

Correlación del comportamiento de una arquitectura de red
LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con
vegetación

Tesista: Adrián Jaszczyszyn

Junio 2024

UNLP



EDUCACIÓN
PÚBLICA
Y GRATUITA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata

Correlación del comportamiento de una arquitectura de red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación

Tesis presentada para obtener el grado de Maestría en Redes

Tesista: Adrián Jaszczyszyn

Director **Hugo Dionisio Ramón**
Director del Instituto de Investigación y Transferencia en Tecnología de la UNNOBA

Director **Francisco Javier Díaz**
Secretario de Vinculación e Innovación Tecnológica de la UNLP

Junio 2024

Tesista: Adrián Jaszczyszyn

Correlación del comportamiento de una arquitectura de red LoRaWAN con modelos de propagación en un entorno con vegetación

Tesis presentada para obtener el grado de Maestría en Redes, Junio 2024

Directores: Hugo Dionisio Ramón y Francisco Javier Díaz

UNLP

Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata

Calle 50 y 120, La Plata

Código Postal: 1900 La Plata, Provincia de Buenos Aires

Resumen

Las redes LPWAN son redes inalámbricas de bajo consumo de energía y largo alcance que se utilizan principalmente para conectar dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) a internet. En el ámbito de la agricultura, IoT está transformando el futuro de la industria mediante la implementación de técnicas de agricultura inteligente o de precisión y una forma de lograr esto es mediante la tecnología LoRa con arquitectura de red LoRaWAN en las prácticas agrícolas tradicionales. Esto permite mejorar el manejo, la comprensión y control de las áreas de cultivo, lo que a su vez aumenta la eficiencia y la productividad. Sin embargo, en este proceso de transmisión de datos en la agricultura, pueden surgir obstáculos como la misma vegetación de los cultivos, los cuales afectan la calidad de la señal a lo largo de su recorrido. Para abordar este problema, hay modelos empíricos que consideran la pérdida de atenuación de la señal debido a la vegetación, a los cuales también se les debe agregar las pérdidas no relacionadas a la flora.

Este trabajo tiene como objetivo el armado de una infraestructura de red con tecnología LoRaWAN en una institución pública de la zona núcleo de la provincia de Buenos Aires, para analizar y evaluar el comportamiento con modelos de la propagación de datos en un entorno rural con vegetación. La implementación brinda una solución a la creciente demanda de IoT como así también, la oportunidad de interacción entre las distintas áreas dentro de la institución. Además, ofrece soporte para las actividades de investigación, educativas y el desarrollo de nuevas soluciones.

Abstract

LPWAN networks are low-power, long-range wireless networks primarily used to connect Internet of Things (IoT) devices to the internet. In the field of agriculture, IoT is revolutionizing the industry by implementing smart or precision farming techniques. One way to achieve this is through LoRa technology with LoRaWAN network architecture in traditional agricultural practices. This enables improved management, understanding, and control of cultivation areas, thereby increasing efficiency and productivity. However, during the data transmission process in agriculture, obstacles can arise, such as the vegetation within crops, which affect signal quality throughout its path. To address this problem, empirical models are used to consider signal attenuation due to vegetation, as well as other non-vegetation-related losses.

The objective of this work is to establish a LoRaWAN network infrastructure in a public institution in the core zone of Buenos Aires province, in order to analyze and evaluate data propagation behavior in a rural environment with vegetation. The implementation provides a solution to the growing demand for IoT, while also fostering interaction among different areas within the institution. Additionally, it supports research activities, educational endeavors, and the development of new solutions.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Introducción a las redes LPWAN y la importancia en la agricultura	1
1.2	Objetivo General	3
1.2.1	Objetivos específicos	3
1.3	Metodología	3
1.4	Resultados esperados	4
1.5	Motivación y estado del arte	5
1.6	Estructura de la tesis	9
2	Conceptos básicos antes de entender LoRa®	11
2.1	Principios de las comunicaciones de espectro extendido	11
2.2	Teorema de Shannon-Hartley	12
2.3	Principios del espectro ensanchado por secuencia directa (Direct Sequence Spread Spectrum) DSSS	14
3	Conceptos de la modulación LoRa®	17
3.1	Modulación LoRa®	17
3.2	Un poco de historia	17
3.3	Tecnología LoRa®	18
3.3.1	Modulación de frecuencia chirp	18
3.3.2	Desplazamiento en frecuencia FSK	19
3.3.3	Robustez	20
3.4	Parámetros que utiliza un canal de comunicación LoRa®	20
3.5	Chirp spread spectrum modulation - Modulación de espectro ensanchado por chirp	22
3.5.1	Ancho de banda BW	23
3.5.2	Spreading Factor SF	23
3.5.3	Tasa de codificación CR	25
3.5.4	Adaptive Data Rate ADR	26
4	LoRaWAN®	27
4.1	Conceptos LoRaWAN®	27
4.2	LoRaWAN®	27
4.2.1	Acceso a la red	30
4.2.2	Clasificación de dispositivos	30

4.2.3	Dispositivos de Clase A - dispositivos bidireccionales optimizando el bajo consumo	31
4.2.4	Dispositivos de Clase B: dispositivos bidireccionales con latencia downlink determinista	32
4.2.5	Dispositivos de Clase C: dispositivos bidireccionales con baja latencia	32
4.2.6	Bandas de espectro radioeléctrico de uso compartido	33
4.2.7	Estándar LoRaWAN®	34
4.2.8	Estructura de los canales	37
4.3	Distintos tipos de redes LoRaWAN®	41
4.3.1	The Things Network	42
4.3.2	ChirpStack	44
5	Modelos de propagación	45
5.1	Propagación de señales	45
5.2	Atenuación en espacio libre	46
5.3	Atenuación modelo de reflexión terrestre de dos rayos (Two-Ray Model Path Loss)	47
5.4	Zonas de fresnel	48
5.5	Modelos empíricos de propagación con vegetación	48
5.5.1	Modelo de decaimiento exponencial (MED) de Weissberger	49
5.5.2	Modelo ITU-R	50
5.5.3	Modelo FITU-R	50
5.5.4	Modelo LITU-R	50
5.5.5	Modelo COST235	51
5.5.6	Tabla resumen	51
6	Implementación de escenario de prueba y análisis de los resultados	55
6.1	Metodología de desarrollo	55
6.1.1	Tarea A: Selección y armado de escenario de prueba	56
6.1.2	Tarea B: Selección y armado de los nodos	58
6.1.3	Tarea C: Selección y armado del gateway	61
6.1.4	Tarea D: Implementación del servidor de red LoRaWAN	63
6.1.5	Tarea E: Implementación de la integración	65
6.1.6	Tarea F: Armado de dashboards de información	67
6.1.7	Cuadro resumen de parámetros	70
6.2	Análisis de las mediciones	70
6.2.1	Dashboard de comparación	71
6.2.2	Comparación de las mediciones con los distintos modelos	74
7	Conclusiones	91
7.0.1	Publicaciones y presentaciones derivadas de la investigación	95
7.0.2	Futuras líneas de investigación	96
	Bibliografía	97

Introducción

1.1 Introducción a las redes LPWAN y la importancia en la agricultura

Las redes LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) conocidas como redes inalámbricas que cubren una gran distancia, cuyo requerimiento energético es más bajo que el de otras redes, como las que se emplean en las comunicaciones por satélite o en telefonía, pero que pueden cubrir grandes superficies con gran eficiencia. Algunos de los protocolos de red LPWAN más comunes son LoRaWAN, Sigfox, Narrowband-IoT (NB-IOT) y la red Long Term Evolution for Machines (LTE-M) conocida como CAT-M1.

En cuanto a las tecnologías de NB-IoT y LTE-M son preferibles para aplicaciones que requieran calidad de servicio garantizada, baja latencia y fácil escalabilidad mientras que LoRa® o Sigfox presentan un menor costo, mayor cobertura y duración de baterías. Podemos concluir que LoRa® presenta ventajas en términos de duración de batería, implantación y coste, Sigfox ofrece ventajas en términos de cobertura, duración de la batería y coste mientras que NB-IoT y LTE-M ofrecen beneficios en términos de QoS, latencia y escalabilidad. Sigfox, LoRa al usar espectro sin licencia y que todos pueden usar ese espectro ISM, podrían surgir tecnologías aún más competitivas y más dispositivos se conecten en este espectro, y podría tener mayor riesgo de interferencia. Las tecnologías de Internet de las cosas (IoT) celular en espectro con licencia permitirían una conectividad en principio más confiable en grandes áreas manteniéndose a largo plazo por las empresas de telefonía (Hernández, M., 2018). Esta explicación se muestra en la Fig: 1.1 que se encuentra en la página 2

Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (FAO, 2009a) (FAO, Secretaría del Foro de Alto Nivel de Expertos, 2009) (FAO, 2009b) destaca el desafío de alimentar a una población mundial en constante crecimiento para el año 2050, donde se estima que la población mundial alcanzará los 9.7 billones de personas, y destaca la importancia de mejorar la productividad agrícola, reducir el desperdicio de alimentos y promover la sostenibilidad y la resiliencia en la agricultura. El artículo (Alexandratos & Bruinsma, 2012) marca la importancia de la biodiversidad en la agricultura, el papel en la adaptación al cambio climático y la importancia de la promoción de prácticas agrícolas sostenibles.

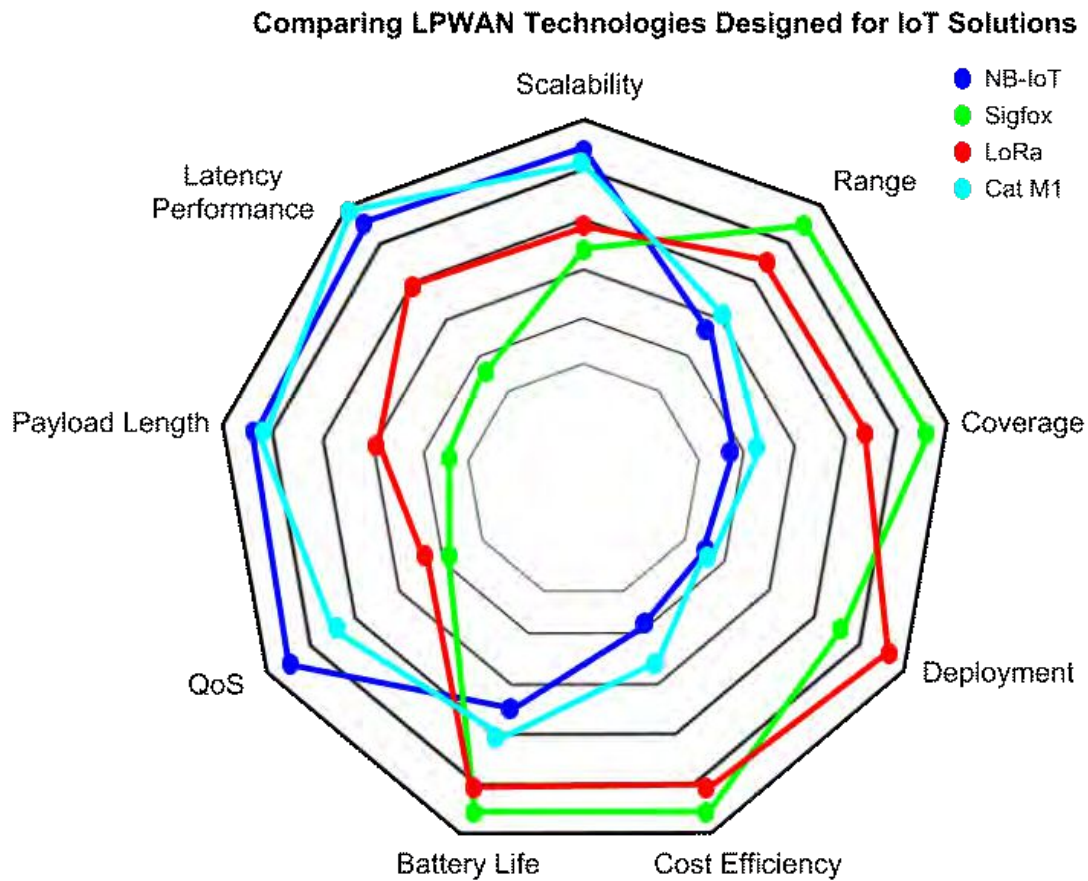


Fig. 1.1: Figura de comparación de redes LPWAN
fuente: (Hernández, M., 2018)

IoT está cambiando el futuro de la agricultura mundial a través de la agricultura inteligente, al conectar la tecnología LoRa con arquitecturas de red LoRaWAN en la agricultura tradicional, se puede mejorar la eficiencia y competitividad de la producción agrícola, permitiendo la monitorización en tiempo real de factores ambientales, lo que se traduce a la posibilidad de un ajuste al proceso de producción para mejorar la calidad de los productos agrícolas mejorando la calidad de los productos, la eficiencia, competitividad y el mejor manejo de los lotes en la agricultura (Gerardo, S., 2022).

1.2 Objetivo General

El objetivo del trabajo final de la maestría en redes es la correlación de distintos modelos de propagación en un entorno rural con un escenario real de una red LoRaWAN.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estudiar y evaluar la tecnología LoRa/LoRaWAN y modelos de predicción de propagación.
- Recolectar mediciones de una sede del campus universitario utilizando transeptores LoRaWAN para analizar y evaluar la propagación en un entorno rural con vegetación.
- Investigar, validar y correlacionar modelos de propagación mediante la comparación de los resultados de propagación empíricos y cálculos analíticos en un entorno rural con vegetación.
- Establecer y documentar las actividades y tareas realizadas a lo largo de la investigación.
- Proponer el armado de un escenario de prueba de una infraestructura red de tecnología LoRaWAN y aplicación web con información de nodos sensores.

El aporte de este trabajo brindará una evaluación y una posible solución a la creciente demanda de IoT en una zona rural, con la implementación a partir del escenario de prueba con tecnología LoRaWAN en una institución pública, para luego divulgar y utilizar la tecnología dentro del organismo.

1.3 Metodología

La metodología en esta tesis es de una investigación aplicada de un desarrollo tecnológico para la comparación y validación de distintos modelos de propagación en un entorno con vegetación, en este caso en una plantación de soja en estadio R3-R4 de su fenología donde las hojas se encuentran totalmente desarrolladas (Santos, 2010). El escenario propuesto es implementar una red IoT con LoRaWAN, realizando una integración de gateway y nodos LoRaWAN, como se muestra en la siguiente Fig. 1.2, en el ámbito rural, en particular en el campo experimental Las Magnolias perteneciente a una institución pública del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Se tomará en cuenta la altura y ubicación del gateway y parámetros de configuración en los nodos. Las transmisiones de los nodos serán recepcionados por un gateway, que a su vez las transmitirá a un Network Server, luego a un Application Server y por último a una integración con base de

datos InfluxDB ¹ y Grafana ² donde se graficarán los datos enviados por los nodos sensores, como por ejemplo: nivel de batería, temperatura, humedad, calidad del aire, ubicación del nodo en una aplicación de mapa OpenStreetMap ³ a través de GPS incorporado, incluyendo los valores de RSSI, SNR de las transmisiones.

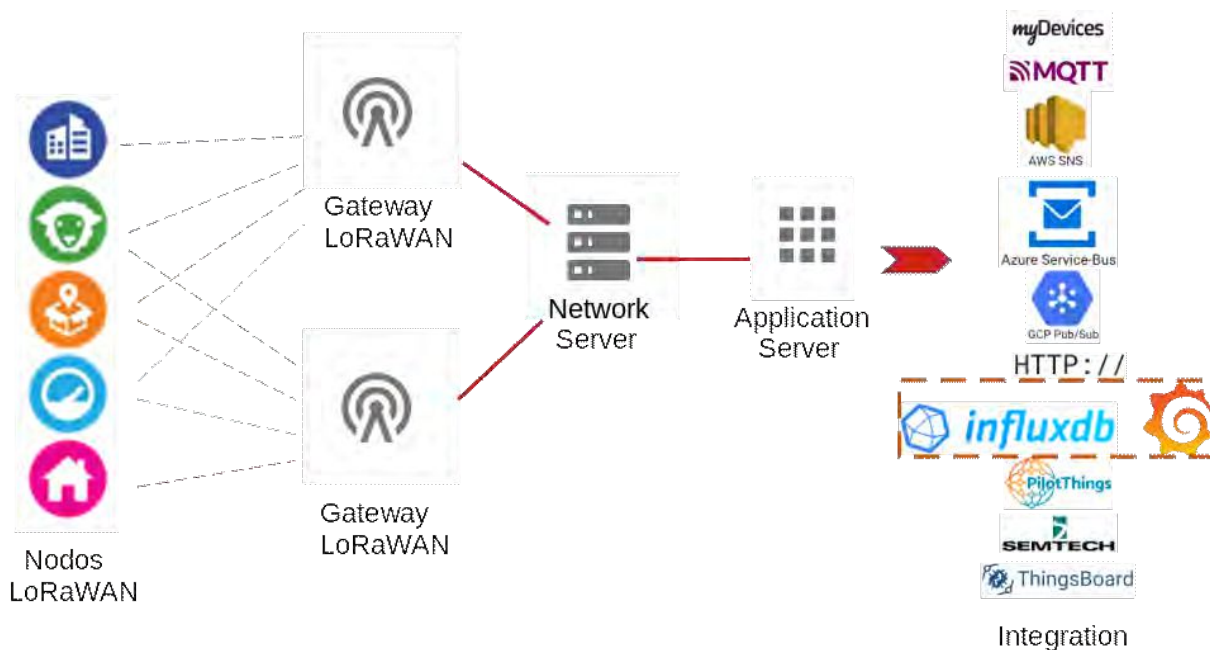


Fig. 1.2: Arquitectura de Red LoRaWAN propuesta
fuente: autor

1.4 Resultados esperados

En el marco del proyecto SIB2019 (UNNOBA, 2021) y (Ramón et al., 2019), *Tecnología y Aplicaciones de Sistemas de Software: Innovación en procesos, productos y servicios* se espera contribuir con una solución a la creciente demanda de IoT con una infraestructura de tecnología LoRaWAN en una Universidad. A si mismo, dar a conocer el desarrollo a las distintas áreas de la institución para que investigadores y alumnado puedan utilizar ésta tecnología para sus investigaciones y desarrollos de sus actividades prácticas dando valor a esta tecnología y tomar provecho de la misma.

