

Comparación de una red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación de soja

Comparison of a LoRaWAN network with propagation models in a soybean vegetation environment

Adrián Jaszczyszyn^{#1}, Marcelo Guiguet^{#2}, Hugo Ramón^{#3}

[#]Instituto de Investigación y Transferencia en Tecnología - Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires - Argentina

¹ adrian.jaszczyszyn@itt.unnoba.edu.ar

² marcelo.guiguet@itt.unnoba.edu.ar

³ hugo.ramon@itt.unnoba.edu.ar

Recibido: 30/09/24; Aceptado: 02/12/24

Resumen— Las redes LPWAN son sistemas inalámbricos de bajo consumo energético y gran alcance, diseñadas principalmente para conectar dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) a la red. En el sector agroindustrial, el IoT está revolucionando la industria a través de la implementación de técnicas avanzadas de agricultura inteligente o de precisión. Una de las tecnologías clave para alcanzar este objetivo es LoRa, junto con la arquitectura de red LoRaWAN, aplicada en prácticas agrícolas tradicionales. El presente trabajo analiza la comparación de mediciones realizadas por nodos ubicados a diferentes alturas en relación con un gateway, evaluando diversos modelos de pérdidas de propagación, además de modelos específicos que consideran el exceso de vegetación. Todo esto en una infraestructura basada en LoRaWAN, dentro de un entorno rural dedicado al cultivo de soja.

Palabras clave: IoT; LoRaWAN; modelos de propagación con vegetación.

Abstract— LPWAN networks are low-power, long-range wireless systems, primarily designed to connect Internet of Things (IoT) devices to the network. In the agro-industrial sector, IoT is revolutionizing the industry through the implementation of advanced smart or precision agriculture techniques. One of the key technologies to achieve this goal is LoRa, together with the LoRaWAN network architecture, applied in traditional agricultural practices. This work analyzes the comparison of measurements made by nodes located at different heights in relation to a gateway, evaluating various propagation loss models, as well as specific models that consider excess vegetation. All this in a LoRaWAN-based infrastructure, within a rural environment dedicated to soybean cultivation.

Keywords: IoT; LoRaWAN; propagation models with vegetation.

I. INTRODUCCIÓN

Las tendencias actuales y las oportunidades emergentes en el ámbito de IoT para el área agroindustrial están

vinculadas a la adopción de tecnologías de redes de área amplia de bajo consumo (Low Power Wide Area Networks, LPWAN). Estas soluciones se destacan por ofrecer bajas tasas de transmisión de datos, coste reducido, extensos rangos de cobertura y bajo consumo energético. Entre las distintas tecnologías LPWAN disponibles, LoRaWAN ofrece, además de las características mencionadas, la ventaja de basarse en un estándar abierto, proporcionar seguridad integrada y permitir implementaciones privadas.

Según la documentación oficial de la LoRa Alliance® y Semtech [1][2], LoRaWAN es un protocolo de comunicación basado en un estándar abierto para la capa de acceso, mantenido por la LoRa Alliance®. Este protocolo define tanto la comunicación como la arquitectura de red. La capa física LoRa emplea una técnica de modulación de espectro ensanchado derivada del Chirp Spread Spectrum (CSS), facilitando la comunicación de largo alcance para redes de dispositivos inalámbricos de bajo consumo [2]. La modulación LoRa permite ajustar tres parámetros que influyen en el desempeño del enlace de comunicación: BandWidth (BW), Spread Factor (SF) y Coding Rate (CR) [3].

LoRa utiliza seis factores de propagación (SF7 a SF12), y la combinación de diferentes SF y BW resulta en diversas tasas de datos, Data Rate (DR). El SF establece un equilibrio entre la velocidad de transmisión de datos y el rango de cobertura. Un SF mayor, reduce la velocidad de datos pero aumenta el alcance, incrementando el tiempo en el aire y el consumo energético, mejorando la resistencia a interferencias y distancias más largas. Además, junto con estos factores de propagación, se aplican técnicas de corrección de errores que mejoran la sensibilidad del receptor. La selección de valores más altos para SF y CR afecta el tiempo de ocupación del canal [3][4]. LoRa ofrece tres valores de BW: 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz [5], así como cuatro valores posibles de CR: 1, 2, 3 y 4, correspondientes a las tasas de codificación 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8, respectivamente. La codificación reduce la tasa de

errores de paquetes y añade símbolos de control para detectar e incluso poder determinar los valores correctos.

