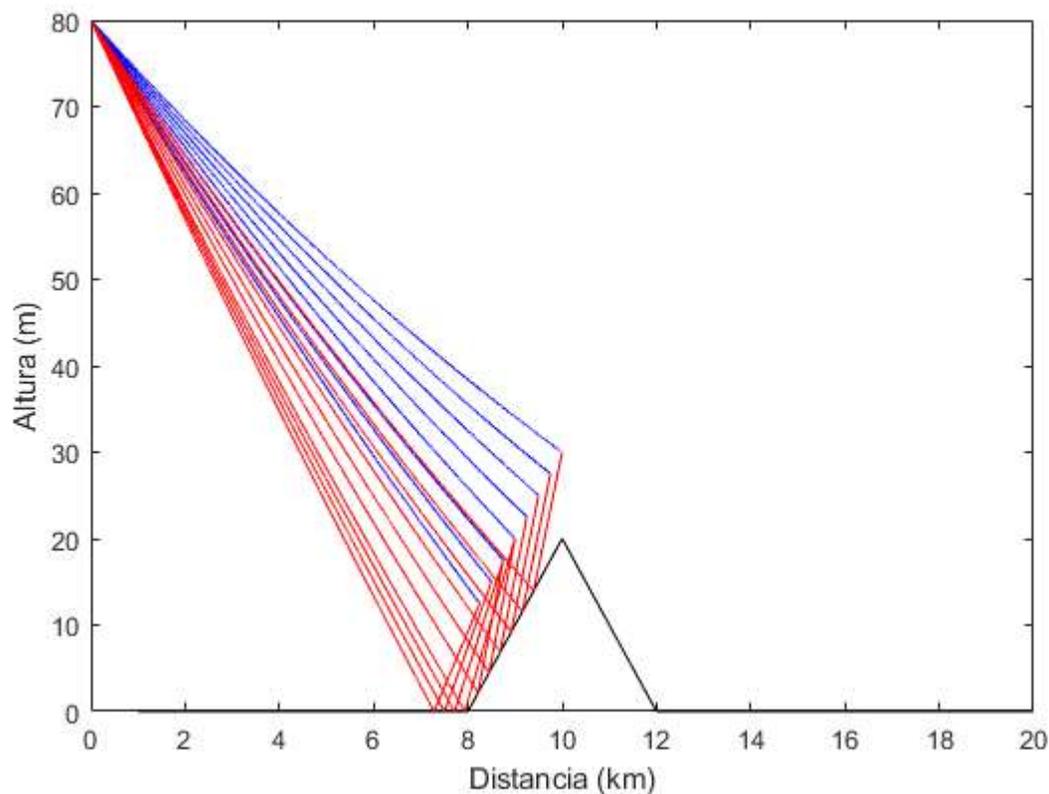


Figura 16. Perfil horizontal del modelo de dos rayos en superficie inclinada

En este caso se establece la altura de la cuña en 20 metros a 10.000 metros de la fuente transmisora, se puede observar que algunos rayos reflejados en tierra se originan antes del inicio de pendiente, esto es debido a que la componente de rayo directo con la que se complementan, tiene su punto de recepción en esta pendiente.

4.4.3 Región de difracción

La difracción por cuña ocurre cuando un rayo incide en una discontinuidad, en este escenario se trata de la punta de la cuña, ubicada en X_{2m} , permitiendo que más señales se propaguen alrededor del obstáculo como se observa en la figura 17. La magnitud y las direcciones de los rayos

difractados se modelaron con la solución de UTD de la ecuación (30) y las definiciones de ángulos incidentes y refractados de la ecuación (32)