¹InfluxDB base de datos de series temporales de código abierto. (<https://www.influxdata.com/>)

²Grafana proyecto de código abierto iniciado por Torkel Ödegaard en 2014, permite consultar, visualizar y alertar sobre métricas y registros. (<https://grafana.com/grafana/>)

³OpenStreetMap® es Open Data (un servicio de datos de acceso libre), con licencia Open Data Commons Open Database License (ODbL) de la Fundación OpenStreetMap (OSMF). (<https://www.openstreetmap.org/>)

1.5 Motivación y estado del arte

El análisis de los datos facilitados por Transforma Insights⁴, pronostica que la cantidad de dispositivos de IoT en todo el mundo casi se triplicará de 9.700 mil millones en 2020 a más de 29.000 millones de dispositivos de IoT en 2030 (Vailshery, L.S., 2022). De acuerdo con las tendencias tecnológicas de IoT más importantes para el 2022, se está convirtiendo en una tecnología crucial para la sostenibilidad, promoviendo aplicaciones para el monitoreo ambiental, gestión territorial y optimización de energía (Wilford, E., 2022). Philipp Wegner indica que según el informe de adopción de casos de uso de IoT se acelerará para 2022, debido a la pandemia, el mercado IoT también fue afectado y sólo creció un 12 % en 2020, casi la mitad de la tasa de crecimiento de 2019. Pero se espera que el gasto en IoT en las empresas en 2021 crezca un 24 % y más allá del 2021 crezca en 26,7 % anual, llegando a unos u\$s 411.900 millones de dólares para el 2025 (Wegner, P., 2021a) (Wegner, P., 2021b). En el mismo sentido en el paper de benchmark de la Secretaría de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Argentina.gob.ar, 2020) indica que para América Latina la tasa de crecimiento anual será de 27 % durante el periodo 2014–2024 en desarrollo de IoT y cantidad de conexiones a IoT pasará de 14,6 millones a 160 millones.

Para conexiones de área amplia de baja potencia (LPWA) en el análisis de Cisco (Cisco, 2020) la proporción de conexiones LPWA (todas M2M) crecerá de alrededor del 2,5 % en 2018 al 14 % en 2023, de 223 millones en 2018 a 1900 millones en 2023.

Gran parte de los dispositivos que están conectados a Internet, están utilizando una red LPWAN, que ofrecen conectividad de largo alcance con un bajo consumo a baja velocidad (Tecnología para los negocios, s.f.) (Pickering, P., 2017). Dentro de las bandas no licenciadas, las tecnologías más destacadas son LoRaWAN⁵, SigFox⁶ e Ingenu⁷. Entre las bandas licenciadas de los sistemas de tecnología celular se encuentran NB-LTE-M (Narrow Band LTE-M), NB-IoT (Narrow Band IoT) (Chung et al., 2018), LTE-MTC (Long Term Evolution Machine-Type) donde (3GPP)⁸ ha lanzado

⁴Transforma Insights es una firma de investigación enfocada al mundo de la Transformación Digital - <https://transformainsights.com/>

⁵LoRaWAN se refiere al stack de red completa para redes basadas en LoRa, mientras que LoRa se refiere a la tecnología de capa física. Es un protocolo de red de baja potencia y área amplia diseñado para conectar de forma inalámbrica 'cosas' que funcionan con baterías a Internet en redes regionales, nacionales o globales. Ofrece servicios de comunicación direccional, seguridad de extremo a extremo, movilidad y localización. <https://loralliance.org/about-lorawan>

⁶SigFox - Sigfox es una red de LPWA propietaria ofrecida por una compañía francesa. Actualmente, se trata de una de las redes LPWA más grandes del mundo y utiliza frecuencias sin licencia, de acuerdo al país y sus reglamentaciones. (<https://www.sigfox.com/>)

⁷Ingenu- La compañía Ingenu ofrece una tecnología que denomina RPMA (Random Phase Multiple Access) con un alcance de 5 a 10 kilómetros sin necesidad de línea de visión. Esta tecnología trabaja en el espectro de los 2,4 GHz. (<https://www.ingenu.com/>)

⁸3GPP - Proyecto de Asociación de 3ra Generación (3GPP) une a organizaciones de desarrollo de estándares de telecomunicaciones (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC). El proyecto cubre tecnologías de telecomunicaciones celulares, incluyendo acceso de radio, red central y capacidades de servicio, que proporcionan una descripción completa del sistema para telecomunicaciones móviles. (<https://www.3gpp.org/>)

mejoras en los estándares de las comunicaciones M2M, definidas en el Release 13 del estándar (3GPP, 2018).

Las tendencias y oportunidades como se describe en (Almuhaya et al., 2022) en tecnologías LPWAN van de la mano con la adopción de bajas tasas de transmisión de datos, bajo costo, largo alcance y bajo consumo, que puedan manejar fácilmente una gran cantidad de dispositivos. Entre las tecnologías LPWAN, LoRaWAN ofrece además de las anteriores descritas, utilizar un estándar abierto, seguridad integrada, posibilidad de implementaciones privadas y geolocalización sin GPS.

De acuerdo al informe de (Noticias, O. N. U., 2019) la población mundial aumentará en 2000 millones de personas para 2050, llegando el planeta a los 9000 millones de habitantes en ese año, y para mantener el ritmo del crecimiento demográfico previsto durante las próximas décadas, los procesos agrícolas que involucran la producción de alimentos tendrán que aumentar su producción. Según el artículo (Valdez Naval, G., 2018), la “agricultura de precisión” no se refiere necesariamente a obtener el mayor rendimiento sino a maximizar la eficiencia productiva. Por lo tanto, no es una práctica, es un sistema de manejo selectivo de los cultivos y del suelo de acuerdo a sus necesidades, que emplea conocimientos de numerosas disciplinas e integra información de herramientas tecnológicas y técnicas que permiten al productor tener una mejor comprensión y control de sus lotes productivos. Y para que la tecnología agrícola inteligente sea viable debe ser de bajo costo y amigable para los agricultores. Esta revolución va de la mano con la adopción de tecnologías de comunicación por ejemplo de bajo costo y largo alcance que puedan manejar fácilmente una gran cantidad de dispositivos sensores conectados sin consumir excesiva energía como por ejemplo las redes LPWAN y en particular LoRaWAN.

De acuerdo a la documentación oficial de la LoRa Alliance® y a la de Semtech (Semtech Corporation, 2019), LoRaWAN es un estándar abierto del protocolo MAC mantenido por la LoRa Alliance®, que define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema para la red, mientras que la capa física LoRa® habilita el enlace de comunicación de largo alcance, concebido para redes de dispositivos inalámbricos de bajo consumo. La modulación LoRa permite cambiar tres parámetros fundamentales que definen el desempeño del enlace de comunicación, estos son BandWidth (BW), Spread Factor (SF) y Code Rate (CR).

Hay varios equipos de investigación que están respondiendo a preguntas, entre ellas: ¿Cómo saber la cobertura de una red LoRa/LoRaWAN?

¿Qué parámetros en la arquitectura LoRaWAN son los adecuados para lograr una cobertura esperada?

¿Cómo predecir, verificar y contrastar la propagación en un entorno dado?

Estos equipos centran su análisis en caracterizar la cobertura, observando la relación de entrega de paquetes (PDR) con una ubicación. En el análisis de (Yousuf et al., 2018) demuestran que la cobertura interior es suficiente como para cubrir siete pisos de un edificio con una pérdida mínima de paquetes, la cobertura exterior depende mucho del medio ambiente, y logran un rango de 4.4 km con solo el 15 % pérdidas de paquetes, enfatizan tener en cuenta parámetros como SF y el tamaño del paquete que afectan en gran medida la cobertura. Otros como (Loriot et al., 2017) analizan la SNR en el interior de un complejo que tiene unos 18.000 m² y en el exterior de unos 325.000m² con 145 edificios de urbanización, mostrando que en distintos puntos de la universidad se tienen buenos rendimientos SNR utilizando un solo gateway. Lo mismo que en (Wixted et al., 2016) con un Gateway ubicado en el techo del campus de Glasgow Caledonian University, donde registran en movimiento los paquetes success/failure con ACK, hasta -120 dBm de recepción donde luego ya pierden todos los paquetes. También hay quienes comparan el impacto de RSSI, SNR, packet error rate (PER) con distintos SF y muestran que la modulación LoRa ofrece una buena resistencia a la interferencia (Ayele et al., 2017). En (Sanchez-Gomez et al., 2019) evalúan el PDR con SF7 / SF12 y el RSSI recibido en el gateway, en (Aref & Sikora, 2014) contrastan la distancia con distintas cargas de 10 bytes, 50 bytes y 100 bytes sacando como conclusión que el alcance se puede aumentar mediante la elección de modulación y esquemas de codificación adecuados, otros analizan el cambio de RSSI, SNR y PDR, en un conjunto de 1000 bloques de datos enviados (Bertoldo et al., 2019). Así como, en (Trinh et al., 2017) envían 20 paquetes en 20 segundos a un gateway viendo los valores de RSSI recibidos en distintos lugares dentro de los 12 pisos que realizan la prueba. Similar, experimento realizaron en una zona rural de Indiana con una plantación de árboles en los Estados Unidos (Yim et al., 2018), donde contrastan las diferencias de los cambios del PDR con la distancia y el RSSI, con distintos SF y AB. Investigaciones como (Farhad et al., 2019) sitúan interés en la ubicación y elevación de la antena del gateway, a su vez, ponen énfasis en la relevancia del SF en la cobertura de la red en un ámbito urbano.

En la ciudad de Oulu, Finlandia en (Petajarvi et al., 2015) siendo éste, uno de los artículos más citados en varias investigaciones, analizan el rango de cobertura de LoRa para dos escenarios: en la ciudad y en el mar. Comparan PER, RSSI y distancias principalmente bajo una condición de línea vista. El test fue hecho mientras el transmisor se mantenía estacionario y el receptor se movía por la ciudad en un vehículo y en un barco sobre el mar. Los autores compararon las mediciones del mundo real con un modelo de log-distance para derivar el exponente de pérdida de trayectoria y por lo tanto evaluar el rendimiento de propagación de LoRa en ambos escenarios. Lograron una cobertura de 10Km con una pérdida de paquetes del 33 % en la ciudad y en el mar rangos de 15Km y 30Km con una pérdida de paquetes de 31 % y 38 % respectivamente.

Como indica (Rappaport, 2002) en pagina 78, en los sistemas de comunicación por radiofrecuencia los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión impactan en la propagación de los mismos. Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado. Los modelos intentan pronosticar la cobertura con unas fórmulas obtenidas de la experiencia en parte o totalmente

como los modelos empíricos, que sólo se ajustan de forma genérica al entorno exacto dónde se quiere aplicar el modelo. Otro tipo de modelos, los deterministas, usan las leyes de la física para calcular los resultados en el entorno. (Okumura, 1967) (Aznar et al., 2004) (Rappaport, 2002). La señal emitida por una antena de un emisor va a experimentar múltiples transformaciones en su señal y camino a lo largo de su trayectoria por el medio de propagación, llegando al receptor solo una pequeña parte. A su vez cuando hay presencia de vegetación, el modelo de espacio libre no se puede utilizar para predecir la atenuación del canal porque hay una obstrucción del cultivo o de los árboles que puede hacer que la señal se refleje, se difracte o se disperse, lo que provocaría un desvanecimiento de la señal como se indicó anteriormente, además hay un impacto debido a los cambios en la densidad de la vegetación y movimiento de los componentes de la vegetación y otros factores como el viento, la lluvia, la humedad en el entorno.

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. Los modelos que proporcionan una explicación de la propagación de ondas de radio en presencia de vegetación pueden ser COST235 (European Cooperation in Science and Technology - COST), ITU-R (International Telecommunications Union-Radiocommunication Sector), FITU-R (Fitted ITU-R) y Modified Exponential Decay (MED) de Weissberger (Weissberger, 1982) (CCIR, 1986)

En vista a la propagación con vegetación los siguientes análisis serán tomados como referencia para ésta tesis: El Departamento de Electrónica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales de la Universidad Nacional de San Luis de Argentina junto con la Universidad de Ciencias Aplicadas de Bonn-Rhein-Sieg, Alemania (Insaurralde et al., 2020), analizan la aproximación de diferentes modelos de predicción de propagación en un entorno rural específico para simular el comportamiento del uso de tecnología LoRa. Proponen tres modelos empíricos para el cálculo de atenuación por vegetación, en este caso con maíz: IUT-R P.833-9, COST235, MED y otros tres modelos de cálculo de atenuación por espacio libre: Free-Space Path Loss (FSPL), Longley-Rice, Two-Ray Ground Model. Calculando las máximas distancias alcanzadas en campo despejado 6,6Km, parcialmente obstruido 3,26km y obstruido 0.85Km.

Los autores como en (Richardson Ansah et al., 2020) evalúan la propagación de la red LoRaWAN en un entorno de vegetación tropical para comprender el comportamiento del enlace de radio en dicho entorno para facilitar la planificación y gestión de redes a gran escala. Adoptan los modelos de propagación con vegetación COST235, ITU-R, MED de Weissberger y FITU-R. El experimento se llevó a cabo en una granja de cacao en Ghana y propusieron que el nodo se encuentre a una altura de 2m con diferentes distancias al receptor y a distintas alturas 10, 15, 20, 25, 30m. Utilizan la investigación (Petajajarvi et al., 2015) con RSSI y el SNR para calcular la pérdida de trayectoria en el espacio libre. En todas las distancias y alturas del receptor donde se recibió la señal, la recepción de paquetes fue de alrededor del 95 %, excepto para la altura del receptor de 10m, donde hubo una caída de paquetes del 100 % debido a un valle en la granja entre las distancias 2 y 3 km. Su

robustez y confiabilidad en presencia de factores ambientales como la temperatura y la humedad, junto con un largo alcance, lo convierten en una excelente opción para aplicaciones agrarias y particularmente en la mayoría de las fincas de cacao, que normalmente se encuentran en entornos de vegetación densa. En (Raheemah et al., 2016) analizan distintos modelos de vegetación en un invernadero de mango, donde se usan en conjugación con FSPL y el Two-Ray para predecir la pérdida de trayectoria total en un ambiente de invernadero de mango. En la investigación demuestran que los modelos de propagación FSPL y Two-Ray son inexactos cuando se usan con modelos de vegetación para predecir la pérdida de trayectoria total en entornos de vegetación. Los modelos divergieron en un 10,69 % y un 38,14 % de las medidas reales, respectivamente. El modelo basado COST 235 y FSPL tuvo el mejor rendimiento en comparación con las mediciones empíricas frente a otros modelos con follaje. Los autores realizaron mediciones empíricas de la intensidad de señal a diferentes distancias y ubicaciones dentro del invernadero de mango, y utilizaron estos datos para desarrollar y evaluar el nuevo modelo de pérdida de señal propuesto.

1.6 Estructura de la tesis

Hasta aquí, en el **Capítulo 1**, se presentaron la metodología, los objetivos de la tesis, los resultados esperados, junto con la motivación y estado del arte.

En el **Capítulo 2**, se muestra los principios de las comunicaciones de espectro expandido utilizando más ancho de banda para compensar la degradación de la señal a ruido del canal de radio y que se puede recuperar la información inmersa en ruido.

En el **Capítulo 3**, se explica algunos de los conceptos básicos de la modulación LoRa®, los distintos parámetros que utiliza, la modulación de espectro ensanchado por chirp y las ventajas que proporciona este esquema de modulación cuando se implementa en las redes de comunicaciones LoRa®.

En el **Capítulo 4**, se introduce en los conceptos de LoRaWan®, su arquitectura, el estándar, su trama, su estructura de canales y los distintos tipos de acceso y la clasificación los dispositivos que utilizan la red LoRaWan®.

En el **Capítulo 5**, se analizan distintos modelos empíricos de propagación de ondas de radio en presencia de vegetación. Se describe en detalle cada modelo.

En el **Capítulo 6**, se documenta el armado del escenario en el entorno rural, los equipos a utilizar, el procedimiento y consideraciones de los parámetros de las toma de datos, el armado del gateway e instalación y configuración del Network Server, Application Server e Integración con la base de datos y gráficas. Además, se realizan comparaciones de los resultados simulados con los datos medidos y se ofrecen algunas observaciones en base a los resultados.

Y por último, en el **Capítulo 7** se presenta las conclusiones con recomendaciones para trabajos futuros junto con las publicaciones en congresos y charlas en simposios.

Conceptos básicos antes de entender LoRa®

En este capítulo se vislumbra los principios de las comunicaciones de espectro expandido, que puede utilizar más ancho de banda, para compensar la degradación de la señal a ruido del canal de radio.

2.1 Principios de las comunicaciones de espectro extendido

El espectro extendido o ensanchado se ha utilizado en comunicaciones militares y espaciales durante décadas debido a las largas distancias de comunicación que se pueden lograr y la solidez a la interferencia. Surge de una gran idea que tuvieron [Hedy Lamarr](#), actriz de la década del 40, de origen austríaco, que vivió en Estados Unidos y [George Carl Johann Antheil](#) compositor y pianista estadounidense. Ambos patentaron la primera versión del espectro ensanchado que permitiría las comunicaciones inalámbricas a larga distancia ¹. La idea que tuvieron Lamarr y Antheil, iba a servir para evitar que la información que se enviaba a los submarinos aliados y el sistema de guía o teledirigidos para los torpedos, en la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), pudiera ser interceptada. En ese momento, las comunicaciones por radio eran frágiles porque podían ser escuchadas y localizadas fácilmente. Su idea en ese momento estuvo lejos de utilizarse, pero luego tuvo su auge. El planteo fue, distribuir la información a lo largo de múltiples frecuencias, en base a una secuencia entre emisor y receptor de información, de ésta manera, el receptor puede recuperar la información conociendo la secuencia y los que quisieran realizar algún tipo de interferencia o de recuperar esa información si no se tiene la clave de variación de frecuencia lo único que obtienen es lo que parece ser ruido (SEMAK S.A., 2018).

La figura Fig. 2.1 que se encuentra en la página 12 representa una señal de banda estrecha en el dominio de la frecuencia. Estas señales de banda estrecha se bloquean fácilmente con cualquier otra señal en la misma banda. Además, la señal se puede interceptar ya que la banda de frecuencia es fija y estrecha o sea, fácil de detectar.