En una red LoRaWAN la inteligencia y la complejidad se centra en el servidor de red o network server, quien es el que administra la red, como muestra la Fig. 1. Los nodos no están asociados con un gateway específico y cada gateway reenvía el paquete recibido por el nodo al servidor de red a través de alguna red celular, Ethernet o WiFi. El servidor de red filtra los paquetes recibidos redundantes, realiza las verificaciones de seguridad y es el que envía los datos hacia el servidor de aplicación [2].

LoRaWAN define el protocolo de comunicación que permite la administración de la comunicación entre los distintos gateways y los nodos. El protocolo y la arquitectura de la red tienen la mayor influencia en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y las distintas posibilidades de conexión a aplicaciones [2].

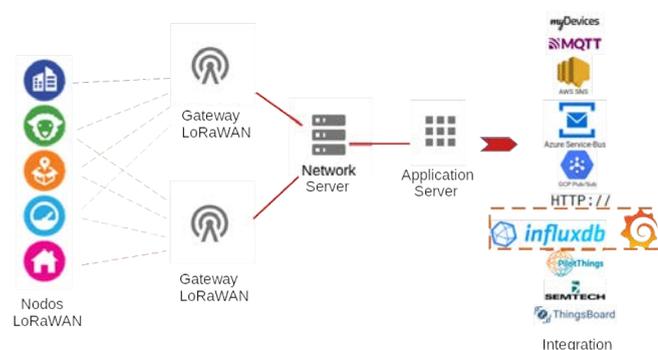


Fig. 1. Arquitectura de la red LoRaWAN

LoRaWAN permite dos tipos de activaciones de un nuevo nodo que se une a la red, Activation By Personalization (ABP) es el modo más sencillo y Over-The-Air-Activation (OTAA) es la manera más segura de conectarse a la red y la recomendada. A su vez, la comunicación es bidireccional y existen tres tipos de clases de nodos: Clase A: Es ideal para dispositivos que utilizan batería, debido a que solo escuchan con un par de ventanas de recepción luego de enviar datos. Clase B: Este tipo de dispositivos tienen las ventanas de recepción en base a tiempos predeterminados con el gateway, permite reducir la latencia y optimizar el uso de batería. Clase C: Esta clase de nodo ofrece el menor ahorro de energía debido a que se encuentra la mayor parte en modo escucha, de esta manera está preparado para minimizar la latencia de los mensajes. LoRaWAN fue pensado y diseñado para operar en la banda de frecuencias no licenciadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM) y en Argentina opera en la banda AU915.

En los sistemas de comunicación inalámbrica, la señal emitida por la antena del transmisor experimenta múltiples transformaciones a lo largo de su trayectoria por el medio de propagación, llegando al receptor sólo una pequeña parte de la señal original, dado que en los sistemas de radiofrecuencia intervienen fenómenos como la reflexión, la difracción y la dispersión, los cuales afectan la propagación de la señal recibida. Para caracterizar este comportamiento,

se utilizan los modelos de propagación, que consisten en un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos que describen cómo se comporta la transmisión de radio en un entorno dado. Existen diferentes tipos de modelos para predecir la atenuación de señales. Los modelos empíricos se basan en observaciones y experiencias previas, proporcionando fórmulas que se ajustan de manera general al entorno de interés. Por otro lado, los modelos deterministas emplean principios físicos para calcular la atenuación, proporcionando resultados basados en leyes físicas en ese entorno particular [6][7][8].

La recomendación UIT-R P.525-4 [9], última aprobada y puesta en vigor en agosto de 2019, para el cálculo de la atenuación en el espacio libre, indica que para enlaces punto a punto, la pérdida básica de transmisión en el espacio libre se expresa como:

$$L_{bf} = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) [\text{dB}] \quad (1)$$

donde, L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre y d : distancia, λ : longitud de onda; se expresan en las mismas unidades.

El L_{bf} se expresa en decibelios (dB) y puede representarse en función de la frecuencia en lugar de la longitud de onda [8][10], y se formula de la siguiente manera:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

donde, f : frecuencia en megahercio (MHz) y d : distancia en kilómetros (km).