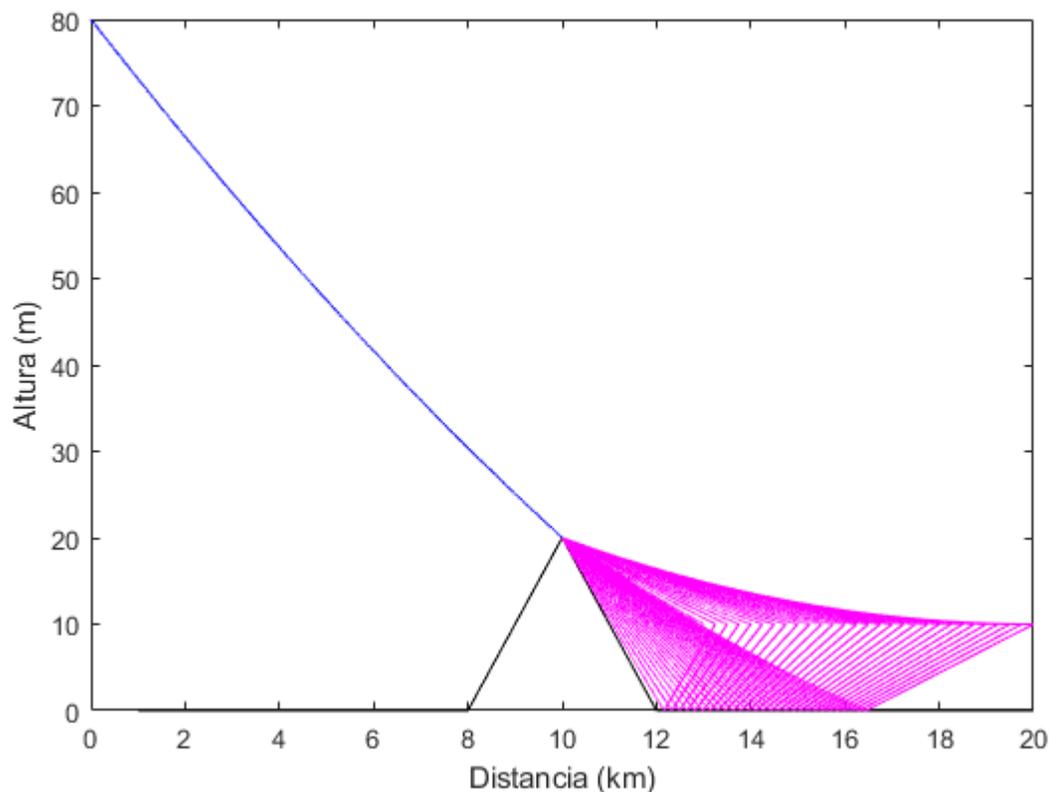


Figura 17. Difracción en cuña perfectamente conductora.

4.4.4 Segunda región de tierra plana

En esta sección hacen parte todos aquellos rayos directos que tiene su punto de recepción después de terminar la pendiente negativa de la cuña en x_{3m} y por tanto su trayectoria no se ve afectada. En la figura 18 se observan estos rayos.