¹El 10 de junio de 1941, Markey Hedy Kiesler, Antheil George presentaron al registro la solicitud de patente: "[SECRET COMMUNICATION SYSTEM](#)" y fue otorgada el 11 de agosto de 1942.

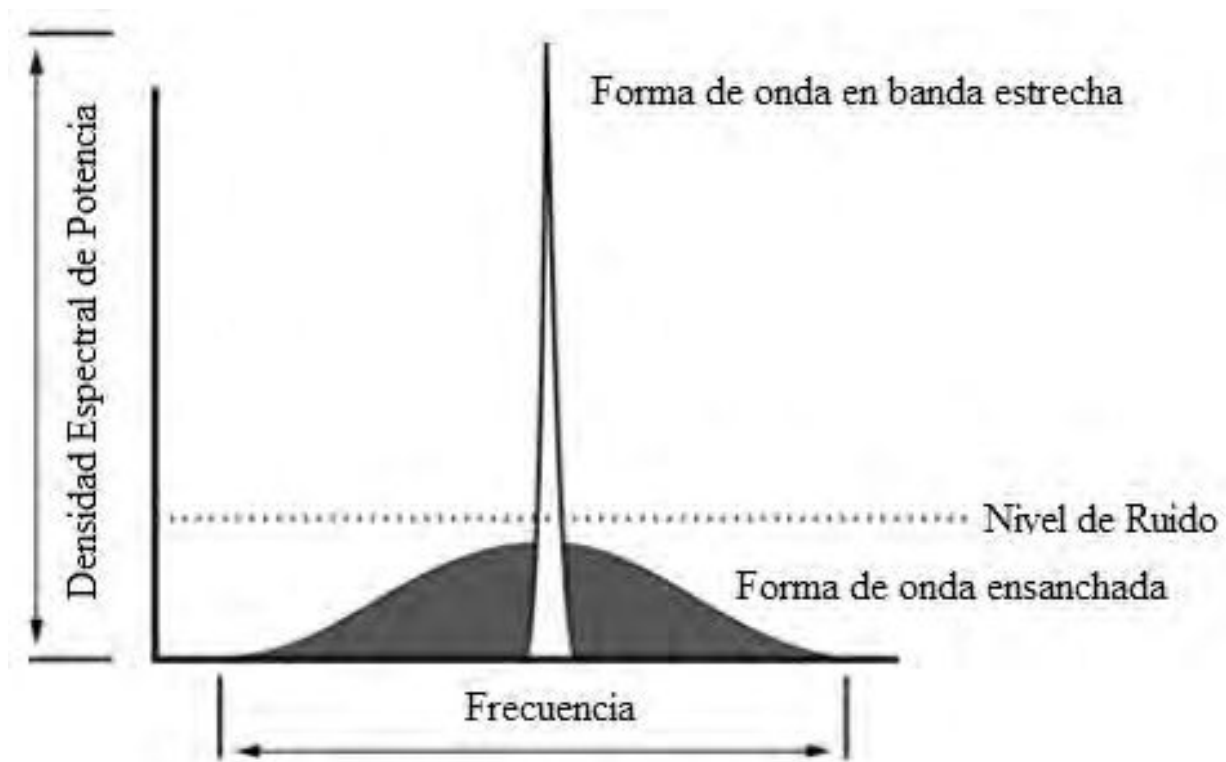


Fig. 2.1: Señal de banda estrecha, fácil de interferir o interceptar (De The original uploader was Quesada de Wikipedia en español. - Transferido desde es.wikipedia a Commons., CC BY-SA 3.0) fuente:(Quesada, 2004)

Como conclusión, la idea detrás del espectro extendido o ensanchado es utilizar más ancho de banda que el mensaje original, manteniendo la misma potencia de señal. Una señal de espectro ensanchado, no tiene un pico claramente distinguible en el espectro. Esto hace que la señal sea más difícil de distinguir del ruido y por lo tanto, más difícil de bloquear o interceptar.

2.2 Teorema de Shannon-Hartley

Toda discusión sobre las técnicas de espectro ensanchado no estaría completa sin una reseña del *teorema de Shannon-Hartley*. En la teoría de la información, “el teorema de Shannon-Hartley establece la velocidad máxima a la que se puede transmitir información a través de un canal de comunicaciones de un ancho de banda específico en presencia de ruido”. El teorema indica la máxima cantidad de datos digitales que pueden ser transmitidos sin error (esto es, información) que pueden ser transmitidos sobre dicho enlace de comunicaciones con un ancho de banda específico y que está sometido a la presencia de la interferencia del ruido. (Semtech, 2015)

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.1)$$

A este resultado se le llama la “Ecuación de Hartley-Shannon”, en reconocimiento del trabajo pionero de Hartley y la deducción hecha por Shannon

B: ancho de banda del canal [Hz]

C: capacidad del canal [bit/s]

S: potencia media de la señal recibida [vatios]

N: potencia de interferencia o ruido promedio potencia del ruido presente en el canal, que trata de enmascarar a la señal útil. [vatios]

S/N: relación señal/ruido (SNR) expresada como una relación de potencia lineal

Manipulando la ecuación (2.1) con logaritmos neperianos, desde \log_2 al logaritmo natural y $\ln = \log_e$ la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{C}{B} = 1,433 \frac{S}{N} \quad (2.2)$$

Para aplicaciones de espectro extendido, la relación señal a ruido (S/N) es pequeña, ya que la potencia de la señal suele ser inferior al piso de ruido. Suponiendo un nivel de ruido, tal que S/N es mucho menor a 1, la ecuación (2.2) se puede reescribir como:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \text{ o } \frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (2.3)$$

Esto es, ruido mayor a señal, es decir, señal que se encuentra inmersa en ruido, entonces, la pregunta es *¿cómo se puede recuperar la información inmersa en ruido?*

De la ecuación (2.3) se observa que la relación ruido a señal es prácticamente proporcional a la relación entre el ancho de banda y la capacidad de datos, de esta manera, si se aumenta el ancho de banda se puede transmitir información sin errores en un canal de relación ruido a señal fijo, tal que, se puede recuperar la señal de información por más que esté inmersa en ruido.

A su vez, en particular como indica (Islam, 2010) por este método, se puede aumentar la distancia entre comunicaciones, ya que la intensidad de una señal radioeléctrica decrece con el cuadrado de la distancia, con lo cual a medida que uno se aleja, la intensidad de la señal disminuye y el ruido se incrementa por la distancia.

Se puede concluir que si se incrementa el ancho de banda, se puede compensar la degradación de la señal a ruido del canal de radio.

2.3 Principios del espectro ensanchado por secuencia directa (Direct Sequence Spread Spectrum) DSSS

En un sistema tradicional o de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS), la fase portadora de la señal del transmisor cambia de acuerdo con una secuencia de código como se muestra en la Fig.2.2. Al multiplicar la señal de datos con un patrón de bits predefinido a una velocidad mucho mayor, también conocido como código de expansión (o secuencia de chip), se crea una señal “más rápida” que tiene componentes de frecuencia más alta que la señal de datos original. Esto significa que el ancho de banda de la señal se extiende más allá del ancho de banda de la señal original. En terminología de radio frecuencia, los bits de la secuencia de código se denominan chips (para distinguir entre los bits más largos y no codificados de la señal de datos original). Cuando la señal transmitida llega al receptor, se multiplica por una copia idéntica del código de expansión utilizado en el transmisor, lo que da como resultado una réplica de la señal de datos original. (Semtech, 2021a)

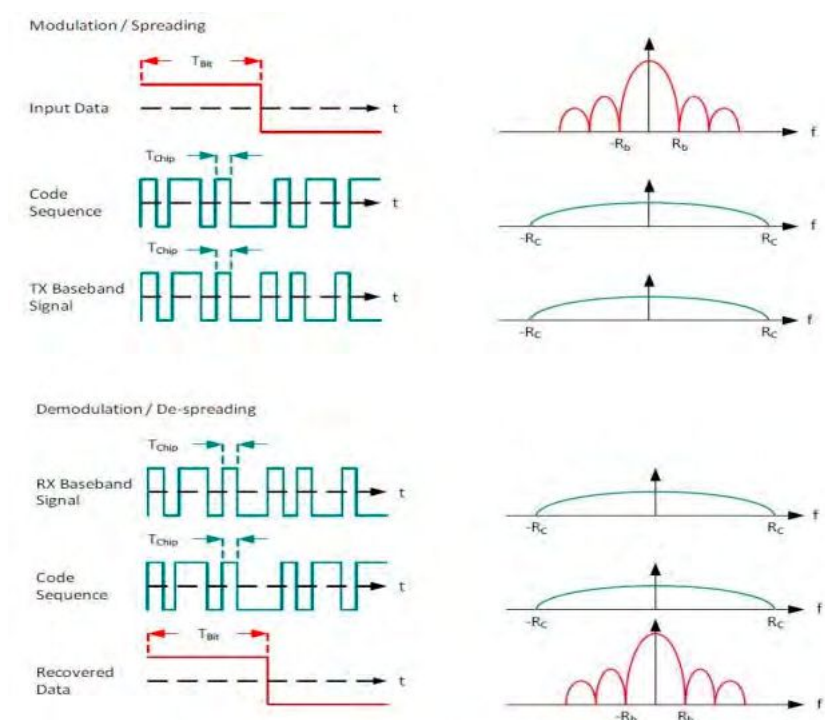


Fig. 2.2: Modulación y demodulación de DSSS - Un sistema de espectro ensanchado multiplica los datos de entrada por una secuencia de código mucho más rápida que distribuye el ancho de banda de la señal.

fuelle: (Semtech, 2015)

La proporción de chips por bit, de la secuencia de chips con la velocidad de datos, se conoce como la ganancia de procesamiento (G_p), comúnmente expresado en dB (Semtech, 2015)

$$G_p = 10 \log\left(\frac{R_c}{R_b}\right) \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

Donde:

R_c = chip rate (Chips/second)

R_b = bit-rate (bits/second)

Como conclusión, podemos indicar *que este proceso de multiplicar la señal de datos que se quiere enviar por un código de expansión, conocido como secuencia de chips, se produce a una velocidad mucho más rápida que la señal de datos y por lo tanto se expande el ancho de banda de la señal, más allá del ancho de banda original. En el receptor al conocer esa secuencia de código, multiplicada por la señal recibida, es posible recuperar la señal original.*

Conceptos de la modulación LoRa®

En este capítulo se explica algunos de los conceptos básicos de la modulación LoRa® y las ventajas que proporciona este esquema de modulación cuando se implementa en las redes de comunicaciones LoRa®.

3.1 Modulación LoRa®

En un sistema DSSS, una de las desventajas es que requiere un reloj de referencia de alta precisión y por eso cuesta más dinero. LoRa® que es una tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza un tipo de modulación de espectro ensanchado de chirp, que se denomina Chirp Spread Spectrum (CSS) ofrece una alternativa a DSSS de bajo costo y bajo consumo, pero robusta, porque no requiere un reloj de referencia de alta precisión (Semtech, 2021a).

Por lo tanto, LoRa® intercambia la velocidad de datos por la sensibilidad dentro de un ancho de banda de canal fijo. Implementa una tasa de datos variable, utilizando factores de dispersión ortogonales, lo que permite cambiar la velocidad de datos por rango o potencia, a fin de optimizar el rendimiento de la red con un ancho de banda constante, como lo indica (Luvisotto et al., 2018).

Aquí entra en juego la metodología de modulación pero a través del proceso que se utiliza llamado chirp, ver 3.3.1 se obtiene un ganancia dada por la metodología que se utiliza, en comparación con otros tipos de modulación como por ejemplo el de desplazamiento de frecuencia del tipo FSK (Semtech, 2021a).

3.2 Un poco de historia

La primera patente de LoRa® es presentada por la empresa francesa Cycleo SAS, con patente estadounidense US 7791415 que se titula “Generador de chirp sintetizado Fractional-N” y adquirida en 2012 por Semtech. Semtech presenta la segunda patente de LoRa®, EP2763321 titulada “Transmisor de largo alcance de baja potencia” donde describe el uso de modulación chirp para transmitir señales de baja potencia a largas distancias. LoRa® es la primera implementación de bajo costo para uso comercial. Semtech fabrica los chips de radio o también cede la propiedad

intelectual a otras empresas para ellas fabriquen sus chips con tecnología LoRa® (Semtech, 2021c).

Cualquier fabricante de hardware que quiera utilizar esta tecnología debe estar certificado por la LoRa® Alliance. ¹

Entre las principales ventajas de LoRa® que indica (Hernández, J.C., 2023) se encuentran las siguientes:

- Alta tolerancia a las interferencias
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB)
- Basado en modulación “chirp”
- Bajo Consumo
- Largo alcance 10 a 20km
- Baja transferencia de datos (hasta 255 bytes)
- Conexión punto a punto
- Frecuencias de trabajo ISM: 868 MHz en Europa, 915 MHz en América y 433 MHz en Asia

Ésta tecnología es ideal para conexiones a grandes distancias, en una red en las que se necesiten enviar pocos datos y que los nodos no dispongan de corriente eléctrica de red por su bajo consumo.

3.3 Tecnología LoRa®

LoRa® es la capa física o la modulación inalámbrica utilizada para crear un enlace de comunicación de largo alcance. Utiliza un ancho de banda de 125 kHz, 250kHz o 500kHz para transmitir una señal. Al ser de banda ancha y no demasiado estrecha permite que LoRa® tenga cierta robustez frente a algunas características del canal. El transmisor genera señales de chirp variando su frecuencia en el tiempo, como muestra la Fig. 3.1. El receptor puede decodificar incluso una señal muy atenuada 19,5 dB por debajo del nivel de ruido (Semtech, 2015).

3.3.1 Modulación de frecuencia chirp

La modulación de frecuencia chirp, llamada como una señal de barrido, utiliza una variación lineal de frecuencia a lo largo del tiempo que se utiliza para codificar la información. Puede aumentar la frecuencia en el tiempo (up-chirp) o también puede disminuir en el tiempo (down-chirp). Ver la Fig.3.1

¹<https://lora-alliance.org/lorawan-certification/>

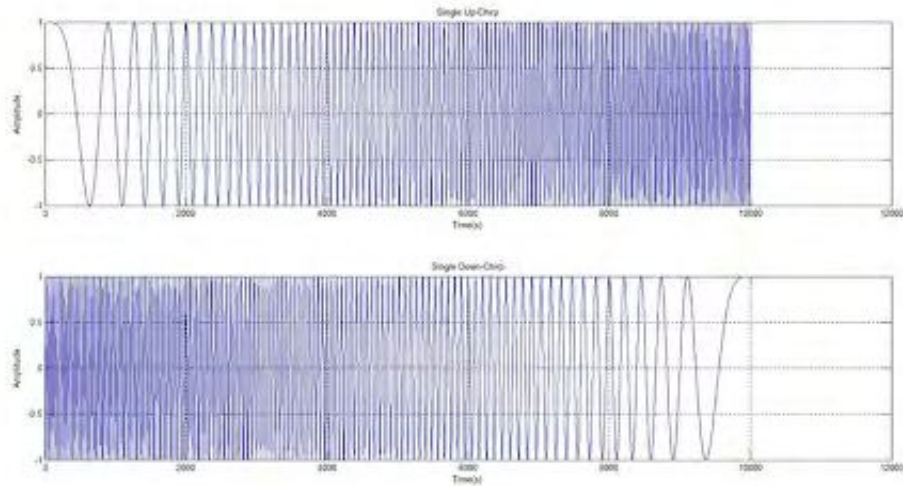


Fig. 3.1: Señal Portadora de CSS — Up-Chirp / Down-Chirp - Figura de .^A study of LoRa low power and wide area network technology , pag.3"

fuelle: (Noreen et al., 2017)

3.3.2 Desplazamiento en frecuencia FSK

Muchos sistemas inalámbricos heredados utilizan modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) como capa física porque es una modulación muy eficiente para lograr baja potencia Fig. 3.2. Lora® mantiene las mismas características de baja potencia que la modulación FSK pero aumenta significativamente el rango de comunicación por su robustez (Semtech, 2021c) .

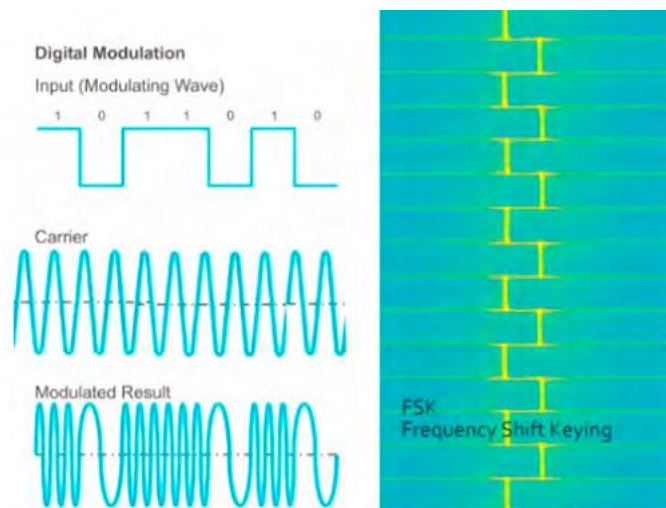


Fig. 3.2: Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)

fuelle: (Ghoslya Sakshama, 2021a)

3.3.3 Robustez

Una de las características principales son su bajo requerimiento de potencia para la transmisión de mensajes y su robustez frente a diferentes mecanismos de degradación de canal como lo son los multipath, el desvanecimiento de la señal o fading y efecto doppler, lo que la hace muy útil para aplicaciones de LPWAN. (Semtech, 2015) LoRa® puede demodular señales 19.5 dB por debajo del nivel de ruido, mientras que la mayoría de los sistemas FSK necesitan una potencia de señal de 8-10 dB por encima del nivel de ruido para demodular adecuadamente (Semtech, 2021b) Se puede apreciar en la Fig. 3.3.

