

Algoritmo de trazado de rayos para modelado de canales inalámbricos en entornos interiores.

Ray-Tracing Algorithm for Wireless Channel Modeling in Indoor Environments.

Yesica Beltrán-Gómez¹, Luis Leonardo Camargo², Rafael Linero-Ramos³, Jorge Gómez-Rojas⁴, Manuel Ricardo Pérez⁵
^{1,2,3,4}Universidad del Magdalena, Colombia, ⁵Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Recibido: 05 de febrero de 2020

Aprobado: 23 de abril de 2020

Resumen— En este trabajo es propuesto un algoritmo para modelar un canal inalámbrico en un entorno de interiores, usando el método de trazado de rayos conocido como “método de imágenes” que considera el efecto dispersivo. Este algoritmo fue implementado en Matlab, permitiendo simular escenarios de diferentes dimensiones y con diferentes materiales en sus paredes. El algoritmo propuesto fue validado con un modelo analítico y un software comercial (Wireless Insite). Los dispersores se modelaron con las características dieléctricas de los materiales que le componen, la frecuencia y la distancia, entre otras. Los efectos de reflexión, refracción y difracción también son considerados para aumentar la precisión de la estimación. Con el trabajo propuesto se obtiene un algoritmo para estimar la potencia recibida en un canal inalámbrico de interior que estima el comportamiento del canal. Una simulación de un escenario real es realizada con los resultados obtenidos dentro de los parámetros de la recomendación ITU-R P.1238-7, asegurando su precisión, con un error relativo promedio de 3.85% y una diferencia inferior a 3 dB.

Palabras Claves: Trazado de rayo, modelado de canal, estimación de canal, propagación inalámbrica en interior.

Abstract— This work proposes a simulation algorithm for modelling a wireless channel in indoor environments, based on dimensional ‘image-based’ ray tracing method that considers the effects of channel dispersion. The algorithm implemented in Matlab, allows to simulate scenarios of different dimensions and with different types of walls into a building. The proposed algorithm was validated with analytical models and commercial software (Wireless Insite). To carry out the modelling, the dispersers, the dielectric characteristics of the materials, the frequency and the distance, among others, are considered; The effects of reflection, refraction and diffraction phenomena are also included to increase the accuracy of the prediction. The presented work proposes an algorithm to estimate the power received in a wireless channel for interiors that seek to perform the channel estimation. A simulation of a real scenario is obtained with results that, according to the recommendation ITU-R P.1238-7, are accurate, with an average relative error of 3.85% and a difference of less than 3 dB.

Keywords: Ray Tracing, Channel modelling, channel estimation, Indoor Wireless propagation.

I. INTRODUCTION

*Autor de correspondencia

Correo electrónico: ybeltrang@unimagdalena.edu.co (Yesica Tatiana Beltrán Gómez)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>).

Forma de citar: Y. Beltrán-Gómez, L. L. Camargo, R. Linero-Ramos, J. Gómez-Rojas, M. R. Pérez, “Algoritmo de trazado de rayos para modelado de canales inalámbricos en entornos interiores”, Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 8, no. 2, pp. 121-127, 2020.

El uso del canal inalámbrico ha presentado un crecimiento exponencial, asimismo las aplicaciones para el uso de estos canales requieren de velocidades altas para un óptimo funcionamiento. Para implementar dichas aplicaciones es necesario conocer el ambiente por el cual será transmitida la información, lo que se conoce como modelar el canal [1- 2].

Actualmente, la WLAN es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica más utilizada, en esta se pueden encontrar diferentes protocolos de comunicación usados en la industria tales como 802.11b y el 802.11g con velocidades de hasta 11 Mb/seg y 54 MB/seg, respectivamente [3]. Otra tecnología que ha generado gran interés a nivel de investigativo y comercial es la Wireless Sensor Network (WSN). Las WSN son redes inalámbricas que consisten en dispositivos distribuidos espaciados autónomos utilizando sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales [4].

Los protocolos inalámbricos que utilizan dependen de los requerimientos de las aplicaciones. Algunas de las redes de sensores más utilizadas actualmente en la industria son: i) los sensores de proximidad (NFC o RFID); ii) las WPAN dentro de las que se encuentra Bluetooth, Zigbee, Wireless Hart, ISA100; iii) las WLAN donde están los protocolos 802.11a/b/g/n, 802.11af, 802.11ah, 802.11p; iv) las WMAN donde está Wi-SUN y Zigbee-NAN; WWAN donde se encuentran las redes celulares 2G, 3G, 4G, 5G y LPWAN donde se encuentra SIGFOX, LoRa, Telensa, PTC [5].