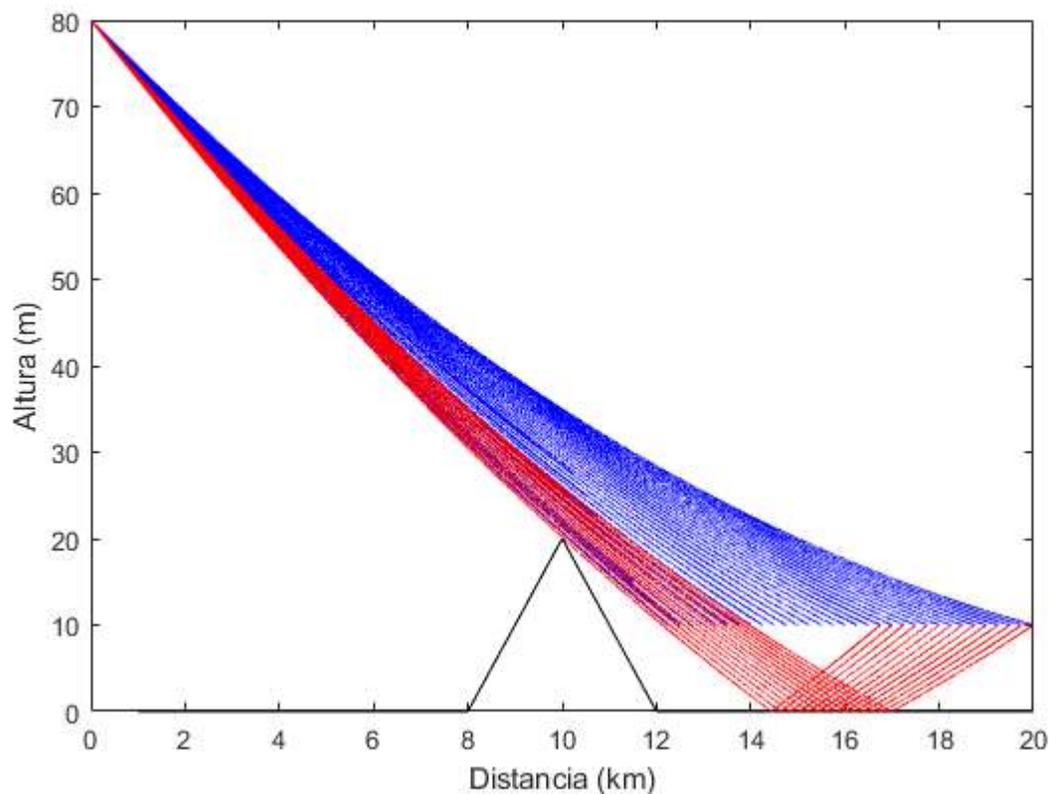


Figura 18. Trazado de Rayos en tierra plana

Este caso se modela de la misma manera que la primera sección de tierra plana, por lo cual los puntos de recepción tienen sus dos componentes, sin embargo, algunos rayos directos no tenían una componente reflejada y es aquí donde la UTD es de gran importancia, puesto que permite calcular las componentes reflejadas que se vieron obstruidas por la cuña permitiendo modelar las señales en regiones de sombra.

4.4.5 Modelo de dos rayos modificado con UTD

Para conocer el rendimiento del modelo de dos rayos modificados que incluya efectos difractivos, se realizaron simulaciones con cuñas de diferentes alturas, con un transmisor fijo a 80m sobre la superficie, el centro de la cuña en 10km y la frecuencia de operación en 2Ghz. La figura 19 muestra el perfil horizontal de la cuña de 20 metros de altura.

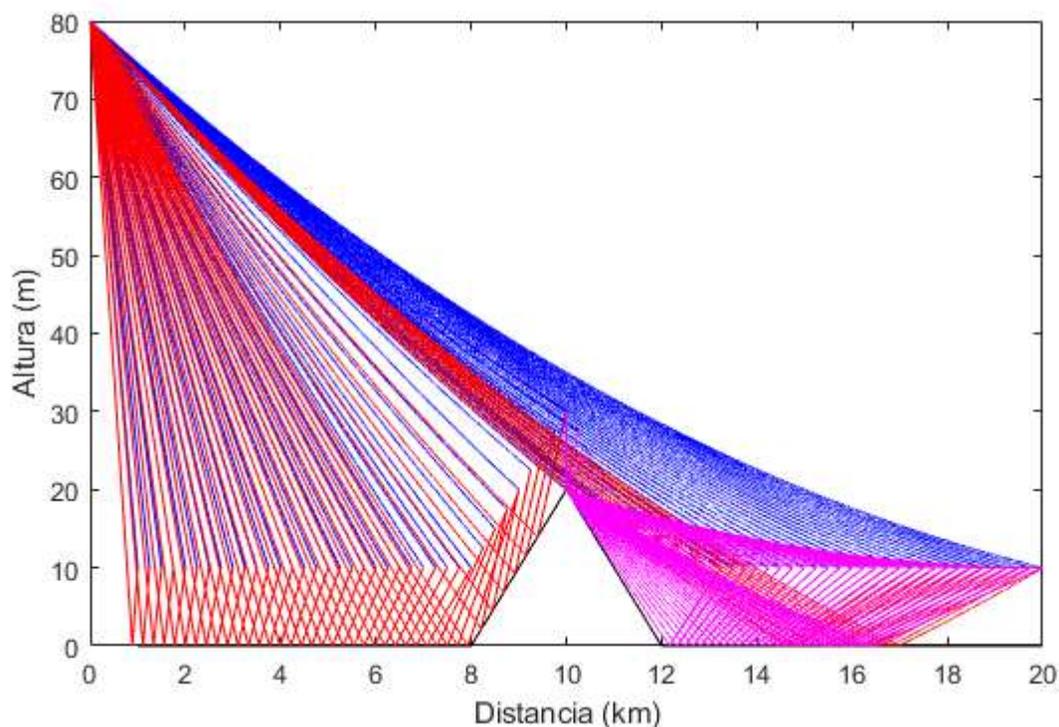


Figura 19. Conformación de los rayos en escenario con cuña de 20m

La figura 20 evidencia el comportamiento del modelo de propagación con una cuña de altura de 60m. Ahora, los rayos directos que en la cuña de 20m pasaban a la segunda región de tierra plana, no llegan a esa zona, no obstante, la difracción en la cuña, permite la llegada de señales provenientes de la antena a la última región del perfil.