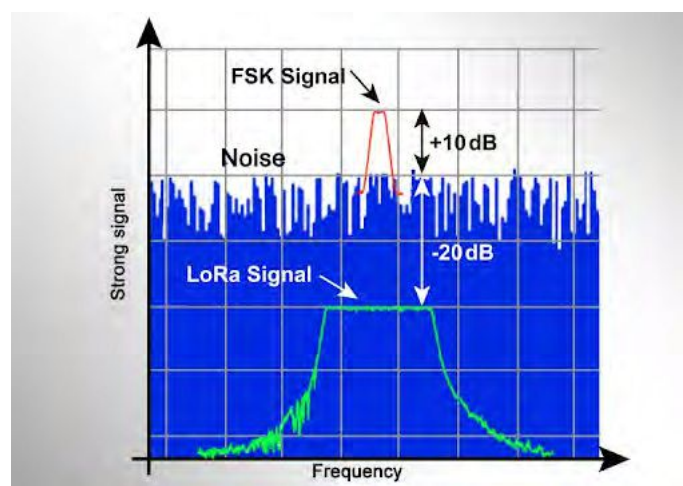


Fig. 3.3: Demodulación Lora® frente a FSK

fuelle : (Kuan Fiona, 2020)

3.4 Parámetros que utiliza un canal de comunicación LoRa®

Las características principales de la modulación Lora® depende de ciertos parámetros como spreading factor (SF), Code rate (CR) y bandwidth (BW).

LoRa® emplea seis factores de dispersión ortogonales (7 a 12). El SF proporciona una compensación entre la velocidad de datos y el rango. Junto con estos factores de propagación, se utiliza técnicas de corrección de errores (FEC) para aumentar aún más la sensibilidad del receptor.

La elección de valores más altos de SF y CR también influye en el tiempo en el aire. Aunque, la elección de mayor BW reduce el tiempo en el aire, también disminuye la sensibilidad del receptor (Semtech, 2015) (Saari et al., 2018).

LoRa® proporciona tres valores de BW de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz.

Un factor SF se toma en función de la relación señal-ruido (SNR) recibida, para adaptar la longitud del símbolo. Esta es la razón que al cambiar el factor de dispersión genera una tasa de bits variable, para el factor de dispersión más alto y para el factor de dispersión más bajo, como se muestra a continuación.

$$R_b = \frac{BW}{2^{SF}} * SF \text{ [bits/seg]} \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta además el CR, la tasa de bits útil Rb es igual a:

$$R_b = \frac{4+CR}{2^{SF}} * SF \text{ [bits/seg]} \quad (3.2)$$

Donde :

SF = spreading factor (7...12)

CR = code rates (1...4)

BW = modulation bandwidth (Hz)

Se observa en la Fig. 3.4 que los parámetros antes mencionados, toman relevancia con la distancia entre el transmisor y receptor, el tiempo en el aire de la transmisión y el consumo de batería.

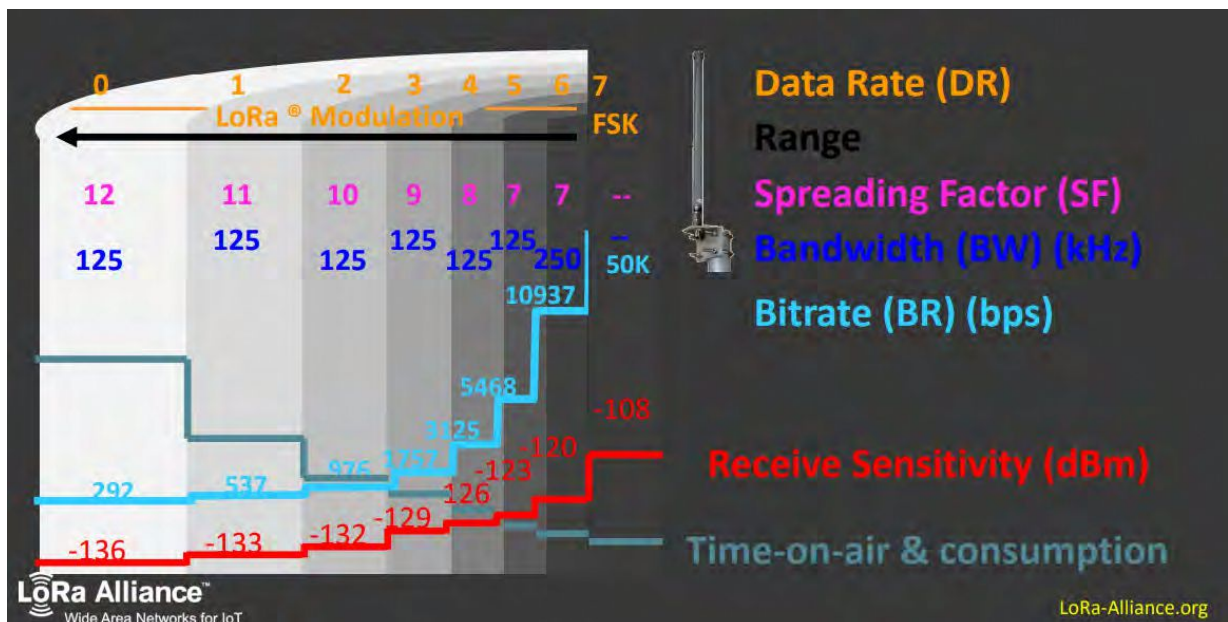


Fig. 3.4: Comparación de parámetros de un canal de comunicación LoRa®
fuente:(LoRa-Alliance, 2022)

3.5 Chirp spread spectrum modulation - Modulación de espectro ensanchado por chirp

De acuerdo a (Noreen et al., 2018) se distribuye cada símbolo sobre un chirp ascendente, de acuerdo con el valor SF utilizado. Por ejemplo, para SF = 7 y SF = 12, se utilizarán 128 y 4096 chips / símbolo, respectivamente.

La relación entre la velocidad de símbolo o symbol rate, Rs:

$$R_s = BW / 2^{SF}$$

y la velocidad de chip o chip rate, Rc es:

$$R_c = 2^{SF} / R_s$$

De tal manera $R_c = 2^{SF} * BW / 2^{SF}$

asi que; **Rc = BW chips/seg**

La señal de chirp es una señal sinusoidal con una frecuencia creciente o decreciente linealmente vista en la Fig. 3.1 es una forma de onda de chirp lineal que se puede expresar como:

$$c(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j(at + b)) & -\frac{T_s}{2} \leq t \leq \frac{T_s}{2} \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$at + b = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T_s} t \quad (3.4)$$

donde:

f_{máx} y **f_{mín}** son la frecuencia máxima y mínima, de acuerdo al ancho de banda a utilizar.

T_s es la duración del símbolo.

3.5.1 Ancho de banda BW

El ancho de banda Bandwith (BW), es la diferencia en frecuencia mínima y máxima. Como se observa en la Fig. 3.5 hay tres configuraciones de ancho de banda disponibles, a saber: 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz.

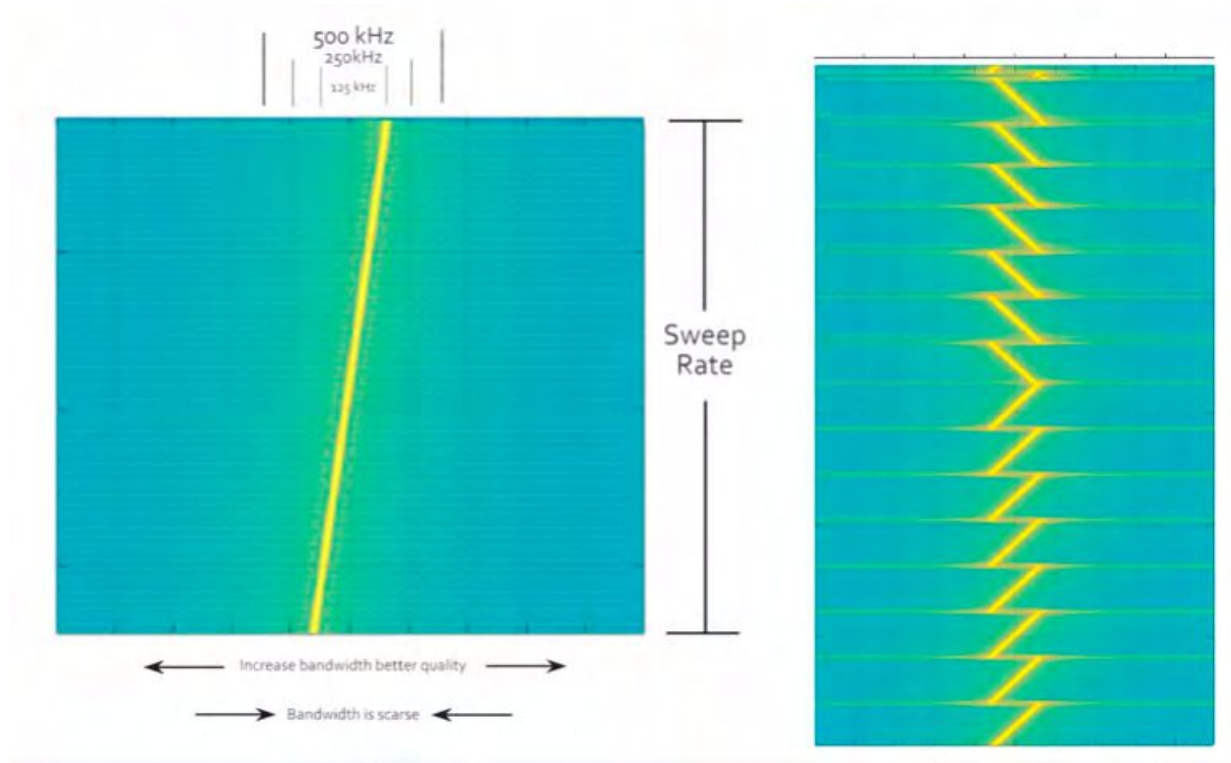


Fig. 3.5: Ancho de banda BW Bandwith
fuente:(Chaudhari & Zennaro, 2020)

3.5.2 Spreading Factor SF

SF define el número de bits usado para poder codificar un símbolo. Cuanto mayor sea el SF, menor será la velocidad de transferencia pero mayor será el rango o la distancia por la mejora en la inmunidad al ruido.

El SF es usado para determinar la tasa de envío de símbolos R_s y el tiempo del símbolo T_s , como se muestran en la ecuaciones:

$$T_s = 2^{SF} / BW$$

$$R_s = BW / 2^{SF}$$

Al aumentar el BW se hace la comunicación más rápida, y disminuye el tiempo de bit y también aumenta la capacidad de canal Shannon-Hartley ver ecuación 2.1. El aumento del factor de SF

vuelve más lenta la comunicación ya que aumenta el tiempo de bit, esto a pesar de que el símbolo transporta más bits.

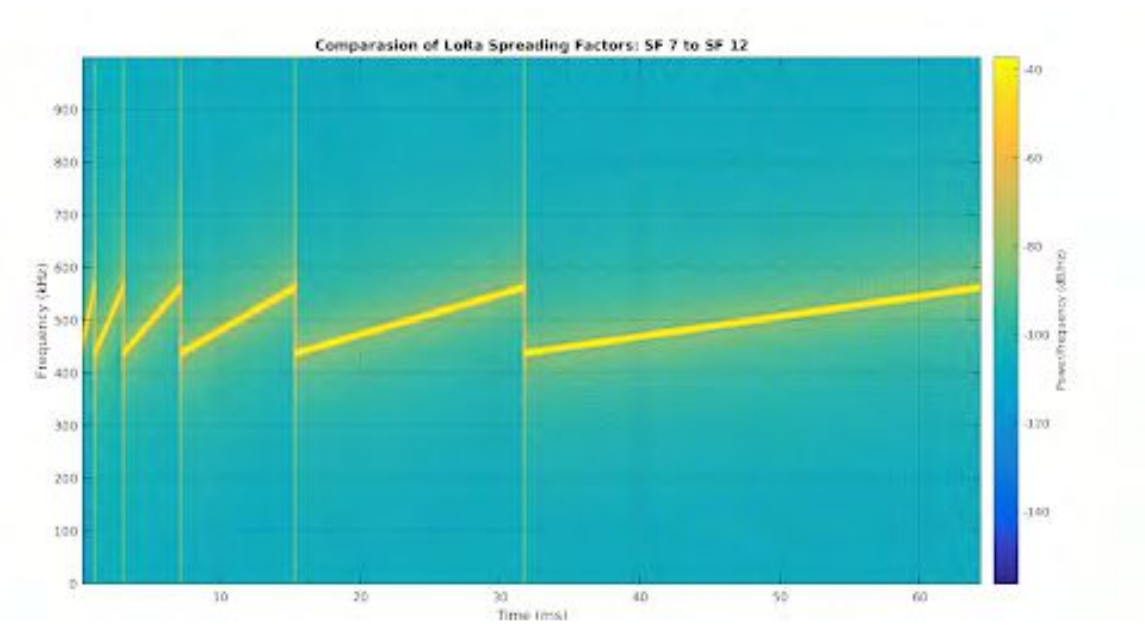


Fig. 3.6: Comparación de Spreading Factor SF7 a SF12
fuente: (Ghosly Sakshama, 2021b)

El SF también determina la relación señal ruido y por lo tanto afecta también en la sensibilidad del receptor. En la próxima tabla 3.1 se observan diferentes SNR a partir del SF.

DR/SF	SNR
DR0/SF12	-20 dB
DR1/SF11	-17.5 dB
DR2/SF10	-15 dB
DR3/SF09	-12.5 dB
DR4/SF08	-10 dB
DR5/SF07	-7.5 dB

Tab. 3.1: Spreading Factor y SNR limites

3.5.3 Tasa de codificación CR

La codificación reduce la tasa de errores de paquetes en presencia de breves ráfagas de interferencia. LoRa® usa códigos Hamming para FEC. Si asumimos CR valores entre 1, 2, 3 y 4 para las tasas de codificación 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8, respectivamente. (coding rate = $4/(CR + 4)$) Las capacidades de detección y corrección de errores se muestran en la siguiente figura

Coding rates	Error detection (bits)	Error correction (bits)
4/5	0	0
4/6	1	0
4/7	2	1
4/8	3	1

Fig. 3.7: Capacidades de detección y corrección de errores de LoRa® – imagen de pagina 68 LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications

fuelle:(Chaudhari & Zennaro, 2020)

3.5.4 Adaptive Data Rate ADR

Una característica clave de LoRaWAN® es la capacidad de la red para optimizar automáticamente la velocidad a la que los dispositivos envían sus datos. Esta funcionalidad se denomina tasa de datos adaptativa o adaptive data rate (ADR) y esencialmente aumenta la capacidad de las redes LoRaWAN®. El ADR nos permite escalar fácilmente la red, simplemente agregando una puerta de enlace adicional, muchos nodos cambiarán automáticamente su factor SF, lo que resultará en menos tiempo en el aire por dispositivo, lo que agrega más capacidad a la red, como se puede observar en la Fig.3.8 (Learning Center Semtech, 2023a).

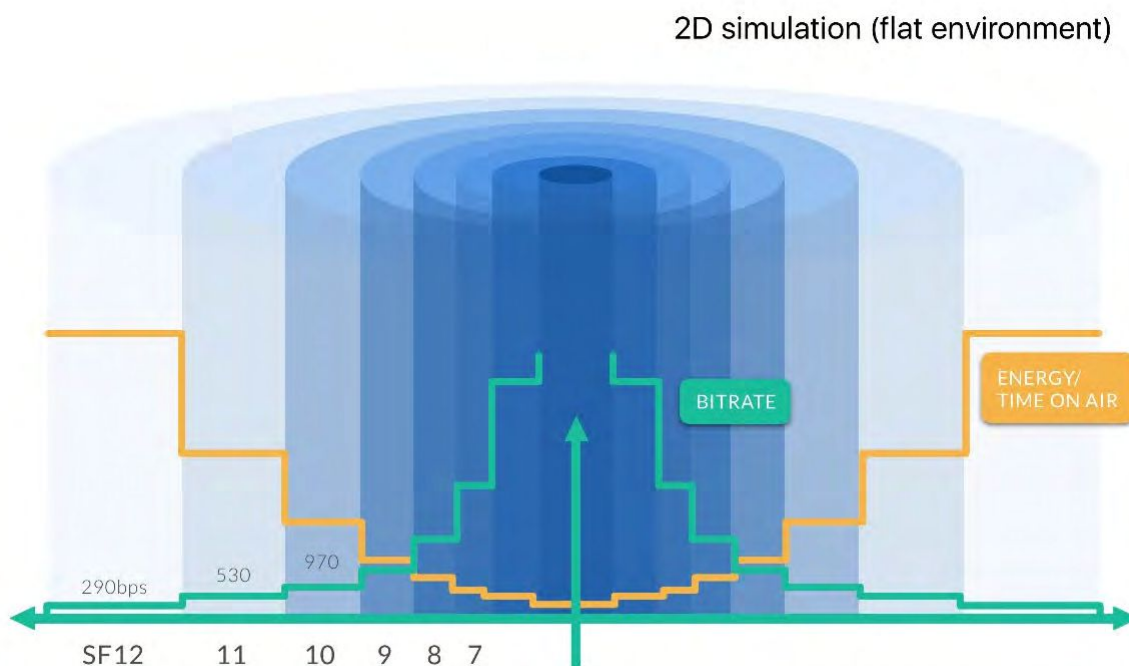


Fig. 3.8: ADR: Velocidades de datos de transmisión y distancia mostradas en un entorno 2D
fuente: (Learning Center Semtech, 2023a)

En resumen, ADR es un mecanismo que permite a la red LoRaWAN® optimizar automáticamente la tasa de datos de los dispositivos en función de la intensidad de la señal de radio, lo que permite ahorrar energía y agregar capacidad a la red al aumentar el número de puertas de enlace.

Para conocer más sobre ADR y con un ejemplo, ver Anexo A.

LoRaWAN®

En este capítulo se explican los conceptos de LoRaWAN®, su arquitectura, el estándar, la trama, la estructura de canales y los distintos tipos de acceso y clasificación los dispositivos que utilizan la red LoRaWAN®.

4.1 Conceptos LoRaWAN®

LoRaWAN® es una arquitectura de red de comunicación inalámbrica que se utiliza para conectar dispositivos IoT a Internet. Utiliza la tecnología de comunicación de radiofrecuencia LoRa para permitir que los dispositivos se comuniquen a larga distancia y con bajo consumo de energía. Esta tecnología se ha vuelto muy popular en aplicaciones que requieren una conexión de baja velocidad pero de largo alcance, una opción a considerar en nuestro caso para ser utilizada en una zona rural.