Sin duda alguna, la importancia que toma hoy en día el uso de tecnologías inalámbricas en nuestro diario vivir, especialmente en ambientes interiores, es muy alta. La calidad de servicio y la experiencia de usuario marcan una pauta fuerte en el despliegue de redes inalámbricas [6-7]. Así, el uso del modelado del canal inalámbrico para simular el comportamiento de las ondas de radio resulta de sumo interés a nivel investigativo e industrial. El conocimiento de la función de transferencia del canal inalámbrico a nivel de la capa física permite elegir de forma adecuada los métodos de acceso al medio, el esquema de modulación y codificación. Así el trabajo presentado toma contexto desde el punto de vista que existen pocos y costosos algoritmos comerciales con la misma funcionalidad. La implementación del mismo abre una posibilidad de desarrollo e investigación en el área de algoritmos computacionales de trazado de rayos para estimación de características de canal inalámbrico en un ambiente bien definido y de libre acceso.

Este artículo está organizado de la siguiente manera, en la sección II se presentan los principales conceptos y una revisión del estado del arte del método de trazado de rayos, identificando las principales técnicas y principios básicos. En la sección III se presenta la descripción funcional del algoritmo propuesto y los escenarios de prueba que se tuvieron en cuenta para la evaluación y validación del algoritmo. Finalmente, en la Sección IV, V y VI se presentan el análisis de resultados de la evaluación y la validación del algoritmo propuesto y las principales conclusiones del trabajo realizado.

II. MARCO TEÓRICO

La técnica de trazado de rayos calcula los diferentes caminos desde el transmisor al receptor, mediante el uso de óptica geométrica. En los modelos de trazado de rayos, la predicción se basa en cálculos de transmisión y recepción de rayos en un espacio abierto, teniendo en cuenta principalmente el fenómeno de reflexión. Existen también modelos de trazado más completos que tienen en cuenta otro tipo de fenómenos como lo son, la difracción, dispersión difusa y penetración a través de materiales [8-10].

El nivel de la señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor, en estos modelos se pueden predecir las

pérdidas de propagación y la dispersión de la señal respecto al tiempo [11].

Actualmente los modelos de trazado de rayos son considerados como los más precisos para predecir pérdidas y potencia de la señal [12]. Se debe tener en cuenta que para lograr una alta precisión del modelo se debe realizar una representación suficientemente detallada del área, sin embargo, esto es directamente proporcional con el tiempo de computación, el tiempo de computación de un área muy detallada es mayor que el de un área con menor detalle [11].

Uno de los modelos de trazado de rayos es el modelo en dos dimensiones [13]. Los rayos son lanzados en diferentes direcciones con el mismo ángulo del sector. La elección del ángulo depende de la exactitud requerida y del tiempo de cálculo. Si el ángulo es pequeño, proporcionará una gran exactitud, pero llevará más tiempo de cálculo.

Se realizó un estudio en las ciudades de Manhattan y Boston con el apoyo de AT&T Bell Laboratories, desarrollando el software Wireless System Engineering, a frecuencias de 900 MHz y 2 GHz. Se utilizaron mapas en dos dimensiones, se tuvo en cuenta ondas incidentes, las reflexiones y las difracciones por bordes de edificaciones, en este modelo no se tuvo en cuenta las difracciones por techos. Los autores obtuvieron un error medio de 5.3 dB y una desviación estándar entre 3.4 y 5.7 dB [14].

En [15] se realiza un estudio a una frecuencia de 1.8 GHz donde demuestra la importancia de la teoría de difracción uniforme (UTD) en casos donde los transmisores tienen poca altura con respecto a los edificios. La configuración del lugar de 440x440 metros en la ciudad de Atenas es representada por geometrías regulares en dos planos, con permitividad de 15 y conductividad de 7 para el plano tierra. Los resultados muestran una desviación media de 6 dB.

Un trabajo más reciente utiliza un árbol de difracciones para el pre-procesamiento y el procesamiento en paralelo para aumentar la eficiencia [16]. Utiliza también técnicas del trazo de rayos en sistemas de antenas de múltiples entradas-múltiples salidas (MIMO), en este estudio se trabajaron frecuencias alrededor de 1.97 GHz, obteniendo un error medio entre 1 y 4 dB.