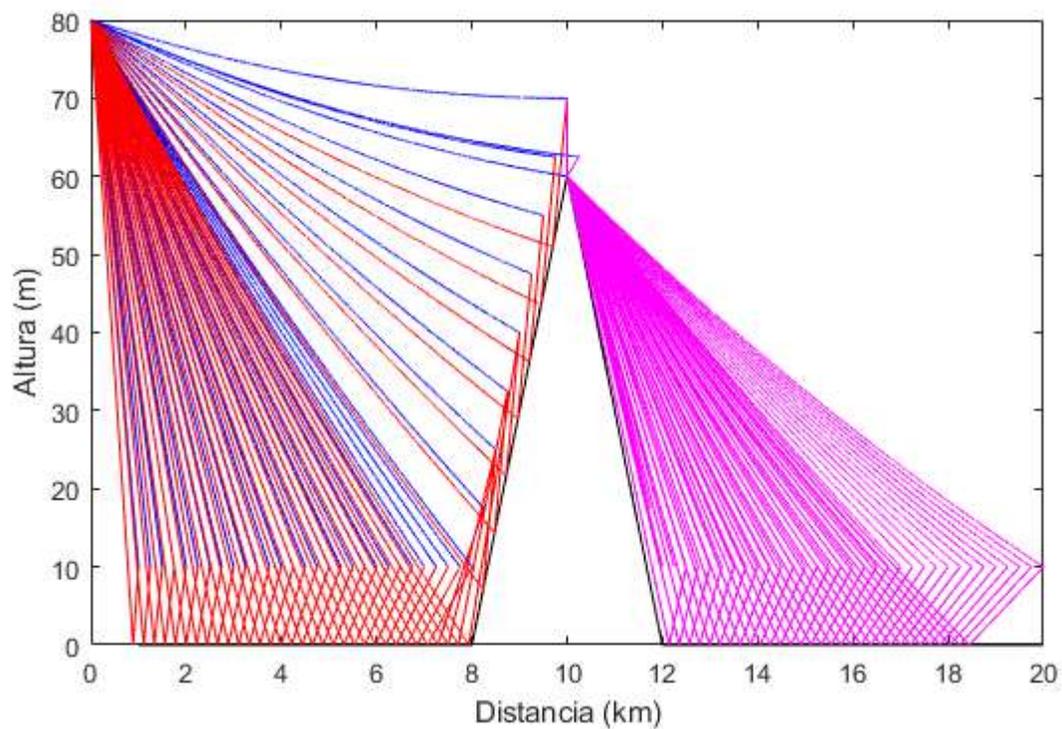


Figura 20. Modelo de dos rayos modificado en cuña de 60m

El perfil horizontal de la cuña de 100m de altura presenta un comportamiento similar al de la cuña de 60m, puesto que ambas impiden el paso de rayos directos pero su difracción en lo más alto de la cuña genera nuevos rayos a la región de sombra, esto se muestra en la Figura 21.