La red LoRaWAN® está diseñada para ser operada por operadores de red o proveedores de servicios que ofrecen acceso a la red a través de gateways que conectan los dispositivos IoT a Internet.

4.2 LoRaWAN®

Como se dijo anteriormente LoRa® es la capa física y LoRaWAN® es la capa de control de acceso al medio (MAC) para redes LPWAN y está estandarizado por la LoRa Alliance (Lora-Alliance, 2020). Ver la Fig.4.1 para observar las distintas capas LoRa® y LoRaWAN®.

Actualmente la fundación LoRa Alliance® es la que se encarga de la estandarización de la red de área amplia de baja potencia (LPWAN). LoRa Alliance® es una asociación abierta sin fines de lucro que se ha convertido en una de las alianzas más grandes y de más rápido crecimiento en el sector tecnológico desde su creación en 2015. El grupo de más de 500 miembros proporciona la especificación de LoRaWAN® y la certificación de interoperabilidad para facilitar las implementaciones de LoRaWAN® a nivel mundial (Lawson, Eric, 2020). Para ver más información sobre LoRa Alliance® vea (Lora-Alliance, 2020).



Fig. 4.1: LoRa® la capa física-LoRaWAN® capa de control de acceso al medio
Fuente: (Lora-Alliance, 2020)

LoRaWAN® especifica el protocolo de comunicaciones y la arquitectura de red. Estas funciones tienen un alto grado de influencia sobre varios parámetros de rendimiento, que incluyen:

- La vida útil de la batería de un nodo
- La capacidad de la red
- La seguridad de la red
- Las aplicaciones a las que sirven

Consta de dos niveles de seguridad como muestra la Fig 4.2. La idea de seguridad es mantener la integridad de los datos y que no puedan ser utilizados por terceros. Para lograr esto, utiliza un nivel que va a trabajar en la capa de red y otra en la capa de aplicación.

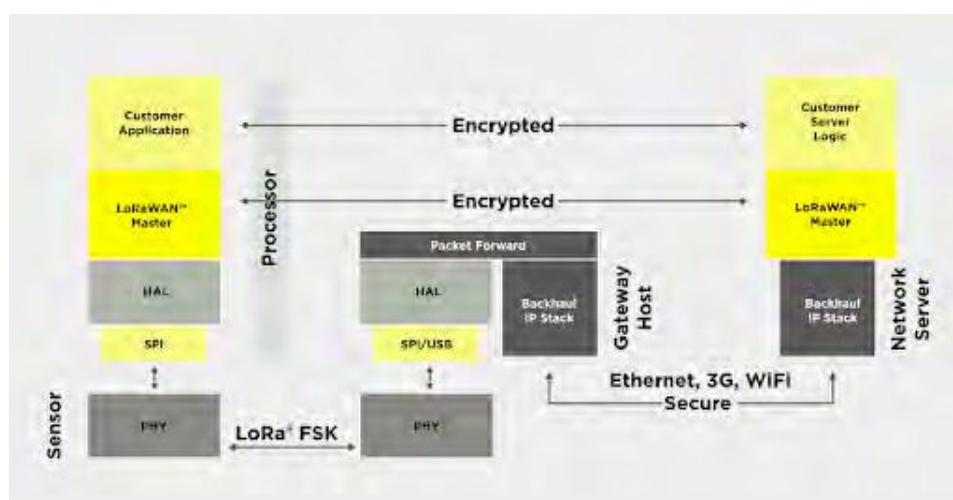


Fig. 4.2: Dos capas de seguridad

Fuente : (Kuan Fiona, 2020)

La estructura básica tiene una topología estrella de LoRaWAN® que consta de 4 partes que son los end nodes, el o los gateways, el network server y el application server. Los network server LoRaWAN® son el corazón de la red, ver Fig. 4.3. 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 (Semtech, 2021c).

En una red LoRaWAN® la inteligencia y la complejidad se centra en el network server, quien es el que administra la red. Los nodos no están asociados con un gateway específico y cada gateway reenvía el paquete recibido por el nodo al network server a través de una red (celular, ethernet, satelital o Wi-Fi). El network server filtra los paquetes recibidos redundantes, realiza las verificaciones de seguridad y es el que envía los datos al application server. (Lora-Alliance, 2020)

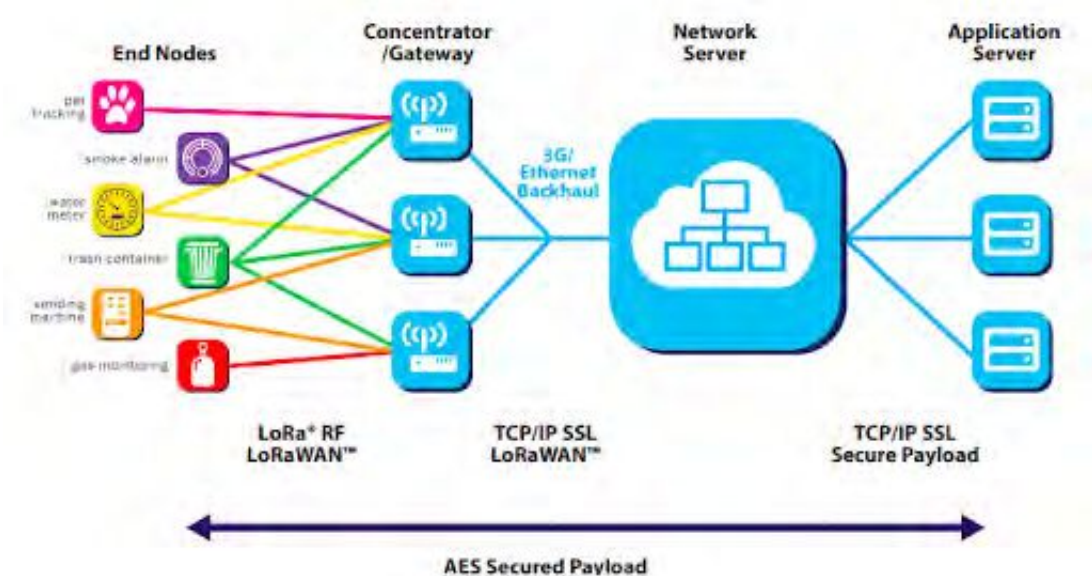


Fig. 4.3: Topología de la arquitectura LoRaWAN®

Fuente: (Lora-Alliance, 2020)

Los 4 elementos de la red son:

- **End Nodes:** Los nodos finales o dispositivos, recopilan datos, por ejemplo de un sensor y lo transmiten. A su vez, pueden recibir una la comunicación desde el servidor de aplicaciones.
- **Gateway:** El gateway en la red Lora actúa como un puente transparente y retransmite los datos bidireccionales entre los nodos finales y el servidor de red para su procesamiento utilizando un enlace IP o por medio de conexiones 3G/4G.

- **Network Server:** El servidor de red se encarga de gestionar toda la red entera, elimina los mensajes duplicados; quiere decir que, remueve toda redundancia de paquetes que pueden llegar por distintos gateways, realiza los chequeos de seguridad para verificar la integridad de los mensajes, decide qué gateway debe responder a un mensaje de nodo final y gestiona la velocidad de transmisión de datos, con una velocidad de datos adaptable (ADR), destinada a maximizar la capacidad de la red y extender la vida útil de la batería del nodo final.
- **Application Server:** El servidor de la aplicación recopila y analiza los datos de los nodos finales y determina las integraciones con servicios necesarias de acuerdo a esos mensajes (Semtech, 2021c).

4.2.1 Acceso a la red

Para que un nodo o dispositivo pueda conectarse a la red necesita una serie de parámetros, a saber:

- Network Session Key (**nwkskey**)
- Application Session Key (**appskey**)
- Device Address (**devaddr**)

Además el dispositivo tiene un identificador (**devEUI**) un identificador de dispositivo único de 64 bits en el espacio de direcciones IEEE EUI64 y puede o no tener un identificador de aplicación (**appEUI**)

Existen dos maneras de conectarse a la red:

OTAA - Over The Air Activation Esta manera de conectarse a la red utiliza una clave temporal y única para cada dispositivo como medio de encriptación de paquetes.

ABP - Activation By Personalization En este tipo de conexión las claves de conexión se encuentran configuradas o grabadas en el dispositivo o nodo (*nwkskey*, *appskey*, *devaddr*) por esto no necesita pedir autorización a la red para conectarse, es mucho más simple pero tiene un gran problema de seguridad y no es el más recomendado de utilizar en redes comerciales.

4.2.2 Clasificación de dispositivos

De acuerdo a los requisitos que tienen las distintas aplicaciones que se pueden utilizar con LoRaWAN® es que se pueden utilizar diferentes clases de dispositivos. Las clases de dispositivos

compensan la latencia de comunicación del enlace descendente de la red versus la vida útil de la batería. Por ejemplo, en una aplicación de control o de tipo actuador, el enlace descendente con la latencia de la comunicación es un factor importante. Se puede ver en la Fig. 4.4

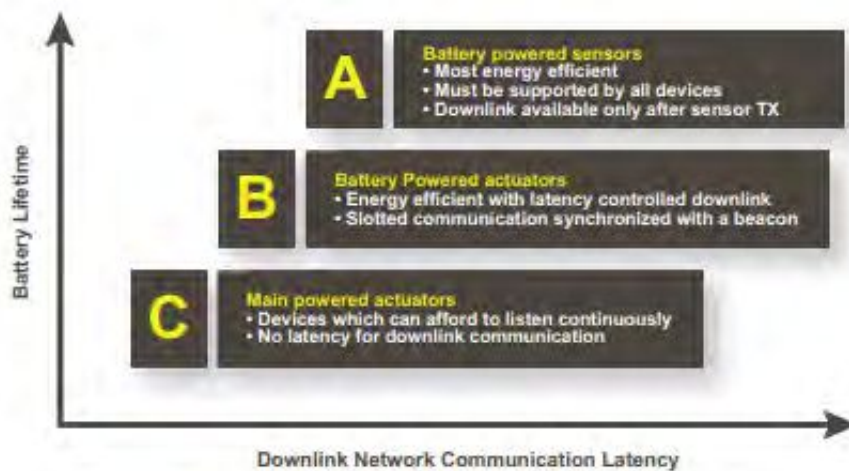


Fig. 4.4: Clasificación de dispositivos para distintas aplicaciones o requerimientos
Fuente: (Lora-Alliance, 2020)

4.2.3 Dispositivos de Clase A - dispositivos bidireccionales optimizando el bajo consumo

Son dispositivos que normalmente están en modo sleep, durmiendo, y que permiten comunicaciones a la red en modo ascendente (UpLink) y luego es seguida por dos ventanas de recepción de enlace descendente (DownLink), en estas ventanas que es cuando el dispositivo puede recibir un mensaje que se encontraba almacenado en el servidor para el dispositivo, lo que brinda la oportunidad de comunicación bidireccional o comandos de control de red si es necesario (Lora-Alliance, Inc, 2016). Ver Fig. 4.5.

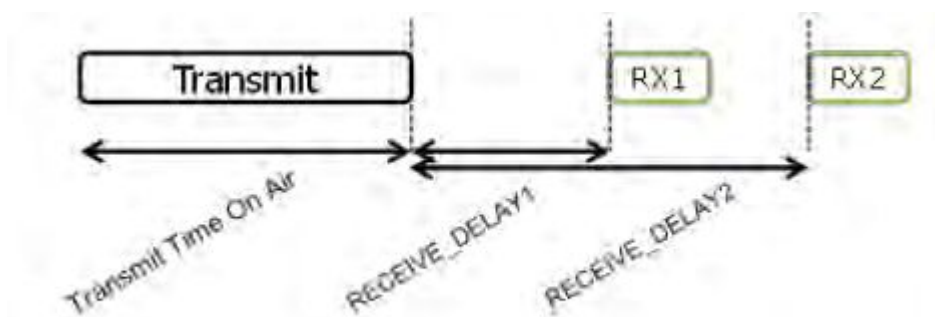


Fig. 4.5: Temporización de la ventana de recepción
Fuente: (Lora-Alliance, Inc, 2016)

4.2.4 Dispositivos de Clase B: dispositivos bidireccionales con latencia downlink determinista

Además de las ventanas de recepción iniciadas de clase A, los dispositivos de clase B se sincronizan con la red mediante beacon periódicos y abren "ping slot" de downlink en momentos programados. O sea, permite programar un período de escucha en un tiempo conocido. Esto proporciona a la red, la capacidad de enviar comunicaciones downlink con una latencia determinista, pero a expensas de un consumo de energía adicional. El objetivo de este concepto es poder optimizar el consumo de energía del dispositivo y disminuir la latencia sin un impacto en la duración de la misma.

La Fig. 4.6 ilustra el concepto de slot de recepción de balizas y ping slot. Para que el dispositivo final abra su ventana de recepción en el momento programado, recibe un beacon sincronizado en el tiempo desde el gateway. Esto permite que el servidor sepa cuándo está escuchando el dispositivo final.

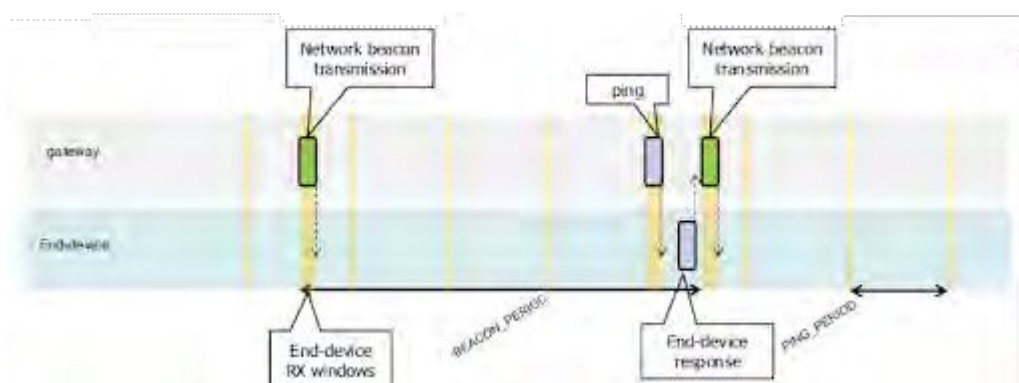


Fig. 4.6: Slot de recepción de balizas y ping slot

Fuente: (Lora-Alliance, Inc, 2016)

4.2.5 Dispositivos de Clase C: dispositivos bidireccionales con baja latencia

Los dispositivos de clase C tienen ventanas de recepción abiertas casi continuamente, solo se encuentran cerradas cuando se está transmitiendo. El dispositivo de clase C utiliza más energía para funcionar que el de clase A o clase B, pero ofrecen una latencia mucha más baja para la comunicación entre el servidor y el dispositivo final. Ver Fig. 4.7.

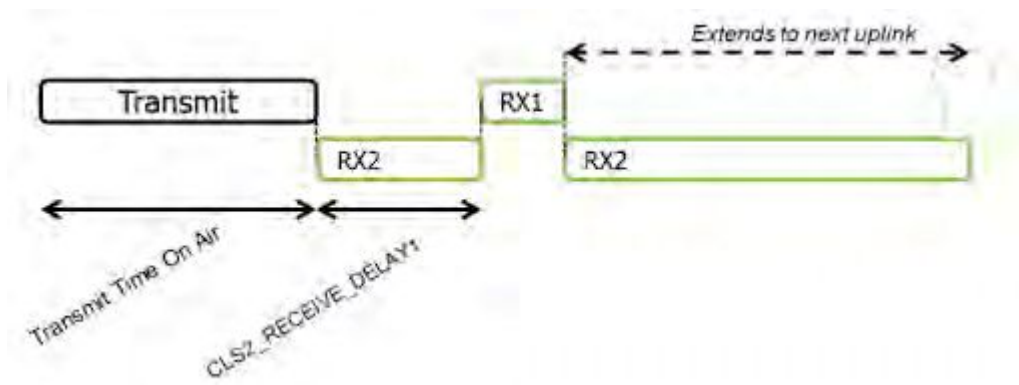


Fig. 4.7: Equipos de clase C que luego de transmitir entran en modo recepción minimizando la latencia
Fuente: (Lora-Alliance,Inc, 2016)

4.2.6 Bandas de espectro radioeléctrico de uso compartido

LoRaWAN® opera en las bandas de frecuencia no licenciadas ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz, dependiendo de la región en la que se encuentre el dispositivo.

Argentina comprende el rango de 902 MHz a 928 MHz y es definida por la UIT¹, pero no se respetó este espectro definido internacionalmente y se destinó un segmento de la banda ISM que va desde los 905 MHz hasta los 915 MHz para un Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzada (SCMA), y se otorgaron a NEXTEL en marzo de 2017² (Ente Nacional de Comunicaciones, 2017).

Hay más información en el informe de consulta pública de espectro emitido por la Secretaría de modernización de Argentina³ y en la resolución de las Bandas de espectro radioeléctrico de uso compartido⁴.

Por tal razón, Argentina utiliza la banda de frecuencia conocida como AU915 en lugar de la banda US915 que estaba prevista inicialmente. Presenta una desventaja respecto a US915, en que no es posible hacer comunicación full duplex, entonces los dispositivos deben operar en modo half duplex, de modo de transmitir en un instante y recibir en otro (thethingsnetwork, 2023).

- Banda ISM: 915-928 MHz
- Regulado por: ENACOM
- Restricción TX: 400 ms (Opcional)

¹<https://www.itu.int/net/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>

²ARTÍCULO 3°.- Autorízase a NEXTEL a utilizar las frecuencias comprendidas entre 905 a 915 MHz y 950 a 960 MHz, de conformidad con lo dispuesto en la Resolución ENACOM N° 1.033 –E/2017, para la prestación del Servicio de SCMA, en las localidades y zonas descriptas en el Proyecto aprobado por la presente

³https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_consulta_publica_de_espectro_02.pdf

⁴<https://www.enacom.gob.ar/multimedia/normativas/2018/res581MM.pdf>

- Tamaño de carga útil (Payload): 11 a 242 bytes
- Spreading Factors: SF7 a SF12
- Velocidad de datos: 0,976 kbps a 12,5 kbps
- Potencia máxima TX: +30 dBm

4.2.7 Estándar LoRaWAN®

LoRaWAN® fue reconocido como estándar internacional por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para redes de área amplia de baja potencia el 7 de diciembre de 2021. El estándar se titula Recomendación ITU-T Y.4480 (International Telecommunication Union, 2021) “Low power protocol for wide area wireless networks” y está bajo la responsabilidad de la Comisión de Estudio 20 del UIT-T: Comisión de Estudio de la UIT sobre IoT y ciudades y comunidades inteligentes (Fewkes, S., 2021).