Un caso de estudio en la ciudad de Ottawa [17] se desarrolló para un terreno de 1000x600 metros, usando un modelo en dos dimensiones, el algoritmo de fuerza bruta y la UTD. Consideraron hasta la cuarta reflexión y dos difracciones, evitando la difracción en techos de edificaciones. Se asume que los pisos son completamente planos. Los valores de permitividad y conductividad en paredes es de 6 y 0.5S/m, respectivamente. Para el plano tierra los valores fueron de 15 para la permitividad y 0.005 S/m para la conductividad. El ángulo de separación utilizado fue 0.27° para un total de 655362 rayos en un modelo tridimensional.

Otro estudio fue desarrollado en la banda de frecuencias del estándar 802.11, utilizando Network Simulation2 (NS-2) [18]. El entorno donde se llevó a cabo fue la Universidad de Nebraska. Se emplearon modelos de propagación de pequeña escala y log-normal provistos por el simulador y ajustados, la técnica de trazado de rayos, y un modelo de desvanecimiento Rice. Se incluyen algunos factores de corrección basados en mediciones, el factor K y la atenuación para cuatro sectores del campus con características de entorno diferentes.

En [19] se muestran resultados de la estimación de propagación de retraso del canal usando una herramienta de lanzamiento de rayos 3D basada en juegos de motores y GPU, se comparan los resultados de simulación con mediciones de un sistema MIMO tomadas en Ilmenau. Se evidencia que la precisión de la simulación se ve afectada por la separación angular del rayo en la primera y segunda difracción. Se obtienen resultados para resoluciones baja y alta. Para baja resolución un error medio de 16.42 y una desviación estándar de 7.6 y para alta resolución un error medio de 4.98 y una desviación estándar de 4.55.

III. PROCEDIMIENTO

Se diseñó un algoritmo para modelar un canal inalámbrico y simular el canal de acuerdo con parámetros tales como: ubicación, medio de transmisión y localización de obstáculos; de esta manera se establece información tal como zonas de cobertura, intensidad de la señal e interferencias, también se realiza una predicción de pérdidas de camino.

Los datos de entrada del algoritmo son tamaño del escenario, ángulo de disparo, cantidad de rayos a lanzar, polarización de la antena, ubicación del transmisor, ubicación del receptor, potencia de transmisión, frecuencia de la señal, medio al cual se va a transmitir. Los datos de salida del algoritmo son intensidad de campo, pérdidas de camino, potencia en el receptor y fase de la señal.

Se realiza el lanzamiento de rayos desde la ubicación de la fuente de transmisión, cuando ocurre una intersección con la superficie de algún objeto, el rayo incidente puede reflejarse, refractarse o difractarse según las condiciones de choque, este proceso se repite recursivamente hasta que el rayo realice tres fenómenos entre reflexiones, refracciones o difracciones; o cuando se reciba el rayo en el receptor.

El algoritmo consta de una función que se ejecuta la cantidad de veces ingresada en la entrada de cantidad de rayos a lanzar. No se tienen en cuenta rayos con ángulos múltiplos de 90°, en caso de que el algoritmo encuentre un rayo con un valor múltiplo de 90, toma el siguiente ángulo a lanzar, si es el último rayo pendiente por lanzar se finaliza el algoritmo.

Se calculan las coordenadas de los rayos de acuerdo con el ángulo que ingresa el usuario y se encuentran las intersecciones de acuerdo con la dirección que lleva el rayo, se elige la intersección que cumple con las condiciones requeridas, de acuerdo al ángulo ingresado.

Luego de encontrar la primera intersección del rayo lanzado, se evalúa si fue recibido en el receptor y se calcula el campo eléctrico y la fase de la señal en este punto, de acuerdo con (1):

$$E = \frac{e \frac{j2\pi fd}{c}}{d} \quad (1)$$

Donde f es la frecuencia de operación y d es la distancia recorrida por el rayo. La fase de la señal corresponde al término exponencial de la ecuación (1).

Para los rayos que presentan el fenómeno de difracción Si la posición de la primera intersección se realiza con una esquina se trazan cuatro rayos que representan la difracción y se calcula para cada uno las intersecciones posibles con todas las paredes. Si alguno de los rayos es recibido se calcula la potencia recibida de acuerdo con (2) [20]:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + 10 \log(G_s) + 10 \log(\sigma) - 30 \log(4\pi) - 20 \log(s) - 20 \log(s') \quad (2)$$

Donde G_s es la ganancia de las antenas, s es la distancia recorrida por el rayo antes del punto de difracción y s' es la distancia recorrida por el rayo después del punto de difracción. El coeficiente σ es la ganancia por propagación documentada en [21] por medio de valores experimentales.