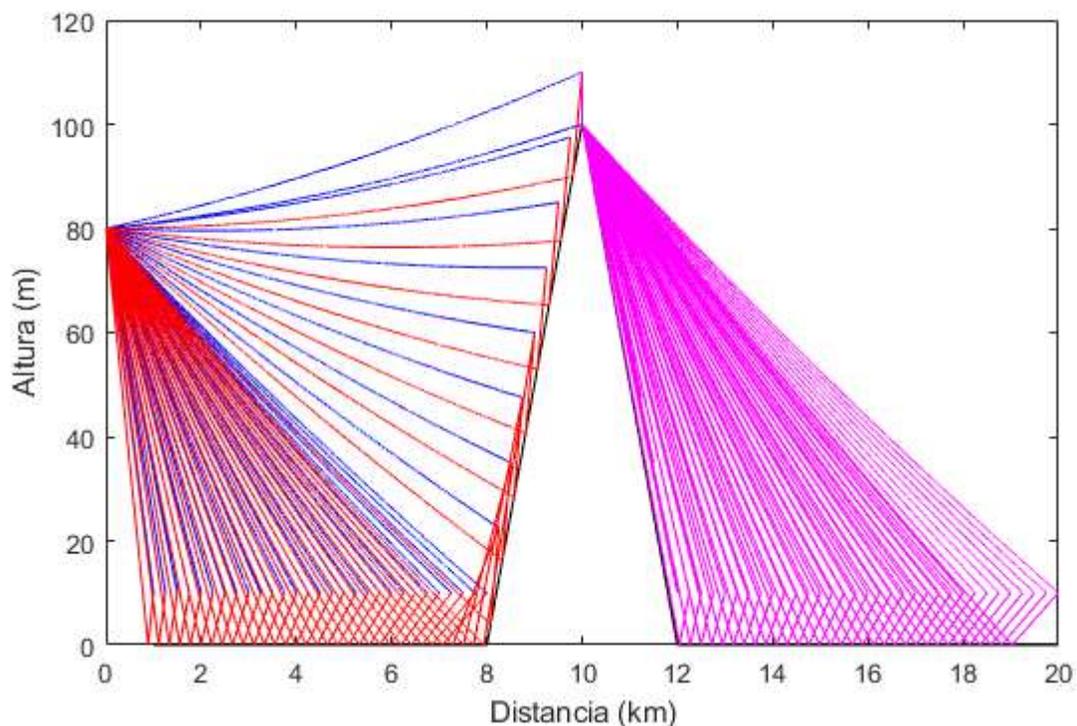


Figura 21. Modelo de dos rayos modificado en cuña de 100m

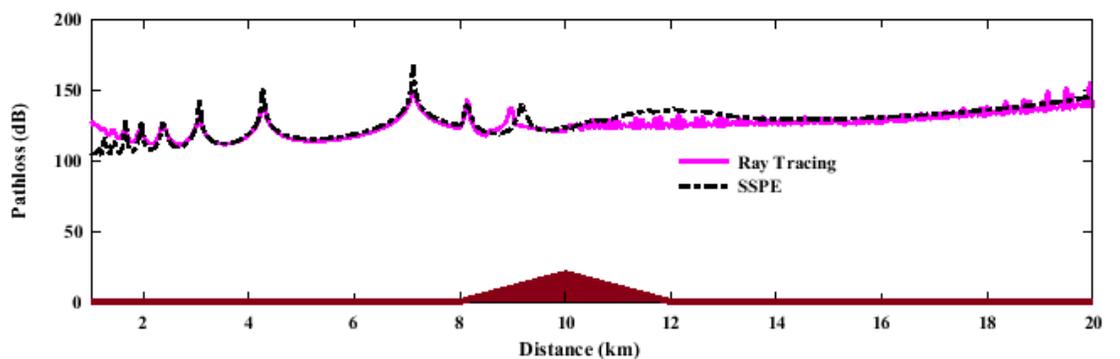
4.5 Comparación de los resultados

Las pérdidas de camino corresponden al cálculo de la atenuación de densidad de potencia de una onda electromagnética a medida que se propaga en el espacio libre, éstas son de suma importancia en el diseño de sistemas de comunicaciones porque dan información acerca del terreno y de los fenómenos ondulatorios presentes permitiendo una buena predicción de los modelos electromagnéticos.

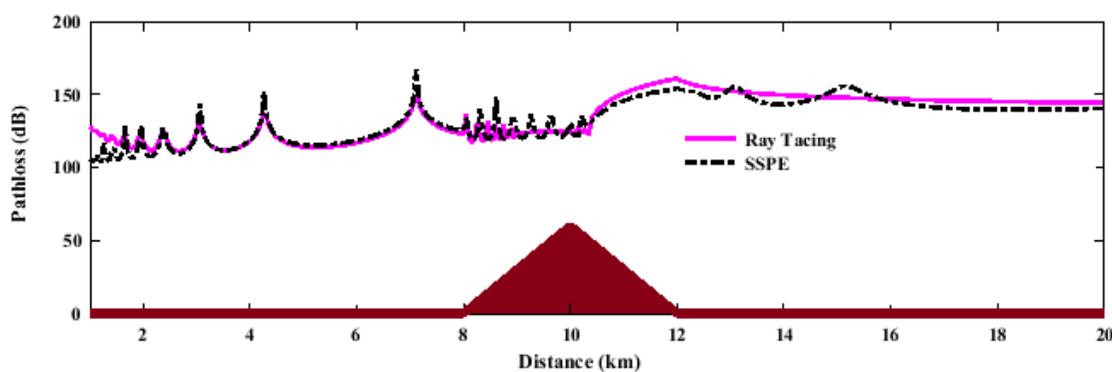
Esta sección presenta la confrontación de los resultados obtenidos para ambos modelos correspondientes a las pérdidas de camino. Una vez obtenidas los valores de magnitud de campo eléctrico se procede a calcular la atenuación en decibeles a partir de la siguiente ecuación:

$$A_{(dB)} = 10 \log (E) \quad (35)$$

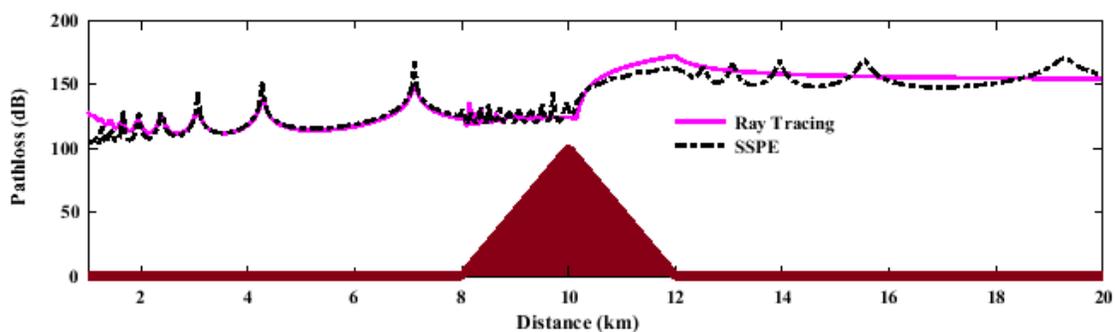
La figura 22 presenta la comparación entre el trazado de rayos propuesto y el método SSPE. En este gráfico, los perfiles horizontales de pérdidas de camino se muestran para diferentes alturas de la cuña, 20, 60 y 100 metros respectivamente.



a)



b)



c)

Figura 22. Perfiles horizontales de pérdidas de camino para cuñas de: (a) 20m, (b) 60m y (c) 100m

En las tres situaciones, se puede observar que la formulación propuesta de un trazado de rayos modificado unificado con UTD tiene un comportamiento similar con respecto a los resultados de las gráficas de SSPE.

Para obtener las gráficas correspondientes a las pérdidas de camino de los perfiles verticales, se estableció un punto de recepción fijo a lo largo del eje x, correspondiente a 20 km. La figura 23 muestra los resultados obtenidos. Se evidencia que la curva referente al trazado de rayos se asemeja a la obtenida por el método SSPE, por lo cual es posible afirmar que la difracción y los efectos atmosféricos en el trazado de rayos se logran incluir favorablemente.