Otro modelo es el de reflexión terrestre de dos rayos o también conocido como Two-Ray Model Path Loss, se fundamenta en los principios de la óptica geométrica y considera el componente de la transmisión directa desde el transmisor al receptor y el componente de reflexión en la superficie terrestre. La ecuación incorpora la distancia entre las antenas del transmisor y el receptor y las alturas de las antenas expresadas en metros, como muestra la ecuación:

$$L_{pe} = 40 \log d - 20 \log h_t - 20 \log h_r \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

En presencia de vegetación, el modelo de espacio libre o el modelo de reflexión terrestre de dos rayos no predicen adecuadamente la atenuación del canal. Esto se debe a la obstrucción causada por cultivos o árboles, que puede provocar que la señal se refleje, se difracte o se disperse, resultando en un desvanecimiento de la señal. Además, factores como los cambios en la densidad de la vegetación, el movimiento de los componentes vegetales, y condiciones ambientales como el viento, la lluvia y la humedad, también influyen en la atenuación de la señal [8].

Para predecir la pérdida de la señal de propagación en presencia de vegetación, se utilizan modelos de propagación

con exceso de atenuación vegetativa, algunos de los modelos empíricos de pérdida de trayectoria más utilizados se expresan en función de la frecuencia de la señal y la profundidad de la vegetación en función del modelo de decaimiento exponencial, ver Fig. 2. Los modelos que proporcionan una explicación de la propagación de ondas de radio en presencia de vegetación pueden ser el modelo ITU-R (International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector), el modelo FITU-R (Fitted ITU-R), el modelo LITU-R (Lateral ITU-R), el modelo COST235 (European Cooperation in Science and Technology - COST) y el modelo Modified Exponential Decay (MED) de Weissberger [11][12][13].

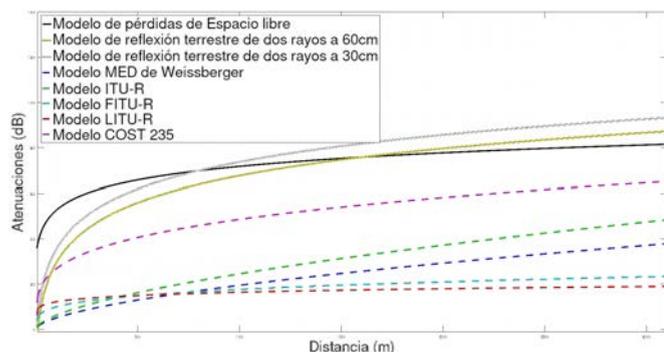


Fig. 2. Modelos de pérdidas de propagación y modelos de atenuaciones en presencia de vegetación

Las atenuaciones de propagación debida a la vegetación $Att_{(apv)}$, tienen un formato general que puede ser expresado por la siguiente expresión:

$$Att_{(apv)} = X f^Y d^Z \text{ [dB]} \quad (4)$$

donde X, Y, y Z son variables de valores ajustados obtenidos de medidas. Una tabla resumen sería la siguiente:

TABLA I

RESÚMEN DE VALORES EMPÍRICOS PARA DISTINTOS MODELOS CON VEGETACIÓN, EN COLOR AZUL SON LOS UTILIZADOS EN LOS CÁLCULOS

Modelo	X	Y	Z	Condiciones
MED de Weissberger	1,33	0,284	0,588	14m < d <= 400m
	0,45	0,284	1	0m <= d <= 14m Para f entre 230 MHz - 95000 MHz
ITU-R	0,2	0,3	0,6	0m <= d <= 400m Para f entre 230 MHz - 95000 MHz
FITU-R	0,37	0,18	0,59	árboles sin follaje
	0,39	0,39	0,25	árboles con follaje Para f entre 11,2 GHz and 20 GHz
LITU-R	0,48	0,43	0,13	Para bandas VHF y UHF, f entre 240 MHz - 700 MHz
COST235	26,6	-0,2	0,5	árboles sin follaje
	15,6	-0,009	0,26	árboles con follaje Para f entre 9,6 GHz-57,6 GHz y arboledas pequeñas menores a 200 metros

II. DESARROLLO

Se evalúa la calidad de la señal de los nodos ubicados a diferentes alturas y el gateway, analizando la influencia de obstrucción de la vegetación de la soja. Se toma como base la potencia de recepción que va a ser igual a la potencia de transmisión, más las ganancias del transmisor y receptor, menos las atenuaciones de pérdida de espacio libre o dos rayos, según sea el caso de evaluación, menos las atenuaciones de propagación provistas por la vegetación:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{bf} \text{ o } L_{pe} - Att_{(apv)} \quad (5)$$

Se utiliza el RMSE, la raíz cuadrática media, para medir la desviación promedio de las predicciones del modelo con respecto a los valores reales.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_{real} - x_{pred})^2} \quad (6)$$

Siendo, n el número de observaciones en el conjunto de datos de prueba; x_{pred} son las predicciones del modelo; y_{real} son los valores reales observados. Cuanto menor sea el valor del RMSE, mejor será la precisión del modelo.