Si la posición de la primera intersección se realiza con la pared que divide el medio, se valida si el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico calculado previamente se produce una refracción, si es mayor

se produce una reflexión. Se vuelven a calcular las intersecciones con las paredes. Según el fenómeno ocurrido de refracción o reflexión se calcula la siguiente posición. Si el rayo es recibido se calcula el campo eléctrico total. A continuación, se presenta el modelo utilizado para esta parte del algoritmo:

Para los rayos refractados se calcula el ángulo crítico cuando la señal pasa de un medio a otro, según (3).

$$\theta_c = \text{asin} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (3)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios. Si el ángulo incidente es menor al ángulo crítico, el rayo es refractado y continúa su trayectoria con un ángulo calculado mediante (4).

$$\theta_2 = \text{asin} \left(\frac{n_1 \sin(\theta_1)}{n_2} \right) \quad (4)$$

Se calcula el coeficiente de reflexión R según (5).

$$R = \frac{\text{sen}(\theta) - Z}{\text{sen}(\theta) + Z} \quad (5)$$

Donde Z es

$$Z = \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta)} / \epsilon_r \text{ para antenas polarizadas verticalmente.}$$

$$Z = \sqrt{\epsilon_r - \cos^2(\theta)} \text{ para antenas polarizadas horizontalmente}$$

Además, ϵ_r es la permitividad relativa del material y θ es el ángulo incidente del rayo. El campo calculado en un rayo reflejado está dado por (6).

$$E = R \frac{e \frac{j2\pi fd}{c}}{d} \quad (6)$$

Donde R es el coeficiente de reflexión, f la frecuencia de operación y d la distancia recorrida por el rayo. Si un rayo se refleja más de una ocasión, el coeficiente de reflexión resultante es el producto de los coeficientes individuales [20].

Después de finalizar esta parte primera etapa se realiza el siguiente fenómeno del rayo cuando no ha sido recibido. Se realiza una condición para conocer si los siguientes rayos son procedentes de rayos difractados, reflejados o refractados. Se presentan las siguientes posibilidades:

Si el rayo es procedente de una reflexión o una refracción se realiza la comparación de la pared con la que realizó la intersección anterior para conocer si sufrirá una reflexión o una refracción. Se realizan además las comparaciones correspondientes para conocer el ángulo incidente del rayo y conocer si continua con el mismo ángulo o cambiará. Se calculan las nuevas intersecciones del rayo resultante para conocer la siguiente posición donde encontrará un obstáculo. Si la intersección la realizó con la pared que divide el medio se realiza una condición para conocer cuál es el rayo procedente y el ángulo de incidencia y verificar si se hará una refracción o una reflexión. Si el rayo es recibido se calcula el campo eléctrico total como fue mostrado anteriormente, si no es recibido se continua la trayectoria.

Adicionalmente se realiza el último fenómeno sufrido por el rayo, el cual puede ser una reflexión o una refracción. Este procedimiento se realiza de la misma forma que el anterior que también puede ser reflexión o refracción, las difracciones sólo se realizan como primer fenómeno del rayo. Si al final de la función el rayo no fue recibido en ninguna de sus trayectorias, se asigna un valor de cero a las salidas: campo eléctrico, fase y distancia.

Cuando finaliza el ciclo de trazado de rayos se realiza la sumatoria de los campos calculados para cada rayo con este dato se realiza el cálculo de las pérdidas y la potencia en el receptor, como se muestra a continuación:

La potencia recibida en el receptor se calcula según el método mostrado en (7) [20]:

$$P_{RX} = P_{TX} + 20 \log \left(\frac{\lambda |E_{Total}|}{4\pi |E_0|} \right) \quad (7)$$

Adicionalmente, se realizó una función para realizar mapas de cobertura, en ésta se agrega un ciclo donde se ubican receptores cada cierta distancia y se repite toda la función de lanzamiento de rayos para cada receptor. Todos los valores de potencia recibida para cada receptor se almacenan en una matriz y al finalizar, se realiza el mapa de cobertura con la función `imagesc` de Matlab.

Se realizaron validaciones del algoritmo de forma analítica con la formulación general encontrada en el libro *Wireless Communications* [20] y con una herramienta comercial de simulación electromagnética basada en técnicas de computación avanzadas, que tienen soluciones implementadas con Trazado de Rayos.

El algoritmo se evalúa estableciendo unos puntos específicos de observación para determinar las pérdidas de camino, de acuerdo con los rayos que llegan al receptor y su intensidad. Se realiza la evaluación de un modelo de rayo directo, modelo de dos rayos, modelo de tres rayos considerado como un rayo directo y dos rayos que se reflejan una o dos veces, modelo de diez rayos considerado como un rayo directo, dos rayos reflejados una vez y dos rayos reflejados dos veces.