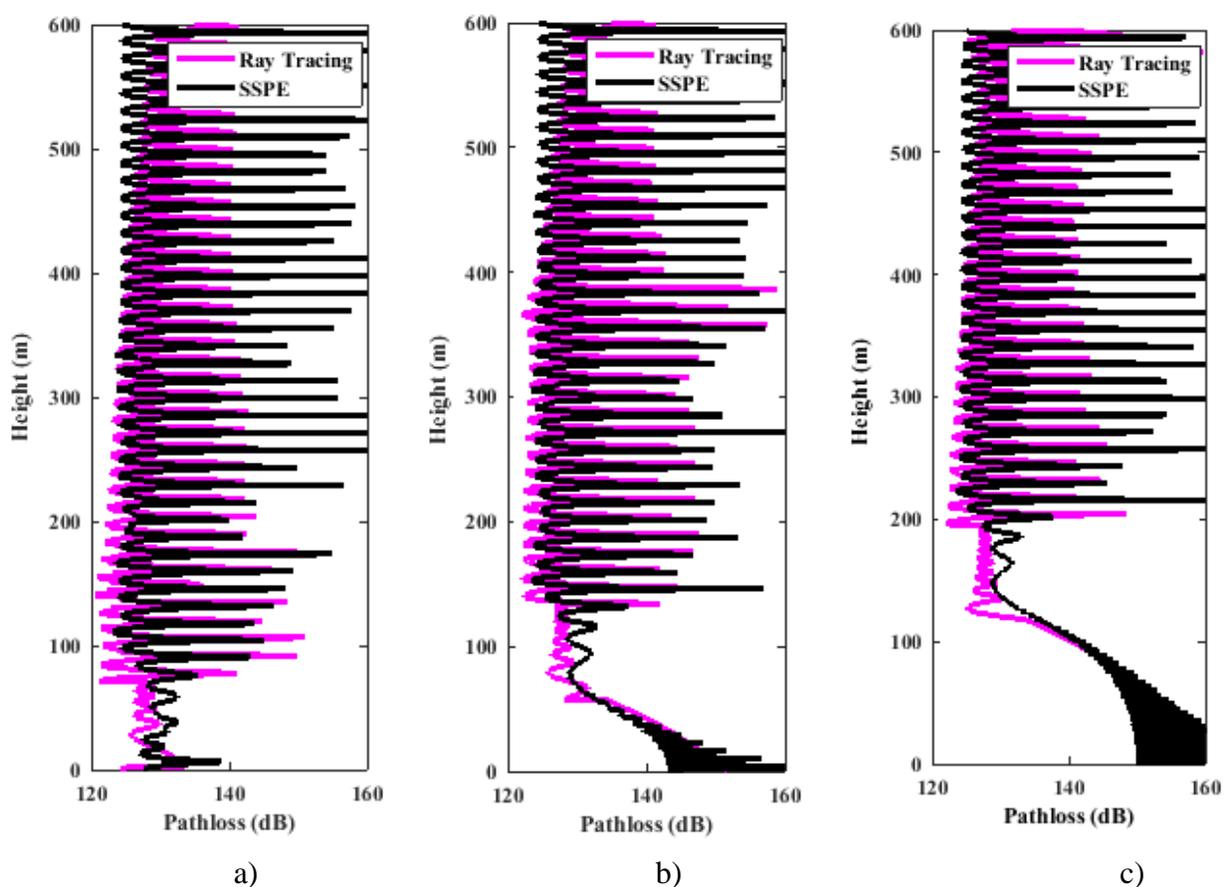


Figura 23. Perfiles verticales de pérdidas de camino para cuñas de: (a) 20m, (b) 60m y (c) 100m

4.6 Verificación estadística

Para la verificación estadística de la comparación del trazado de dos rayos modificado con la solución numérica SSPE, se utilizó el error absoluto medio (EAM), el cual es una medida para cuantificar la precisión y la incertidumbre de un modelo contra otro. La expresión que permite hallar este error se muestra en la ecuación 36.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (36)$$

Como su nombre lo indica, el EAM es un promedio de errores absolutos, donde y_i corresponde a la serie de datos tomados del campo eléctrico en el modelo del trazado de dos rayos, x_i son los valores para SSPE y n es el número de datos calculados.

El error medio absoluto obtenido en el modelo basado en óptica geométrica frente a la solución numérica se halló para diferentes alturas de cuña en un perfil vertical, estos resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3. EAM para diferentes alturas de cuña

Altura de la cuña	Error absoluto medio
20 metros	0.0148 dB
60 metros	0.0073 dB
100 metros	0.0076 dB

Con base en la tabla 3 se evidencia errores ínfimos de la atenuación de campo en el trazado de dos rayos modificados frente a la solución SSPE, validando el rendimiento del modelo en el caso canónico propuesto.

4.7 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 “Scattering by a PEC Wedge in a Standard Atmosphere: a Modified Two-Ray Model Versus a SSPE Algorithm” en la edición número 18 de la Conferencia Internacional de Microondas y Optoelectrónica (IMOC) realizada entre el 10 al 14 de noviembre del 2019 en Aveiro, Portugal. En el anexo a se incluye una captura del correo de aceptación del artículo de investigación.

Conclusiones

Se realizó una revisión bibliográfica de los efectos refractivos en una atmosfera estándar en el trazado de rayos, así como también sobre la predicción de dirección, magnitud y fase de rayos difractados por una cuña sin pérdidas utilizando UTD.

Se dedujo un modelo de dos rayos modificado que incluye expresiones matemáticas que describen los efectos refractivos de la atmósfera.

Se definió el escenario de investigación que consiste en una cuña perfectamente conductora que incluye diferentes casos canónicos de estudio como tierra plana, superficie inclinada y región de difracción.

Se implementó el modelo híbrido de dos rayos modificado junto con UTD para una cuña perfectamente conductora en Matlab teniendo en cuenta los casos canónicos de radio propagación propuestos

Las pruebas canónicas son útiles para analizar el rendimiento de la técnica y las implementaciones en entornos controlados. Sin embargo, no presentan la complejidad del comportamiento de radiopropagación en escenarios reales. Por lo tanto, este trabajo presentó resultados preliminares de una formulación novedosa de trazado de rayos para un caso canónico.