A. Armado de escenario

El escenario de prueba se desarrolló en una parcela de una hectárea dedicada al cultivo de soja, ubicada en un campo de la zona núcleo del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Esta parcela contenía hileras de plantación de aproximadamente 10 metros de longitud, con una separación de 1,5 metros entre cada hilera. La experiencia se llevó a cabo en 4 (cuatro) ubicaciones, con distancias que oscilan entre 230 y 310 metros entre el gateway y los nodos, además de una obstrucción máxima de 89 metros de soja. La toma de muestras se realizó durante el estadio fenológico R3-R4 de la soja [14], momento en el cual las hojas se encuentran completamente desarrolladas, lo que resultó propicio para el análisis de distintos modelos de propagación en un entorno con vegetación abundante.

Las ubicaciones de los cuatro puntos de toma de datos, junto con las distancias al gateway y la distancia con vegetación en cada sitio, se presentan en la Tabla II:

TABLA II
PUNTOS Y DISTANCIAS DE TOMA DE DATOS

Puntos	Distancia al Gateway	Distancia con soja
1do Punto	230m	12m
2do Punto	250m	30m
3er Punto	280m	64m
4to Punto	310m	89m

La configuración y los parámetros del gateway y los nodos utilizados para la experiencia se encuentran en la Tabla III.

Tabla III
PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS Y GATEWAY

Altura del gateway	7 metros
Alturas de los nodos	Nodo RAK5205_01 – 0,3 metros Nodo RAK5205_03 – 0,6 metros
Altura de la soja	0,8 - 0,9 metros
Selección de parámetros	Protocolo LoRaWAN V1.0.2b frecuencia: AU915 Activación por OTAA Clase:A Sin confirmación Sin ADR CR:4/5 BW:125kHz PTx : 20 dBm GTx : 3 dB GRx : 2 dB DR2: LoRa: SF10, 125 kHz, sensibilidad:-130dBm DR5: LoRa: SF7, 125 kHz, sensibilidad:-123dBm Envío de 43 bytes en intervalos de 60 segundos

III. RESULTADOS

El RMSE del modelo de espacio libre, junto con las atenuaciones de los modelos en presencia de vegetación, arrojaron los siguientes resultados:

Tabla VI
TABLA DE RMSE CON EL MODELO DE ESPACIO LIBRE Y ATENUACIONES CON VEGETACIÓN

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	27,534	27,012	7,774	29,781	27,052
RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	26,727	26,441	4,358	28,603	25,592
RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	17,994	17,376	9,589	20,488	18,012
RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	15,125	14,681	11,278	17,365	14,784

Los resultados del RMSE para el modelo de reflexión terrestre de dos rayos y las atenuaciones con los modelos en presencia de vegetación se presentan en la Tabla V.

Tabla V
TABLA DE RMSE CON EL MODELO DE REFLEXIÓN TERRESTRE DE DOS RAYOS Y ATENUACIONES CON VEGETACIÓN

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	17,541	16,967	10,682	19,892	17,417
RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	16,423	16,146	9,694	18,361	15,498
RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	13,995	13,277	13,355	16,662	14,485
RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	11,043	10,511	15,471	13,473	11,273

La propagación de las ondas de radio entre los nodos y el gateway se ve afectada por la presencia de soja, que bloquea la línea de visión a partir de los 230 metros. Esta obstrucción conlleva a una pérdida de potencia de la señal a medida que aumenta la distancia. La Fig. 3 presenta las curvas según la ecuación 5, que muestran las pérdidas de espacio libre, junto con los modelos de atenuación por vegetación para los nodos RAK5205_01 y RAK5205_03, ambos configurados con DR5 y los datos medidos con su curva de regresión.