Las pruebas se realizan en el escenario 1, con diferentes tamaños, que van desde 80 a 200 unidades, equivalentes a metros. Variando la ubicación del transmisor y receptor desde una unidad hasta veinte unidades equivalentes también a metros de distancia, con una frecuencia de 900 MHz, con una potencia de transmisión de 25 dBm, se obtienen resultados para la antena polarizada vertical y horizontalmente.

Se puede observar en las siguientes figuras ejemplos de escenarios de prueba.

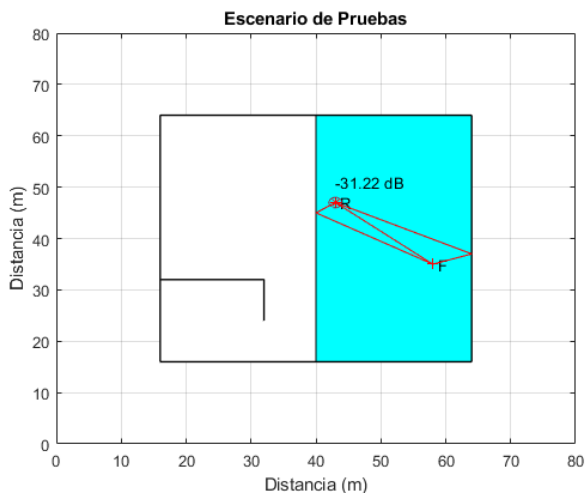


Figura 1: Escenario de prueba modelo de tres rayos. Fuente: Elaboración propia.

obtenidos. En las figuras observamos el comportamiento de la señal en los tres casos (analítica, algoritmo y software) con la variación de la distancia.

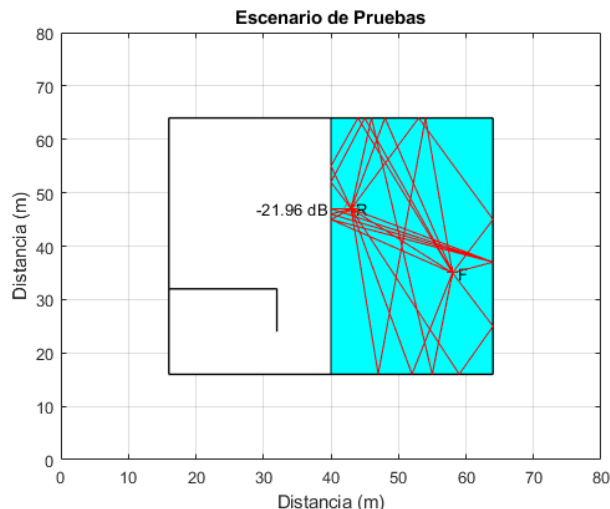


Figura 2: Escenario de prueba modelo de diez rayos. Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo de un rayo el error absoluto promedio obtenido del algoritmo respecto al método analítico fue de 0.0005 y el error relativo promedio fue de 0.0015%, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo respecto al software fue de 0.3335 y el error relativo promedio fue de 1.93%.

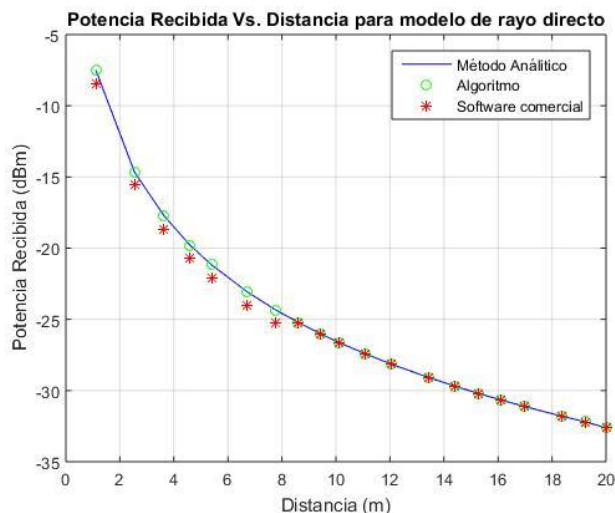


Figura 3: Escenario de prueba modelo de diez rayos. Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo de dos rayos, con antena en polarización horizontal el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.08 y el error relativo promedio fue de 0.37%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.60 y el error relativo promedio fue de 7.21%.

Para el caso de la antena en polarización vertical, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.06 y el error relativo promedio fue de 0.3%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.23 y el error relativo promedio fue de 5.4%.