Se verificó el modelo de dos rayos modificado con el algoritmo SSPE, superponiendo las gráficas de pérdidas por camino de cada modelo, y se examinó la precisión del método, estadísticamente a través del error medio absoluto.

El algoritmo de solución numérica SSPE usado como referencia, caracterizado por presentar una respuesta rápida y precisa, demostró un buen acuerdo con la formulación propuesta del trazado de rayos modificado.

Referencias

- [1] D. Parada, D. Guevara, G. Rego, J. M. Mendes, and B. Araque, “A Comparison Between a Modified Two-Ray Model with Atmospheric Effects and the SSPE Method for an EM Propagation Case Study,” no. EuCAP, pp. 13–16, 2019.
- [2] L. Sevgi and G. Apaydin, *Radio Wave Propagation and Parabolic Equation Modeling*. Wiley, 2017.
- [3] D. A. Parada, C. G. Rego, and C. G. Batista, “Algoritmos para a Solução de Equações Parabólicas em Problemas de Radiopropagação,” pp. 16–19, 2018.
- [4] P. Valtr and P. P. Č, “Tropospheric Refraction Modeling Using Ray-Tracing and Parabolic Equation,” vol. 6, no. 3, pp. 98–104.
- [5] D. A. Parada, G. Rego, C. G. Batista, and G. L. Ramos, “A comparative study between SSPE methods and a HO-FDTD algorithm for EM propagation over lossy terrains,” vol. 2, no. 3, pp. 3–5.
- [6] A. N. Diego Tami , Cássio G. Rego, Dinael Guevara and H. G. T. Fernando J. S. Moreira, Jordi Giménez, “Analysis of Heuristic Uniform Theory of Diffraction Coefficients for Electromagnetic Scattering Prediction,” vol. 2018, 2018.
- [7] D. Tami, C. G. Rego, F. J. S. Moreira, U. Francisco, D. P. Santander, and N. Santander, “Heuristic UTD Coefficients for Radiowave Coverage Prediction in a Urban Scenario,” pp. 5–8, 2015.
- [8] J. Beltrán and J. Fermín, “Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil Comparison of Electromagnetic Propagation Models Implemented in Mobile Telephony,” vol. 12, pp. 305–310, 2012.

- [9] V. Campillo Torrecillas, “Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD,” 2008.
- [10] J.-C. Garcia-Alvarez and O.-A. Rogriguez, “Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas,” *X Congr. Int. Telecomunicaciones*, 2002.
- [11] D. Guevara, “MODELOS DE PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DINAEL GUEVARA IBARRA, Ph.D.” .
- [12] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, Séptima Ed. 2009.
- [13] M. R. Mazzaro, “MODELIZACIÓN DE CANAL DE RF PARA LAS FRECUENCIAS DE 850 MHz Y 1900 MHz,” 2005.
- [14] Matthew N. O. Sadiku, *Elementos de Electromagnetismo*, Tercera Ed. 2003.
- [15] F. T. Ulaby, *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo*, Quinta Edi. 2007.
- [16] P. Series, “The radio refractive index : its formula and refractivity data P Series Radiowave propagation,” vol. 11, 2015.
- [17] T. S. Rappaport, *Wireless communications*. 2002.
- [18] MinTIC, “Normograma del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [RESOLUCION_ANE_0181_2019].”
- [19] A. M. Montello, D. Larghe, “‘LEY 44 DE 1993,’ vol. 1993, no. febrero 5, 1993.”

Anexos

Anexo A. Correo de aceptación del artículo en IMOC 2019.

[IMOC'2019] #1570558487 has been uploaded Recibidos x  

imoc2019=imo...@edas.info 8 oct. 2019 12:48   

para Diego, Cássio, Juliana, Dinael, Glaucio, mí ▾

 inglés ▾ >  español ▾ [Traducir mensaje](#) [Desactivar para: inglés x](#)

Dear Mr. Diego Parada:

Thank you for uploading your paper 1570558487 (*Scattering by a PEC Wedge in a Standard Atmosphere: a Modified Two-Ray Model Versus a SSPE Algorithm*) to **2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. The paper is of type application/pdf and has a length of 281796 bytes.

You can modify your paper at <https://edas.info/showPaper.php?m=1570558487> and see all your submissions at <https://edas.info/index.php?c=25943> using the EDAS identifier diegoandrespr@ufmg.br

Regards,

Moisés Renato Nunes Ribeiro, TPC Chair

Nuno Borges Carvalho, TPC Chair