Un resumen las principales actualizaciones de la especificación LoRaWAN® se encuentra en la tabla: 4.1 .

Algunas referencias:

TS - Technical Specification

TR - Technical Recommendation

RP - Regional Parameters Specification

LW -LoRaWAN

Fecha de lanzamiento	Nombre de especificación	Descripción
Enero de 2015	LW1.0.0	Lanzamiento formal inicial de la especificación de la capa 2 de LoRaWAN de la LoRa Alliance. <i>Nota: Esta versión también incluyó información de los parámetros regionales.</i>
Febrero de 2016	LW1.0.1	Aclaraciones y correcciones a la versión inicial del documento.
Julio de 2016	LW1.0.2 RP1.0.2RevB.	Los parámetros regionales se eliminaron de la especificación de LoRaWAN y se estableció la especificación de parámetros regionales de LoRaWAN como una especificación independiente.

Sigue en la página siguiente.

Fecha de lanzamiento	Nombre de especificación	Descripción
Octubre de 2017	LW1.1.0	Se añadió la funcionalidad de roaming activo.
Julio de 2018	LW1.0.3 RP1.0.3RevA.	<p>Se actualizó el capítulo de la Clase B (de la especificación LoRaWAN1.1).</p> <p>Se añadieron los comandos MAC DeviceTimeReq/Ans en el capítulo de la Clase A (estos comandos son necesarios para la adquisición de balizas de la Clase B).</p> <p>Se desaprobaron los comandos MAC BeaconTimingReq/Ans.</p> <p>Se corrigieron diversas referencias del GPS epoch.</p> <p>Se añadió la funcionalidad de actualizaciones de firmware por aire (FUOTA).</p>
Noviembre de 2019	Parámetros regionales RP002-1.0.0	<p>Se lanzó por primera vez la especificación de parámetros regionales como documento RP002-X.x.x, y se estableció el número de documento como 1.0.0.</p> <p>El documento cubre tanto las especificaciones LW1.0.x como LW1.1.x.</p> <p>Se añadió una tabla de referencia cruzada para los datos del plan de canal del país.</p>
Febrero de 2020	RP002-1.0.1	<p>Se modificaron los parámetros para AS923 para admitir múltiples grupos de canales de unión/predeterminados.</p> <p>Cada país/banda admite una configuración específica basada en un desplazamiento de los canales de unión/predeterminados originales de AS923.</p> <p>Se definió el uso del plan de canal para: Cuba, Indonesia, Filipinas y Vietnam.</p>
Octubre de 2020	LW1.0.4	Se reemplazó AppEUI y AppNonce con JoinEUI y JoinNonce. Se aclararon los modos de operación Clase B y Clase C como un aditivo a la Clase A y los requisitos de apertura de ventanas RX de Clase A.

Sigue en la página siguiente.

Fecha de lanzamiento	Nombre de especificación	Descripción
Noviembre 2020	RP002-1.0.2	<p>Se agregó una tabla resumida de los parámetros regionales para todas las regiones excepto CN470.</p> <p>Se añadió una descripción de la justificación de <i>compatibilidad con repetidor</i>, y se modificaron los tamaños máximos de carga útil de US902-928, AU915-928 y CN470-520 para <i>compatibilidad con repetidor</i>".</p> <p>Se agregaron tasas de datos para las transmisiones de Long-Range Frequency Hopping Spread Spectrum (LR-FHSS) a EU868.</p>
Mayo 2021	RP002-1.0.3	<p>Se agregó AS923-4 para cubrir 917-920 MHz (Israel)</p> <p>Se agregó una nota aclaratoria sobre DR6/DR7 para AS923/IN865.</p> <p>Se agregaron aclaraciones para las transmisiones de LR-FHSS.</p>

Tab. 4.1: Historial de versiones de la especificaciones LoRaWAN®

Fuente:
 (Learning
 Center
 Semtech,
 2023b)

Con el lanzamiento de la especificación LW1.0.4 L2, LoRa Alliance cambió su terminología. Los parámetros a los que se hacía referencia en especificaciones anteriores como AppEUI y AppNonce pasaron a llamarse JoinEUI y JoinNonce. Las principales actualizaciones incluyen mejoras de seguridad, la introducción de una nueva clave de red, el manejo mejorado del contador de tramas para evitar ataques de repetición, la inclusión de nuevos comandos MAC y la adición de un nuevo procedimiento de re-registración para dispositivos que se han unido previamente a una red. También se describe la capacidad de *roaming* que permite que los dispositivos se conecten y sean controlados por otra red (Learning Center Semtech, 2023b) .

4.2.8 Estructura de los canales

LoRaWAN® tiene una estructura de canales preacordada que se encuentra definida en el estándar de la norma “LoRaWAN Regional Parameter” (Lora-Alliance,Inc, 2020)

La banda de frecuencia utilizada como ya se dijo anteriormente es 915 MHz a 928 MHz (AU915-928). En particular el Gateway y los nodos utilizan los canales del 8 al 15 (916,8 a 918,2 MHz) y un ancho de banda de 125 kHz. Ver fig. 4.8.

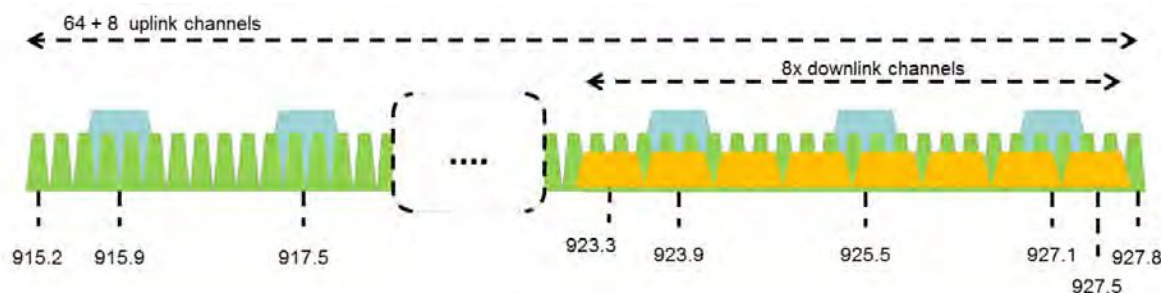


Fig. 4.8: Canales AU915

fuelle: (Lora-Alliance,Inc, 2020)

Como se observa en la Fig. 4.8, los canales verdes son los de UpLink con un ancho de banda de 125kHz, los celestes son UpLink de 500kHz y los naranjas de DownLink de 500kHz.

La especificación consta de lo siguiente:

UpLink – 64 canales - del 0 a 63 de 125kHz que comienza desde 915.2MHz y espaciados 200kHz hasta 927.8 MHz., DR0 a DR5 .

UpLink – 8 canales - del 64 a 71 de 500kHz que comienza desde 915.9MHz y espaciados 1.6MHz hasta 927.1MHz. DR6.

DownLink – 8 canales - del 0 a 7 de 500kHz que comienza desde 923.3MHz y espaciados 600kHz hasta 927.5 MHz. DR8 al DR13.

Si se dividen los 64 canales en grupos de 8, va haber 8 octetos, la norma (Lora-Alliance,Inc, 2020) en la página a 47 especifica que, los UpLink que se transmiten en el primer octeto, será respondido por el 1er canal de downLink, los que se transmite en el segundo octeto, son respondidos en el 2do canal de Downlink y así sucesivamente. Hay que tener en cuenta que hay gateways de 8, 16, 32, 64 canales, por tanto hay modelos que pueden seleccionar y utilizar más de un octeto a la vez, lo que le agrega capacidad al gateway.

Ejemplo: Los canales están divididos en octetos, el 1er octeto va del 0 al 7 de 125kHz y un canal de 500kHz el canal 64.

En la especificación indica que la devolución en el canal de downlink es producto del canal de uplink módulo 8, módulo 8, significa que a un número lo divido por 8 y el resto es la información que interesa, ejemplo 1er octeto canal 4 módulo 8, me da 4 el es resto 0, entonces el downlink es en el canal 0.

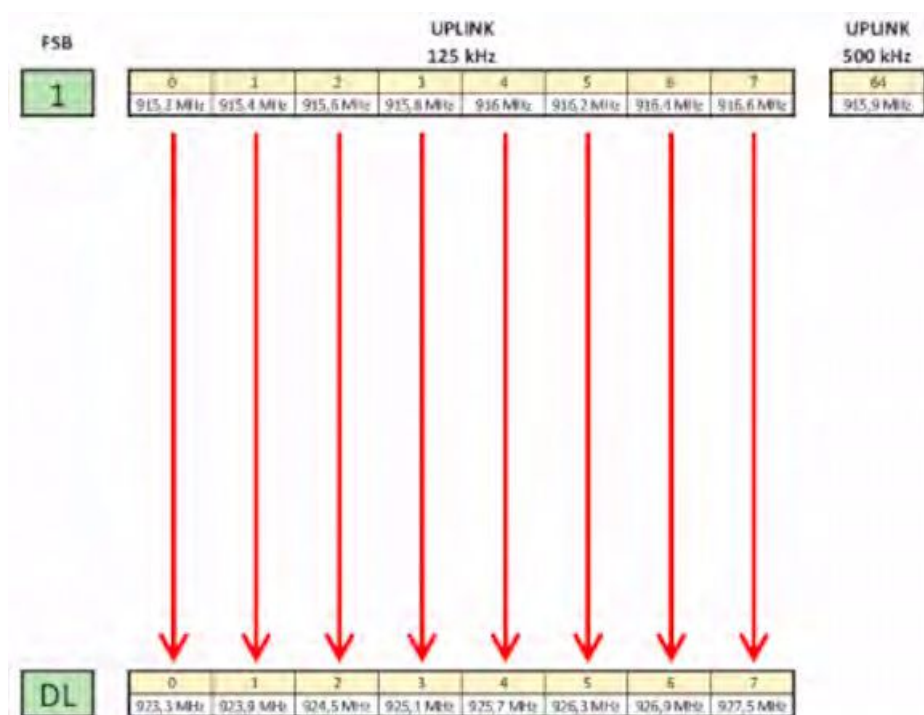


Fig. 4.9: Primer Octeto de canales

fuelle: (Lora-Alliance,Inc, 2020)

Si por ejemplo se elige el **2do octeto**, como es que se configuran los equipos a utilizar, el 12, entonces el módulo 8 de 12 da como resto 4, envía por canal 4 de downlink. En los de 500kHz, canal 64 da como downlink canal 0, 65 el 1 y así siguiendo.

FSB	UPLINK 125 kHz								UPLINK 500 kHz
	0	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	1	2	3	4	5	6	7	64
2	8	9	10	11	12	13	14	15	65
3	16	17	18	19	20	21	22	23	66
4	24	25	26	27	28	29	30	31	67
5	32	33	34	35	36	37	38	39	68
6	40	41	42	43	44	45	46	47	69
7	48	49	50	51	52	53	54	55	70
8	56	57	58	59	60	61	62	63	71
DL	0	1	2	3	4	5	6	7	

Fig. 4.10: Sigüientes octetos de canales
fuente: (Lora-Alliance,Inc, 2020)

Ejemplo de log del gateway donde se recibe datos de un nodo como se observa en la Fig. 4.11 y en la Fig. 4.12 específica donde 10:06:58hs hay un UpLink en 918MHz que sería el canal 14, entonces el Downlink sería por el canal 6 926.9Mhz y lo hace a las 10:06:58hs.

Timestamp	Direction	Frequency (MHz)	Other Parameters
Jan 06 10:30:22 AM	UnconfirmedDataUp	918.2 MHz	SF10, BW125, FPort: 8, FCnt: 2792, DevAddr: 00a0991b
Jan 06 10:18:40 AM	UnconfirmedDataDown	925.7 MHz	SF10, BW500, FCnt: 2621, DevAddr: 00a0991b, GW: b827ebfffe287b9c
Jan 06 10:18:40 AM	UnconfirmedDataUp	917.6 MHz	SF10, BW125, FPort: 8, FCnt: 2791, DevAddr: 00a0991b
Jan 06 10:06:58 AM	UnconfirmedDataDown	926.9 MHz	SF10, BW500, FCnt: 2620, DevAddr: 00a0991b, GW: b827ebfffe287b9c
Jan 06 10:06:58 AM	UnconfirmedDataUp	918 MHz	SF10, BW125, FPort: 8, FCnt: 2790, DevAddr: 00a0991b
Jan 06 9:55:16 AM	UnconfirmedDataDown	924.5 MHz	SF10, BW500, FCnt: 2619, DevAddr: 00a0991b, GW: b827ebfffe287b9c
Jan 06 9:55:16 AM	UnconfirmedDataUp	917.2 MHz	SF10, BW125, FPort: 8, FCnt: 2789, DevAddr: 00a0991b
Jan 06 9:43:33 AM	UnconfirmedDataDown	925.1 MHz	SF10, BW500, FCnt: 2618, DevAddr: 00a0991b, GW: b827ebfffe287b9c
Jan 06 9:43:33 AM	UnconfirmedDataUp	917.4 MHz	SF10, BW125, FPort: 8, FCnt: 2788, DevAddr: 00a0991b
Jan 06 9:31:51 AM	UnconfirmedDataDown	923.9 MHz	SF10, BW500, FCnt: 2617, DevAddr: 00a0991b, GW: b827ebfffe287b9c

Fig. 4.11: Ejemplo de log del Gateway de la recepción de datos de un nodo
fuente: propia

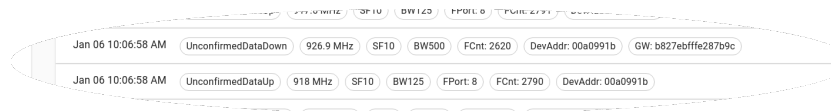


Fig. 4.12: Ejemplo de log del Gateway específico
fuente: propia

En la siguiente tabla 4.2 se encuentra explicita los canales utilizados en el segundo octeto.

UpLink		
Canal	Frecuencia MHz	SF y BW
canal 8	916.8	SF7BW125 to SF12BW125
canal 9	917.0	SF7BW125 to SF12BW125
canal 10	917.2	SF7BW125 to SF12BW125
canal 11	917.4	SF7BW125 to SF12BW125
canal 12	917.6	SF7BW125 to SF12BW125
canal 13	917.8	SF7BW125 to SF12BW125
canal 14	918	SF7BW125 to SF12BW125
canal 15	918.2	SF7BW125 to SF12BW125
canal 65	917.5	SF8BW500
DownLink		
	Frecuencia MHz	SF y BW
	923.3	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	923.9	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	924.5	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	925.1	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	925.7	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	926.3	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	926.9	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	927.5	SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
	923.3	SF12BW500 (RX2)

Tab. 4.2: Canales (AU915-928)

4.3 Distintos tipos de redes LoRaWAN®

Los tipos de redes LoRaWAN® se pueden separar en dos grandes redes. Una son **las redes públicas**, que básicamente son aquellas que brindan una prestación para las personas o empresas que requieran de sus servicios. Las características que tienen este tipo de redes, es que tiene que haber cobertura en el lugar que requiere su utilización. Se puede asimilar con el uso de una red de telefonía celular, basta con sacar una cuenta, lo que quiere decir suscribirse y abonar por el uso de la red. O también, si se tiene un dispositivo compatible con la red que utiliza el proveedor o conseguirlo a través del prestador en comodato. El costo operativo de los gateways y el mantenimiento de la red corre por cuenta del operador. El problema con éstas redes es que se establecen en zonas donde pueden tener la mayor cantidad de abonados a su servicio, donde la cantidad de dispositivos que pueden conectarse a su red es mayor, por esta razón, en zonas con poca población o zonas remotas no suele ser rentable realizar un despliegue de su red. En la siguiente imagen Fig.4.13 se muestra las empresas con despliegue en el mundo, observando que la empresa YEAP! esta presente en América del sur, Orange en Europa. etc. De acuerdo a la (Lora-Alliance, 2020) hay 156 operadores de redes LoRaWAN® en 171 países.

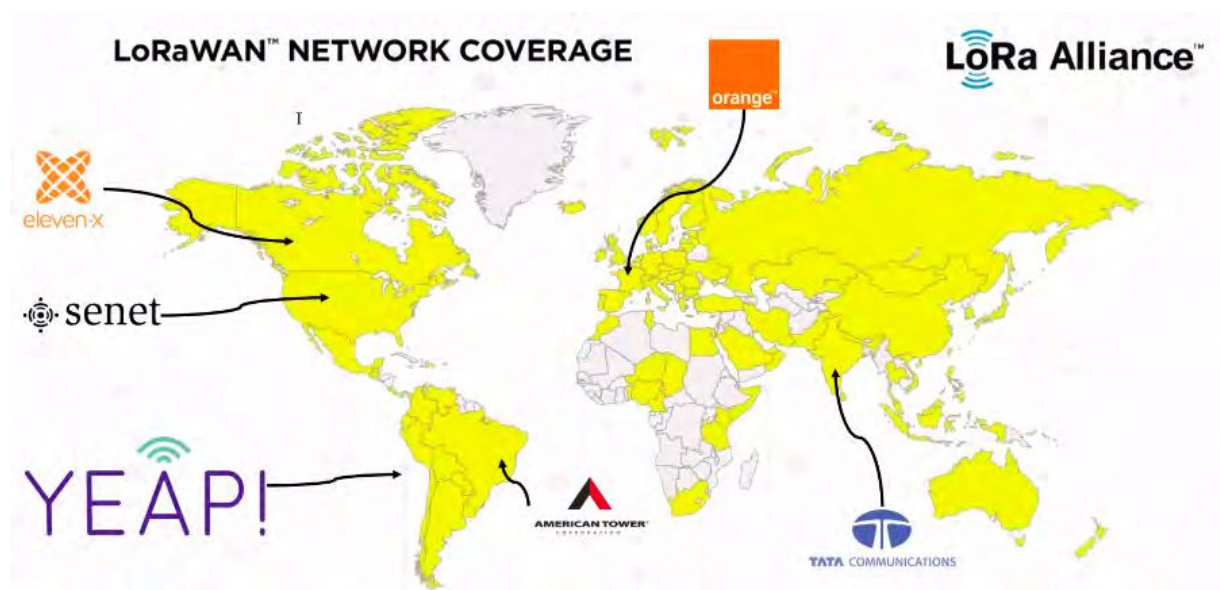


Fig. 4.13: Redes públicas en el mundo

fuelle: <https://electroners.com/>

Por otra parte, se tienen **las redes privadas**, donde el usuario puede administrar sus propios dispositivos IoT e infraestructura de red. Pero también *se debe hacer cargo del mantenimiento, actualización y funcionamiento de todos los componentes que involucra la red*. En este caso el usuario, empresa, institución que quiera desplegar una red LoRaWAN®, primero debe comprar uno o varios gateways, posteriormente, implementar el despliegue en el lugar, crear las conexiones (ethernet, wifi, celular, satelital) entre los gateways y las plataformas de administración y por último realizar procesamiento de datos y sensores.