IV. RESULTADOS

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados

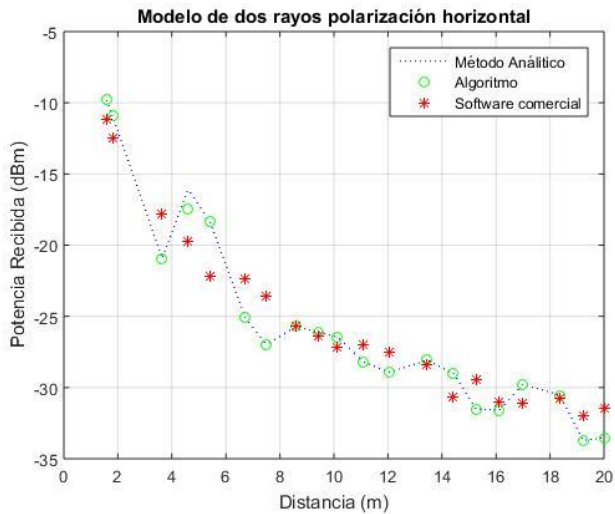


Figura 4: Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de dos rayos con antena horizontal.
Fuente: Elaboracion propia.

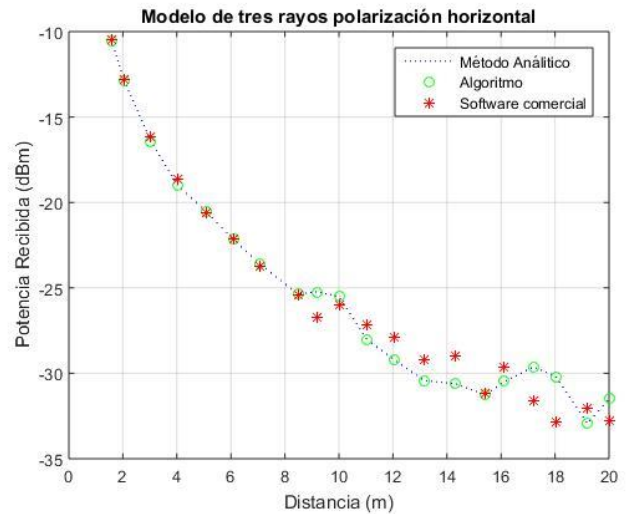


Figura 6: Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de tres rayos con antena horizontal.
Fuente: Elaboracion propia.

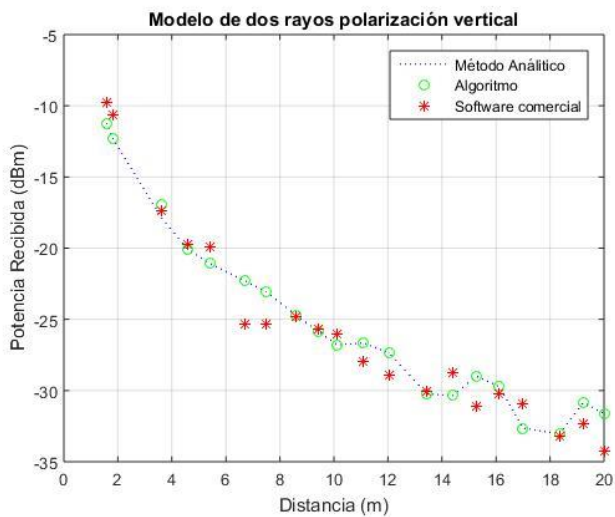


Figura 5: Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de dos rayos con antena vertical.
Fuente: Elaboracion propia.

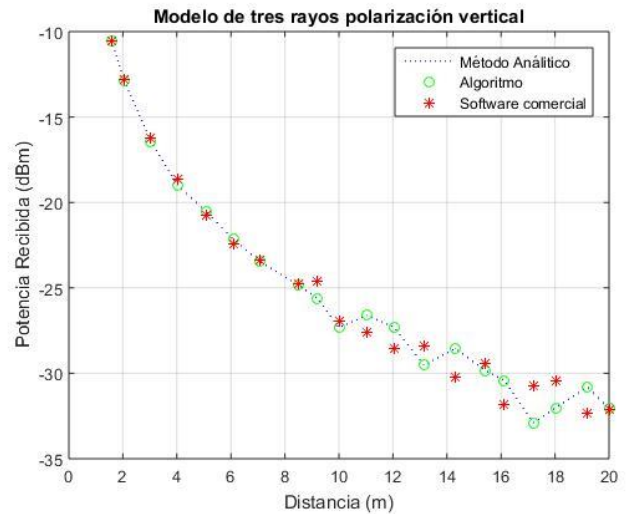


Figura 7: Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de tres rayos con antena vertical.
Fuente: Elaboracion propia.