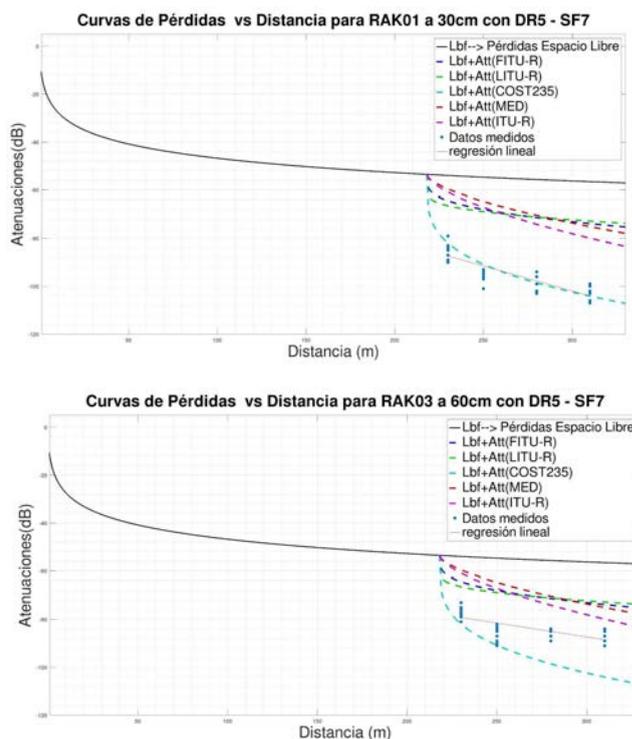


Fig. 3. Modelo de pérdidas de espacio libre y atenuaciones de vegetación para el nodo RAK5205_01 a 30 cm y RAK5205_03 a 60 cm con DR5

La Fig. 4 presenta las atenuaciones del modelo de dos rayos y los modelos de pérdida con vegetación de los nodos RAK5205_01 y RAK5205_03, ambos configurados con DR2.

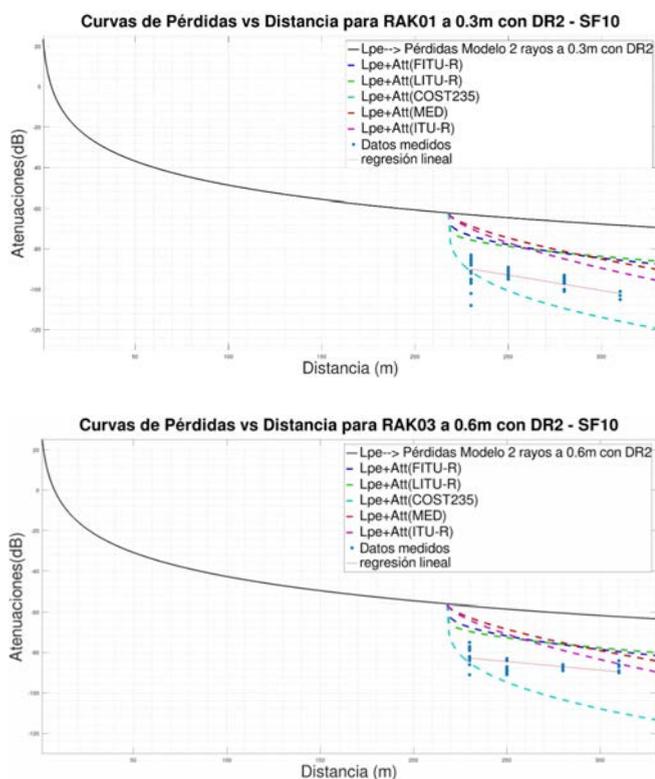


Fig. 4. Modelo de dos rayos y atenuaciones de vegetación para el nodo RAK5205_01 a 30 cm y RAK5205_03 a 60 cm con DR2

IV. CONCLUSIONES

Según señala Farhad en [15], la ubicación y elevación de las antenas de los nodos, junto con el spreading factor (SF), son fundamentales para la cobertura. En este estudio de caso, todos los datos enviados por los nodos configurados con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) fueron recibidos por el gateway debido a las distancias cortas (menos de 310 metros). Sin embargo, se observaron diferencias significativas en las atenuaciones debido a la vegetación de la soja según la altura de los nodos, como se muestra en las Fig. 3 y 4. El nodo RAK5205_01, ubicado a 30 cm del nivel del suelo, exhibió una pendiente más pronunciada que el RAK5205_03, situado a 60 cm, a medida que la distancia con la vegetación aumentaba.