4.3.1 The Things Network

Es un ecosistema colaborativo global de IoT abierta que crea redes, dispositivos y soluciones utilizando LoRaWAN®. The Things Network (TTN) (The Things Network, 2023) ofrece un stack de servidores de red LoRaWAN® lista para usar. Cubre lo esencial hasta configuraciones de seguridad avanzadas y administración del dispositivo. Para trabajar con las tecnologías LoRa y LoRaWAN® resulta sencillo comenzar a implementar nodos y soluciones que se conecten a los servidores de TTN, si ya en nuestra ciudad hay una comunidad o grupo TTN con gateways que ya existan asociados a TTN.

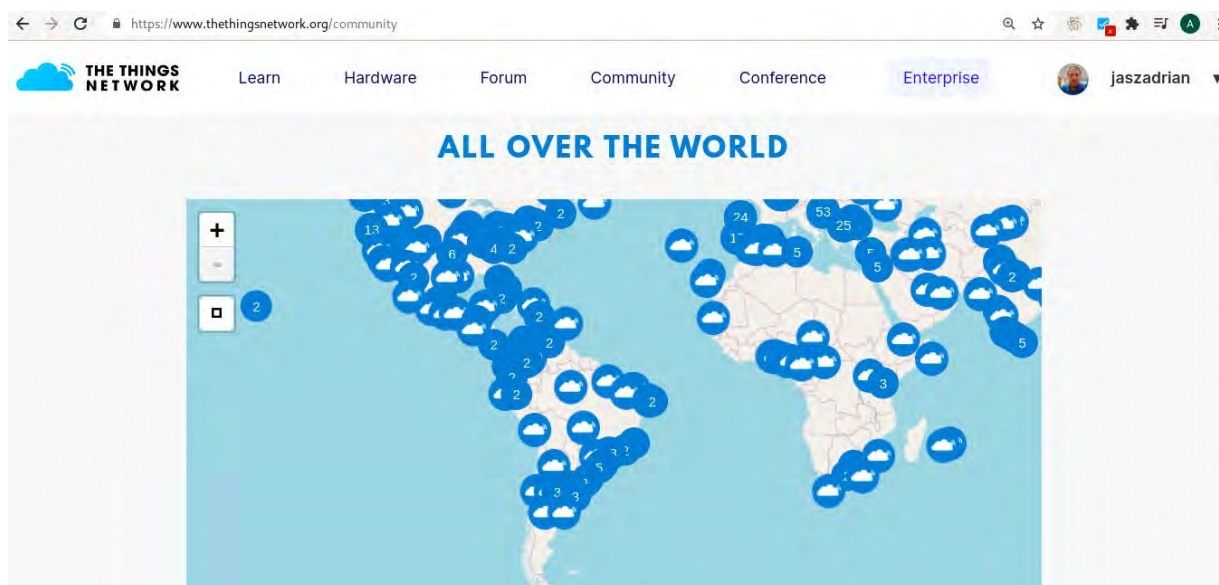


Fig. 4.14: Comunidad TTN en el mundo
fuente: (The Things Network, 2023)

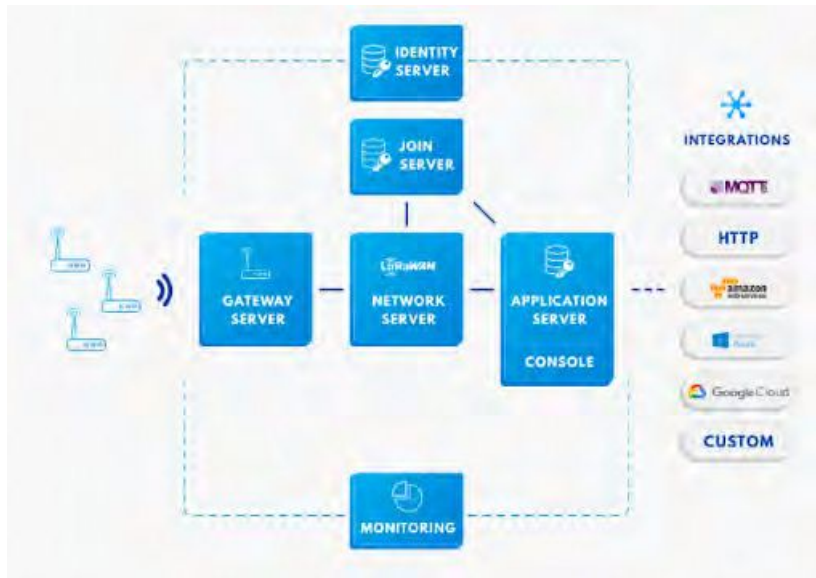


Fig. 4.15: Arquitectura LoRaWAN® de The Things Network
fuente: (The Things Network, 2023)

Una prueba realizada, fue comprobar el funcionamiento de este server creando una cuenta y asociando un gateway a TTN e integrando un nodo al server, como se muestra en la la Fig. 4.16

Como conclusión se puede decir que fue sencillo su utilización y configuración para comenzar con una primera experiencia de asociación de nodos a un server de red y aplicaciones.

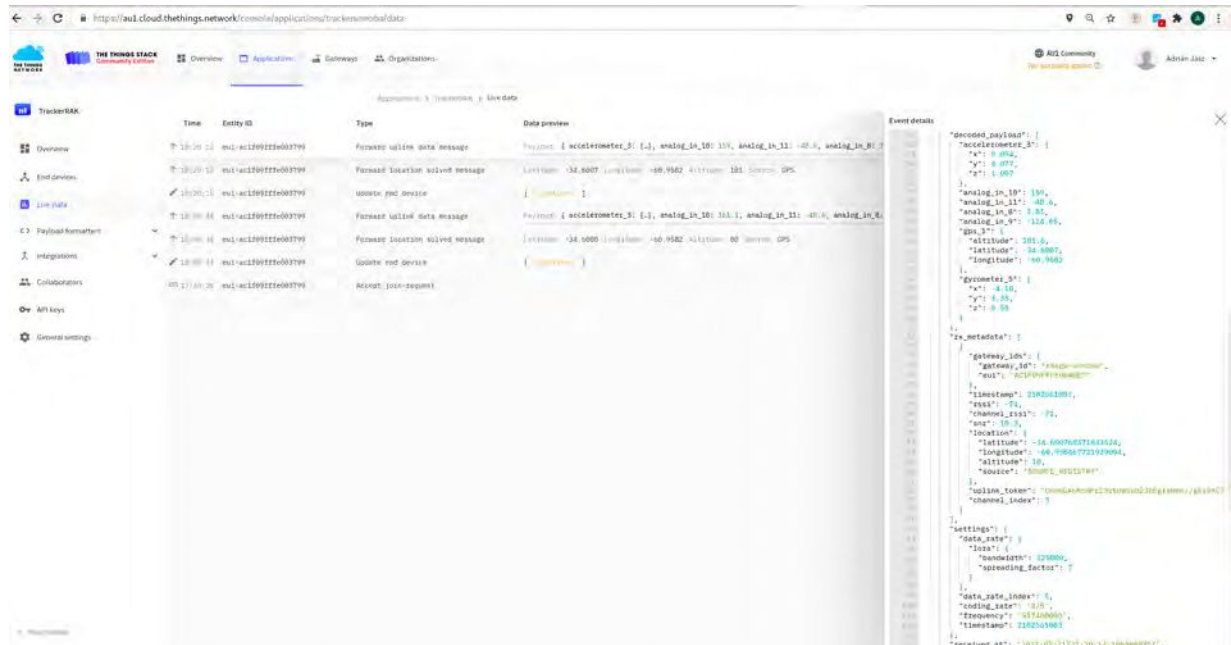


Fig. 4.16: Integración de un nodo a la Arquitectura LoRaWAN® de The Things Network
fuente: autor

4.3.2 ChirpStack

Otro servidor de red LoRaWAN® es ChirpStack, que proporciona componentes de código abierto para redes LoRaWAN®. Estos componentes juntos, proporcionan una infraestructura completa para la gestión de dispositivos, el enrutamiento de mensajes y la recopilación de datos en aplicaciones IoT, ver Fig: 4.17. Permite desplegar una red LoRaWAN® privada como pública, para aplicaciones finales en las que se necesitan un control total de la red. Todos los componentes están sujetos a la licencia MIT y pueden utilizarse con fines comerciales. (ChirpStack, 2023)

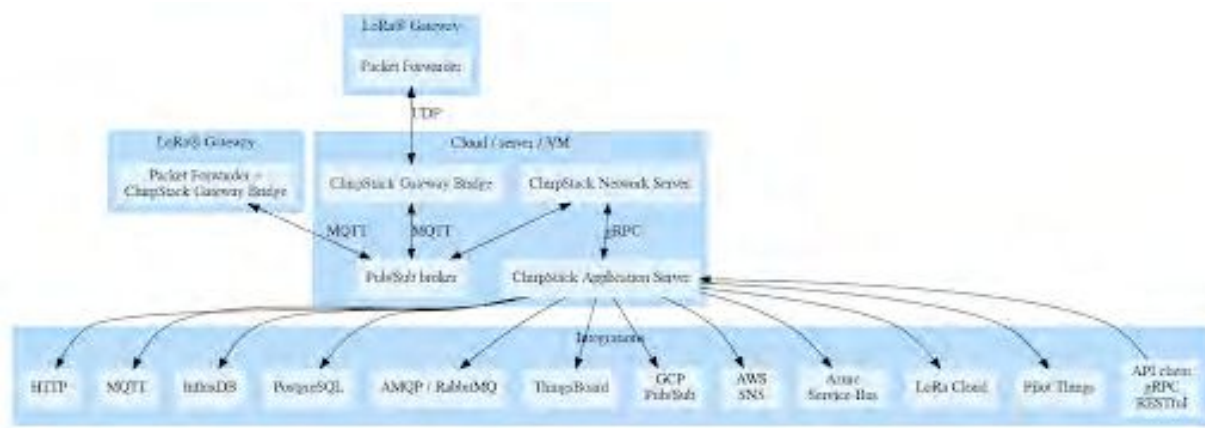


Fig. 4.17: Arquitectura LoRaWAN® de ChirpStack
fuente: (ChirpStack, 2023)

Se compone de tres componentes importantes, que son:

- **ChirpStack Gateway Bridge:** Este componente actúa como intermediario entre los gateways y el servidor de red. Recibe los mensajes de los dispositivos a través de los gateways y los reenvía al servidor de red. También maneja la autenticación y encriptación de los mensajes.
- **ChirpStack Network Server:** Este servidor es responsable de la gestión de la red de dispositivos. Gestiona la comunicación bidireccional entre los dispositivos y las aplicaciones, realiza el enrutamiento de los mensajes entre los gateways y los dispositivos, y almacena los metadatos y las configuraciones de los dispositivos.
- **ChirpStack Application Server:** Este componente proporciona una interfaz para las aplicaciones de IoT. Permite a los desarrolladores crear y administrar aplicaciones que interactúen con los dispositivos conectados. Proporciona API y herramientas para la gestión de dispositivos, envío y recepción de mensajes, gestión de datos y configuración de eventos.

Modelos de propagación

En este capítulo se analizan distintos modelos empíricos de propagación de ondas de radio en presencia de vegetación.

5.1 Propagación de señales

La propagación de señales se ve afectada por tres efectos: reflexión, difracción y dispersión. Estos factores influyen en la calidad y confiabilidad de la transmisión. La reflexión tiene lugar cuando las ondas encuentran superficies como la tierra, edificios o paredes, y rebotan en ellas. La difracción se manifiesta cuando una señal se encuentra con obstáculos que tienen formas irregulares, como bordes filosos u objetos con contornos no uniformes. La señal puede rodear estos obstáculos y llegar a zonas que estarían en su sombra, permitiendo la cobertura de áreas detrás de obstáculos. La dispersión surge en presencia de superficies rugosas, objetos pequeños y otras irregularidades en el entorno de transmisión. Por ejemplo, señales en calles urbanas, vehículos estacionados o vegetación generan dispersión al reflejar y refractar las ondas en diferentes direcciones (Sarkar et al., 2003).

La atenuación debida a la vegetación parece aumentar con la frecuencia. El ITU-R proporciona algunos modelos de atenuación en la banda UHF, como el antiguo modelo ITU-R (CCIR, 1986) para el exceso de atenuación debido a la vegetación. Hay distintos modelos de atenuación adicional, en el caso en que el emisor o el receptor se encuentra en una zona con vegetación desde el ya nombrado ITU-R, el modelo MED de Weissberger, el modelo fitted ITU-R y el modelo COST 235.

A la atenuación estimada por éstos modelos con vegetación, se le deben agregar cualquier otra pérdida no debida a la vegetación, como por ejemplo la incorporación de atenuaciones de: espacio libre, de tierra plana o dos rayos, etc.

$$P_{Rx}(dBm) = P_{Tx}(dBm) + G(dB) - L(dB) \quad (5.1)$$

Dónde:

P_{Rx} = Potencia Esperada en el receptor

P_{Tx} = Potencia de transmisión

G = ganancias del sistema asociadas con antenas de transmisión y recepción.

L = pérdidas asociadas con el sistema, conectores y cables de antenas, desvanecimiento y atenuaciones, etc.

5.2 Atenuación en espacio libre

La recomendación UIT-R P.525-4 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2019) 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 de la siguiente manera :

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (5.2)$$

donde:

L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre

d : distancia

λ : longitud de onda

d y λ se expresan en las mismas unidades.

La pérdida básica en el espacio libre se expresa en decibelios (dB) y aumenta proporcionalmente a la distancia y a la frecuencia de la señal.

La ecuación (5.2) puede también escribirse en función de la frecuencia en vez de la longitud de onda, (Rappaport, 2002) (de Fornel & Sizun, 2006). Donde quedaría de la siguiente manera, ecuación (5.3):

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \text{ [dB]} \quad (5.3)$$

donde:

f: frecuencia en Megahertz (MHz)

d: distancia en kilómetros (km)

5.3 Atenuación modelo de reflexión terrestre de dos rayos (Two-Ray Model Path Loss)

Este modelo 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. El modelo es más preciso en distancias largas y requiere que la antena transmisora esté situada a una altura de unos 50 metros sobre el nivel del suelo. Esto garantiza que la señal directa no se vea obstaculizada por elementos terrestres y proporciona un margen adecuado para las reflexiones en la superficie terrestre. (Rappaport, 2002).

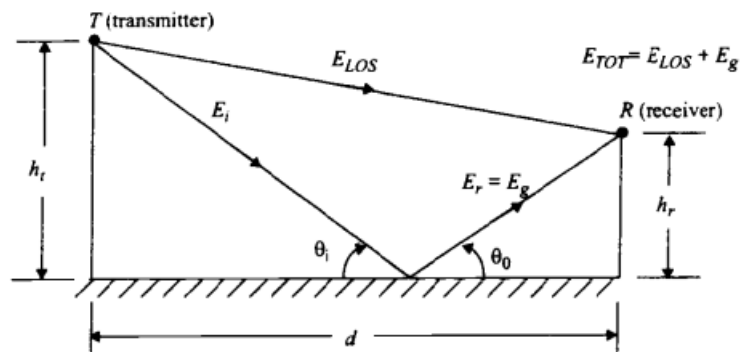


Fig. 5.1: Modelo de reflexión en el suelo de dos rayos

fuente: (Rappaport, 2002) Cap.3, Fig.3.7, pag.86

La ecuación incorpora la distancia entre las antenas del transmisor y el receptor en metros y las alturas de las antenas también expresadas en metros, como muestra la ecuación (5.4).

$$L_{pe} = 40 \log d - 20 \log h_t - 20 \log h_r \quad [dB] \quad (5.4)$$

donde:

d: distancia en metros (m)

h_t: Altura de la antena transmisora en m

h_r: Altura de la antena receptora en m

Es importante considerar que, además de las pérdidas mencionadas anteriormente, en situaciones reales, pueden existir obstáculos o barreras en la trayectoria de propagación de la señal, los cuales también deben ser tomados en cuenta, en nuestro caso, los modelos de propagación con vegetación

$$L_{total}[dB] = L_{bf} \text{ o } L_{pe}[dB] + Att_{(atenuaciones de propagación con vegetación)}[dB] \quad (5.5)$$

5.4 Zonas de fresnel

La zona de fresnel es una región elipsoidal que rodea la línea de visión directa entre el transmisor y el receptor, cuyo tamaño depende de la distancia entre ellos, así como de la frecuencia utilizada y las características del entorno de propagación. Su importancia radica en que cualquier obstrucción como edificios, vegetación terreno irregular dentro de esta zona puede causar atenuación o interferencia en la señal recibida.