En el modelo de tres rayos, para la antena en polarización horizontal, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.0045 y el error relativo promedio fue de 0.019%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 0.79 y el error relativo promedio fue de 2.78%.

Para la antena en polarización vertical, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.003 y el error relativo promedio fue de 0.0096%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 0.74 y el error relativo promedio fue de 2.62%.

En el modelo de diez rayos para una antena en polarización horizontal, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.0055 y el error relativo promedio fue de 0.0019%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.01 y el error relativo promedio fue de 3.78%.

Para una antena en polarización vertical, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.004 y el error relativo promedio 0.0013%.

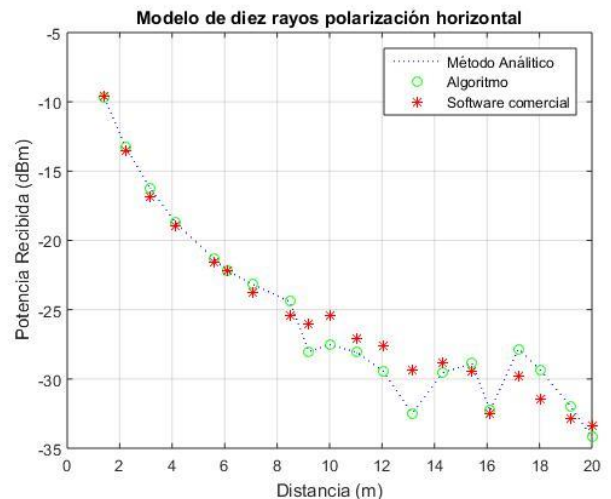


Figura 8: Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de diez rayos con antena horizontal.
Fuente: Elaboracion propia.

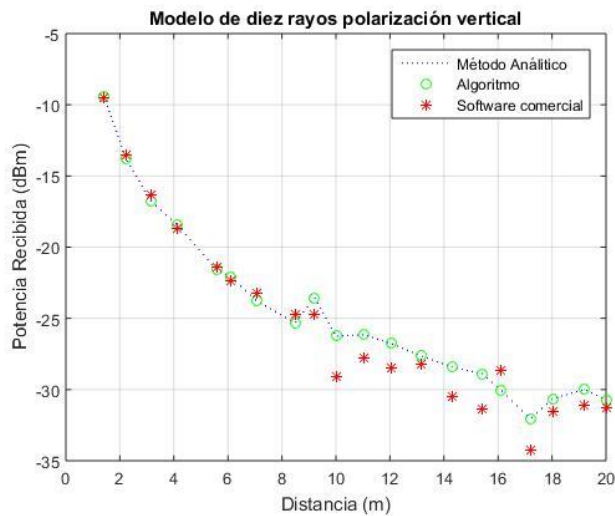


Figura 9: Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de diez rayos con antena vertical.

Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se desarrolló una herramienta de trazado de rayos para modelar un canal inalámbrico, obtener una estimación del valor del campo eléctrico que se recibe en un punto determinado de un escenario, realizar predicción de cobertura, cálculo de potencias recibidas y fase de la señal mediante el método de lanzamiento de rayos. Los resultados mostrados en las figuras corresponden a diferentes modelos específicos de comparación para verificar el funcionamiento del algoritmo, se observa que los resultados de los rayos trazados para modelos de 1, 2, 3 y 10 rayos tienen apariencia muy similar a los resultados mostrados por el software. Adicionalmente las validaciones de potencia recibida muestran que los valores obtenidos con el algoritmo se ajustan a los resultados analíticos y del software comercial, generando diferencias inferiores a 3 dB en cada modelo realizado con variaciones de separación entre el transmisor y el receptor desde 1 metro hasta 20 metros. al software fue de 1.07 y el error relativo promedio 3.85%.

Se obtiene también una buena aproximación del mapa de cobertura, para realizar predicción de potencia en un escenario específico. Sin embargo, en algunos sectores del mapa de cobertura la diferencia es grande debido a que el software tiene un lanzamiento de rayos con mayor precisión que el algoritmo desarrollado, se tienen en cuenta rayos de todos los ángulos incluyendo 0 y múltiplos de 90°, los cuales en el algoritmo desarrollado no se tienen en cuenta. El valor promedio de la diferencia de dB entre ambos datos obtenidos es 6.02 dB.

Es una herramienta que presenta aportes en el ámbito académico para realizar validaciones de métodos teóricos, predicciones de cobertura de señal, obteniendo buenos resultados si el escenario es descrito correctamente y se lanzan un número considerable de rayos.