En cuanto a la evaluación del RMSE los cálculos arrojaron que los modelos de atenuación con vegetación considerados en este estudio estiman las pérdidas de cultivos de soja a niveles de uno a dos dígitos para los RMSE de los modelos analizados, como se vio en las tablas V y VI.

Se alcanza la misma conclusión que en la investigación de Raheemah en [16], donde el modelo $L_{br}+Att_{(COST235)}$

mostró la mejor concordancia con las mediciones empíricas en comparación con otros modelos de atenuación con vegetación. Esta observación se confirma en la Fig. 3, donde el modelo $L_{br}+Att_{(COST235)}$ se aproxima a la curva de regresión lineal de los datos observados para el nodo RAK5205_01, logrando el menor RMSE: 4,358 para DR5.

Para el modelo de reflexión terrestre de dos rayos con las atenuaciones de los modelos con vegetación, los valores observados se ubicaron entre el $L_{pe}+Att_{(COST235)}$ y los otros modelos con vegetación, como se observa en la Fig. 4. En el caso del nodo RAK5205_01 para ambos DR, el modelo que mejor se ajusta es $L_{pe}+Att_{(COST235)}$, mientras que para el nodo RAK5205_03 en ambos DR, es $L_{pe}+Att_{(LITU-R)}$.

La precisión en la predicción de la pérdida de señal es crucial para el diseño y la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica eficientes y confiables. En entornos donde la vegetación como la soja en éste caso y otros obstáculos afectan la propagación de las ondas de radio, es fundamental utilizar modelos de atenuación precisos. En este estudio, observamos que el modelo $L_{br}+Att_{(COST235)}$ demostró una notable concordancia con las mediciones empíricas, con un RMSE por debajo de los dos dígitos para el nodo RAK5205_01 configurado con DR5. Este resultado subraya la importancia de seleccionar y validar modelos de propagación que consideren adecuadamente las condiciones específicas del entorno, incluyendo la altura de los nodos y las características de la vegetación. Estos hallazgos son esenciales para predecir con precisión la cobertura de señal, optimizar el rendimiento del sistema y asegurar una comunicación robusta y confiable en aplicaciones prácticas.

REFERENCIAS

- [1] Lora-Alliance (s.f.). What-is-lorawan. Consultado el 15 de septiembre de 2024, desde <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>
- [2] Semtech (s.f.). What is Lora. Consultado 15 de septiembre de 2024, desde <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [3] Semtech (2021). Portal para el desarrollador, documentos técnicos. Consultado el 15 de septiembre de 2024, desde <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [4] P. Pickering (2017). Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance. Consultado el 15 de septiembre de 2024, desde <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>
- [5] Semtech. (May 2015). LoRa™ Modulation Basics, AN1200.22 Application. Revisión 2. Consultado el 15 de septiembre de 2024, desde <https://www.fragalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>
- [6] Y. Okumura (1967). Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service (Vol. 16).
- [7] Á.C. Aznar, J. R. Robert., J.M.R. Casals, L.J. Roca, S.B. Bori., & M.F. Bataller (2004). Antenas. Univ. Politèc. de Catalunya.
- [8] T. Rappaport (2002). Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall PTR.
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2019). Recomendación UIT-R P.525-4 (08/2019)– Cálculo de la atenuación en el espacio libre. Consultado el 15 de septiembre de 2024, desde <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/es>.
- [10] P. de Fornel & H. Sizun (2006). Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications. Springer Berlin Heidelberg.
- [11] M.A. Weissberger (1982). An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees. ESD-TR-81-101,

- Electromagnetic Compatibility Analysis Center, Annapolis, Maryland USA, Final Report 833-7.
- [12] CCIR (1986). Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation. CCIR Report, 235-236
- [13] COST235 (1996). Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems.
- [14] D. Santos (2010). Fenología en el Cultivo de Soja: una "hoja de ruta". Segunda edición (2010). Consultado el 15 de septiembre de 2024, desde <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-fenologia-en-el-cultivo-de-soja-una-hoja-de-ruta.pdf>
- [15] A. Farhad, D.H. Kim, & J.Y. Pyun (2019). Scalability of LoRaWAN in an urban environment: A simulation study. 2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 677-681.
- [16] A. Raheemah, N. Sabri, M. Salim, P. Ehkan & R.B. Ahmad (2016). New empirical path loss model for wireless sensor networks in mango greenhouses. Computers and Electronics in Agriculture, 127, 553-560.