Como líneas de futuro trabajo se puede considerar incluir mayor cantidad de fenómenos en los rayos, proyectar los escenarios en 3 dimensiones, optimizar el código desarrollado a una manera más eficiente de resolver los casos presentados.

VI. RECOMENDACIONES

Para investigaciones futuras se recomienda tomar en cuenta los parámetros electromagnéticos (permitividad, permeabilidad y conductividad, de forma compleja) de cada material para aumentar la precisión. Estimando que esta inclusión produce un efecto no deseado en el tiempo de procesamiento (aumento).

VII. REFERENCIAS

- [1] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, "Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos: Una revisión sistemática," *Sist. Telemática*, vol. 12, no. 30, pp. 87–101, 2014.
- [2] A. Cavalcante and M. Sousa, "Computational parallelization strategy applied in full 3D ray-tracing wireless channel modeling," *Int. Microw. Optoelectron. Conf.*, 2005.
- [3] G. C. Montiel, "Aplicación Voip Para Dispositivos Móviles Sobre Redes Wifi Privadas," *Rev. Vínculos*, vol. 8, no. 1, pp. 44–50, 2011.
- [4] H. Zhang, J. Guo, X. Xie, R. Bie, and Y. Sun, "Environmental effect removal based structural health monitoring in the internet of things," *Proc. - 7th Int. Conf. Innov. Mob. Internet Serv. Ubiquitous Comput. IMIS 2013*, pp. 512–517, 2013.
- [5] M. Zemed and K. Technologies, "Explosion of the Internet of Things: What does it mean for wireless devices?," no. June, 2015.
- [6] M. Batty et al., "Smart cities of the future," *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 214, no. 1, pp. 481–518, Nov. 2012.
- [7] A. Sun, S., Rappaport, T. S., Thomas, T., & Ghosh, "A Preliminary 3D mmWave Indoor Office Channel Model," in *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 26–31.
- [8] T. Kürner and A. Meier, "Prediction of outdoor and outdoor-to-indoor coverage in urban areas at 1.8 Ghz," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 496–506, 2002.
- [9] J. Gomez, D. Guevara, and A. Navarro, *Estimación de canal MIMO en ondas milimétricas mediante motores de juegos y aceleración por hardware*. Santa Marta D.T.C.H.: Unversidad del Magdalena, 2018.
- [10] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, "A Proposal to Improve Ray Launching Techniques," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 143–146, 2019.
- [11] Universidad de Sevilla, "CAPÍTULO 7: TÉCNICA DEL TRAZADO DE RAYOS," pp. 163–196.
- [12] V. Degli-Esposti, "Ray Tracing Propagation Modelling: Future Prospects," *8th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2014)*, no. EuCAP, pp. 2232–2232, 2014.
- [13] H. Bertoni, S. Torrico, and G. Liang, "Predicting the radio channel beyond second-generation wireless systems," *Antennas Propag. ...*, vol. 47, no. 4, 2005.
- [14] V. Erceg, S. J. Fortune, J. Ling, A. J. Rustako, and R. A. Valenzuela, "Comparisons of a computer-based propagation prediction tool with experimental data collected in urban microcellular environments," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 15, no. 4, pp. 677–684, 1997.
- [15] A. G. Kanatas, "A UTD Propagation Model in Urban Microcellular Environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, no. 1, pp. 185–193, 1997.
- [16] K. H. Ng, E. K. Tameh, A. Doufexi, M. Hunukumbure, and A. R. Nix, "Efficient multielement ray tracing with site-specific comparisons using measured MIMO channel data," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 3, pp. 1019–1032, 2007.
- [17] A. M. Cavalcante, M. J. De Sousa, J. C. W. A. Costa, C. R. L. Francês, and G. P. Dos Santos Cavalcante, "A new computational parallel model applied in 3D ray-tracing techniques for radio-propagation prediction," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 3, pp. 1859–1862, 2006.
- [18] T. Zhou, H. Sharif, M. Hempel, P. Mahasukhon, W. Wang, and S. Ci, "A novel ray tracing based multipath modeling approach for site-specific WLAN simulations," *IEEE Int. Conf. Commun.*, 2009.
- [19] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, "Prediction of delay spread using ray tracing and game engine based on measurement," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2015, pp. 1–5, 2015.
- [20] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge

University Press, 2005.

- [21] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, S. Jain, M. L. Lord, and R. Singh, "Path Loss, Scattering, and Multipath Delay Statistics in Four European Cities for Digital Cellular and Microcellular Radiotelephone," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 4, pp. 721–730, 1991.