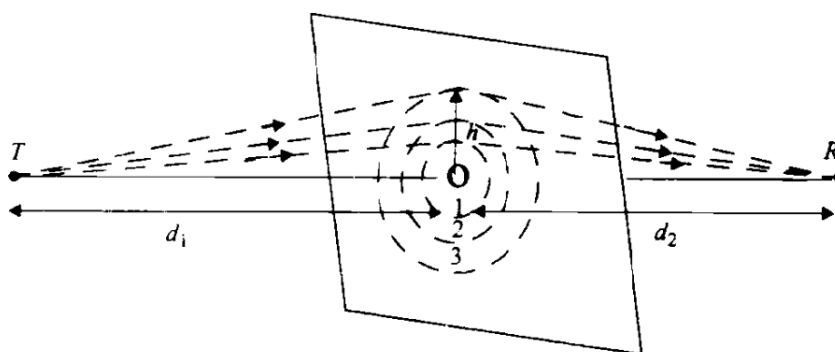


Fig. 5.2: Sucesivas zonas de fresnel

fuelle: (Rappaport, 2002) Cap.3, Fig.3.11, Pag.94

En general la primera zona de fresnel contribuye con la mayor parte de la energía con la que llega al receptor y puede evaluarse con la siguiente fórmula:

$$R = 17,3 * \sqrt{\frac{d1 * d2}{f * (d1 + d2)}} \quad (5.6)$$

f = frecuencia en GHz

d1 , d2 = distancias en Km hasta el obstáculo

R = radio de la primera zona de fresnel en m

5.5 Modelos empíricos de propagación con vegetación

Como se mencionó en la sección 5.1, existen varios modelos de atenuaciones debido a la vegetación, sin embargo, dado que LoRaWAN® opera en la banda de frecuencias sub-GHz, se utilizan las que son apropiadas para nuestro caso y son la base de análisis de las investigaciones tomadas como referencia (Insaurralde et al., 2020), (Richardson Ansah et al., 2020), (Raheemah et al., 2016).

5.5.1 Modelo de decaimiento exponencial (MED) de Weissberger

El modelo tradicional para predecir el aumento de la pérdida por la propagación a través de los árboles, es el modelo de decaimiento exponencial, en inglés, exponential decay (EXD). Ecuación (5.7).

$$Att_{(EXD)} = 0,26f^{0,77}d \text{ [dB]} \quad (5.7)$$

donde:

Att (EXD) es la pérdida debida a los árboles en dB

d: profundidad de los árboles en metros

f: frecuencia en Giga Herz (GHz)

En 1982, Weissberger (Weissberger, 1982) introdujo un modelo para mejorar la predicción del modelo de decaimiento exponencial. En este reporte, lo llama como modelo de decaimiento exponencial modificado, MED (modified exponential decay).

El modelo empírico MED de Weissberger se expresa como la ecuación (5.8):

$$Att_{(MED)} = \begin{cases} 1,33f^{0,284}d^{0,588} & \rightarrow 14m \leq d \leq 400m \\ 0,45f^{0,284}d & \rightarrow 0 \leq d < 14m \end{cases} \quad (5.8)$$

NOTA: La f es en GHz en este modelo

Es aplicable para un escenario en donde las antenas de transmisión y de recepción están inmersas en árboles densos, secos y con hojas, en latitudes templadas. La frecuencia puede ser de 230 MHz a 95 GHz.

Como el anterior, este modelo requiere sumarle las pérdidas de espacio libre o el modelo de tierra plana.

Se ve que esta ecuación (5.8) tiene un formato general que puede ser bien representado por la siguiente expresión:

$$Att_{(gral)} = Xf^Y d^Z \text{ [dB]} \quad (5.9)$$

Donde X, Y, y Z son variables de valores ajustados obtenidos de medidas.

5.5.2 Modelo ITU-R

Siguiendo esta tendencia, la comunidad internacional unión de telecomunicaciones (UIT) en 1986 desarrolló un modelo para la atenuación con vegetación ITU-R (CCIR, 1986) a partir de datos medidos en la banda de frecuencia ultra alta del espectro electromagnético ultra high frequency (UHF) por sus siglas en inglés. La medición se realizó con la antena transmisora y el punto receptor separados por una arboleda con una profundidad inferior a 400 metros. La frecuencia es aplicable entre los 200 MHz a 95 GHz. El modelo empírico se expresa como la ecuación: (5.10)

$$Att_{(ITU-R)} = 0,2f^{0,3}d^{0,6} \quad \rightarrow \quad d < 400m \quad (5.10)$$

d: profundidad de la vegetación en metros

f: frecuencia en MHz

5.5.3 Modelo FITU-R

Otro modelo es el ITU-R ajustado (FITU-R) propuesto por los autores (Al-Nuaimi & Stephens, 1998), donde expresan la atenuación como función de la frecuencia y la profundidad de la vegetación y proporciona predicciones cercanas para los dos casos genéricos de árboles 'con hojas' y 'sin hojas' y puede ser recomendado para su uso en el rango de frecuencias de 10 a 40 GHz. Ver ecuación (5.11).

$$Att_{(FITU-R)} = \begin{cases} 0,37f^{0,18}d^{0,59} & \rightarrow \text{árboles sin hojas} \\ 0,39f^{0,39}d^{0,25} & \rightarrow \text{árboles con hojas} \end{cases} \quad (5.11)$$

d: profundidad de la vegetación en metros

f: frecuencia en MHz

5.5.4 Modelo LITU-R

El modelo lateral UIT-R (LITU-R) propuesto en el artículo (Meng et al., 2009) examina la propagación de ondas de radio cerca del suelo en un entorno forestal en las bandas de frecuencia very high frequency (VHF) y UHF. La precisión de este modelo disminuye para la banda VHF y puede utilizar la siguiente expresión como indica en la ecuación (5.12)

$$Att_{(LITU-R)} = 0,48f^{0,43}d^{0,13} \quad (5.12)$$

d: es la profundidad de la vegetación en metros

f: es la frecuencia en MHz

5.5.5 Modelo COST235

El modelo de COST235 (COST235, 1996) es útil para frecuencias entre 9,6GHz a 57,6GHz y arboledas pequeñas menores a 200 metros. Las mediciones se realizaron en dos estaciones, cuando los árboles tienen hojas y cuando no las tienen, de esta manera la atenuación prevista por el modelo quedaría, como indica: (5.13)

$$Att_{(COST235)} = \begin{cases} 26,6f^{-0,2}d^{0,5} & \rightarrow \text{árboles sin hojas} \\ 15,6f^{-0,009}d^{0,26} & \rightarrow \text{árboles con hojas} \end{cases} \quad (5.13)$$

d: profundidad de la vegetación en metros

f: frecuencia en GHz

5.5.6 Tabla resumen

Se muestra una tabla resumen de los modelos donde X, Y, y Z son variables de valores de los distintos modelos. En color azul son los valores utilizados para la realización de los cálculos en la implementación.

$$Att_{(gral)} = Xf^Y d^Z [dB] \quad (5.14)$$

$$Att_{(atenuaciones de propagación con vegetación)} = Xf^Y d^Z [dB] \quad (5.15)$$

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 [MHz] entre 230 - 95000
ITU-R	0,2	0,3	0,6	0m <= d <= 400m Para f [MHz] entre 230 - 95000
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 Para f [MHz] entre 240 - 700
COST235	26,6	-0,2	0,5	árboles sin follaje
	15,6	-0,009	0,26	árboles con follaje Para f entre 9,6GHz-57,6GHz y arboledas pequeñas menores a 200 metros

Tab. 5.1: Valores empíricos para distintos modelos, en color azul los utilizados

La figura Fig. 5.3 muestra las pérdidas de propagación de espacio libre y el modelo de dos rayos de las ecuaciones (5.3) y (5.4), como así también los distintos modelos vistos de atenuaciones en presencia de vegetación, ecuaciones (5.8) a (5.13)

Recordar que la atenuación estimada por éstos modelos con vegetación, se le deben agregar cualquier otra pérdida no debida a la vegetación, como por ejemplo la incorporación de atenuaciones de: espacio libre o reflexión terrestre de dos rayos.

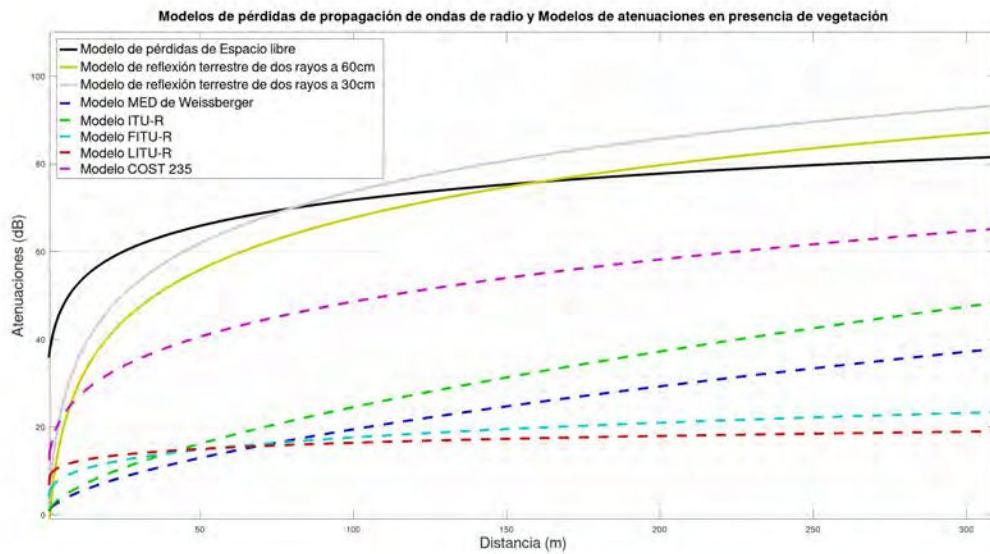


Fig. 5.3: Modelos de pérdidas de propagación y modelos de atenuaciones en presencia de vegetación
fuente: autor

Implementación de escenario de prueba y análisis de los resultados

En este apartado, se detallan los elementos y dispositivos empleados en la configuración del entorno de prueba de la red IoT LoRaWAN, tal como se ilustra en la figura 1.2, en un entorno rural. Se describen las herramientas de software utilizadas para el Network Server, el Application Server y la integración con una base de datos temporal, además de la aplicación de código abierto utilizada para visualizar gráficamente los datos transmitidos por los nodos sensores. Además, se lleva a cabo un análisis del impacto de la vegetación de la soja en la calidad de la señal entre los nodos y el gateway, de acuerdo con la configuración experimental.

6.1 Metodología de desarrollo

La metodología que se desarrolla para montar el escenario de prueba del sistema IoT LoRaWAN destinado a la recopilación de datos, se divide en seis tareas importantes que son: el armado del escenario, la elección y armado de los nodos y el gateway, la implementación del servidor de red y el de la integración para recolectar los datos más relevantes de los nodos sensores, y finalmente, la generación de gráficos que muestren información significativa de los nodos. Esta información incluye aspectos como RSSI, SNR, DRx (xSF/BW), ubicación geográfica, temperatura, humedad, entre otros. Con posibilidad de optar la visualización en tiempo real o históricos en una línea de tiempo elegida.

- **Tarea A: Selección y armado de escenario de prueba**
- **Tarea B: Selección y armado de los nodos**
- **Tarea C: Selección y armado del gateway**
- **Tarea D: Implementación del servidor de red LoRaWAN**
- **Tarea E: Implementación de la integración**
- **Tarea F: Armado de dashboards de información**

6.1.1 Tarea A: Selección y armado de escenario de prueba

La institución académica dispone de un área de investigación conocida como Campo Experimental "Las Magnolias", ubicada en el kilómetro 147 de la Ruta Nacional 188. Este espacio, abarca 84 hectáreas, mayoritariamente destinadas a parcelas agrícolas. En el mismo, se encuentran instalaciones como una granja educativa, un invernadero y tres galpones dedicados a la cría de cerdos. Además, en la zona central, se dispone de un salón de usos múltiples, dos aulas, un laboratorio y oficinas administrativas. En el año 2022, se sembraron parcelas experimentales de maíz y soja, como una propuesta complementaria a las actividades de investigación, vinculación y docencia de la Universidad (Escuela de Agrarias, Naturales y Ambientales, Noticias, Universitarias., 2022). Las parcelas de soja son más adecuadas para establecer un escenario de prueba apropiado, ya que presentan mayor uniformidad y homogeneidad en el momento de recolección de muestras en comparación con el maíz en etapa de cosecha, lo que permite una implementación más eficiente de las actividades de investigación alineadas con los intereses de los responsables del campo de la Universidad.

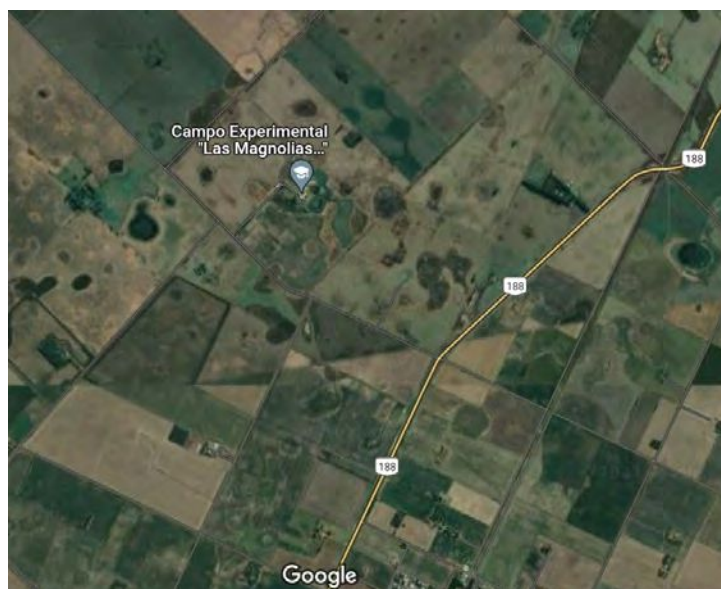


Fig. 6.1: Campo Experimental de UNNOBA "Las Magnolias"
fuente: autor

En la Fig. 6.2 se observa en el mapa de Google, las cinco ubicaciones de tomas de muestras, junto con la posición del Gateway, que está situado en la zona de laboratorios y oficinas a una altura aproximada de 7 metros.



Fig. 6.2: Cinco puntos de tomas de muestras
fuente: autor

Según (UBA Facultad de agronomía, [s.f.](#)), la soja, es una planta herbácea con una amplia variedad morfológica, presenta un tallo principal que se ramifica, así como ramificaciones laterales, con una altura que varía entre 30 y 150 cm. Las parcelas dedicadas al cultivo de soja, en el Campo Las Magnolias, consisten en hileras que abarcan aproximadamente unos 10 metros de longitud y ocupan una extensión de alrededor de una hectárea. Éstas parcelas se encuentran ubicadas en las proximidades de galpones destinados a la cría de cerdos, como se muestra en la Fig. 6.3. Durante el proceso de toma de muestras, la soja se encuentra en la fase fenológica R3-R4, de acuerdo a (Banfi,J., [2019](#)) caracterizada por el completo desarrollo de las hojas con una altura que oscila entre 80 y 90 cm.

Las ubicaciones de los cinco puntos de tomas de datos, junto con las distancias al Gateway y la distancia de vegetación de cada sitio, son los que se muestra en la tabla Tab. 6.1 .



Fig. 6.3: Zona de parcelas de soja

fuente: autor

Puntos	Latitud	Longitud	Distancia al Gateway	Distancia con soja
1er Punto	-34,4789	-60,8762	230m	0m
2do Punto	-34,4788	-60,8761	230m	12m
3er Punto	-34,4787	-60,8763	250m	30m
4to Punto	-34,4785	-60,8765	280m	64m
5to Punto	-34,4783	-60,8767	310m	89m

Tab. 6.1: Puntos de toma de datos

6.1.2 Tarea B: Selección y armado de los nodos

Se emplean los nodos WisTrio LoRa Tracker, que están equipados con un microcontrolador de ultra bajo consumo ARM Cortex-M3 STM32L1 y se comunican mediante el chip SX1276 LoRa. Además, el módulo Ublox Max 7Q GPS facilita la activación del modo de bajo consumo de energía del GPS. Estos nodos incluyen un sensor ambiental integrado, el BME680, que realiza mediciones de gas, presión, humedad y temperatura, así como un acelerómetro de 3 ejes, el LIS3DH. (RAK Documentation Center, 2023).

En cuanto a conectividad, ofrecen la opción de antenas SMA/iPEX para LoRa y GPS. La antena utilizada para la comunicación LoRa es de conexión **SMA** con una ganancia de **2.0 dBm**. Su potencia de transmisión máxima es de **20dBm** y su potencia de recepción mínima es de **-130dBm**.

Es compatible con el protocolo LoRaWAN V1.0.2 y permite ser registrado mediante activación por aire (OTAA) o activación por personalización (ABP). **Utilizaremos OTAA.**

Las opciones de alimentación incluyen micro USB y/o la capacidad de ser alimentado y recargar la batería a través del puerto micro USB o solar de 5 V.

En cuanto a las bandas de frecuencia, admite bandas ISM libres de licencia a nivel global, incluyendo EU433, CN470, EU868, US915, AS923, KR920, IN865 y **AU915**, ésta última es la que utiliza.

Los nodos se ubican en cajas estancas de 10x10x10cm, como muestra la Fig. 6.4 .



Fig. 6.4: WisTrio LoRa Tracker

fuelle: autor

Cada nodo sensor se transporta en un trípode, para mantener la altura de las mediciones, ver las Fig. 6.5.

- El nodo RAK5205_01 se ubica a unos 30cm
- El nodo RAK5205_03 se ubica a unos 60cm



Fig. 6.5: Nodos sensores en las ubicaciones
fuente: autor

Los nodos se configuran mediante el uso de comandos AT, con una herramienta llamada RAK Serial Port Tool ¹ a través del puerto serie, en este caso al COM3, a una velocidad de 115200 bits/s que facilita la configuración, como muestra la Fig. 6.6. El nodo RAK5205_03 configurado en AU915 , **sin confirmación** y **sin ADR** activados, en **DR2**, SF10, 125 kHz, con un envío de **43 bytes de datos**, a intervalos de **60 segundos**. Entre los que se envían:

Datos del BME680 sensor data:

¹<https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/Software-Tools/>

Humidity: xxx %RH

Temperature:xxx degree

Pressure:xxx hPa

Gas_resistance: xxx ohms

y del LIS3DH sensor data:ACC_X: xxxmg, ACC_Y: xxxmg, ACC_Z: xxxmg

y del GPS

latitude: xxx

longitude:xxx

altitude:xxx

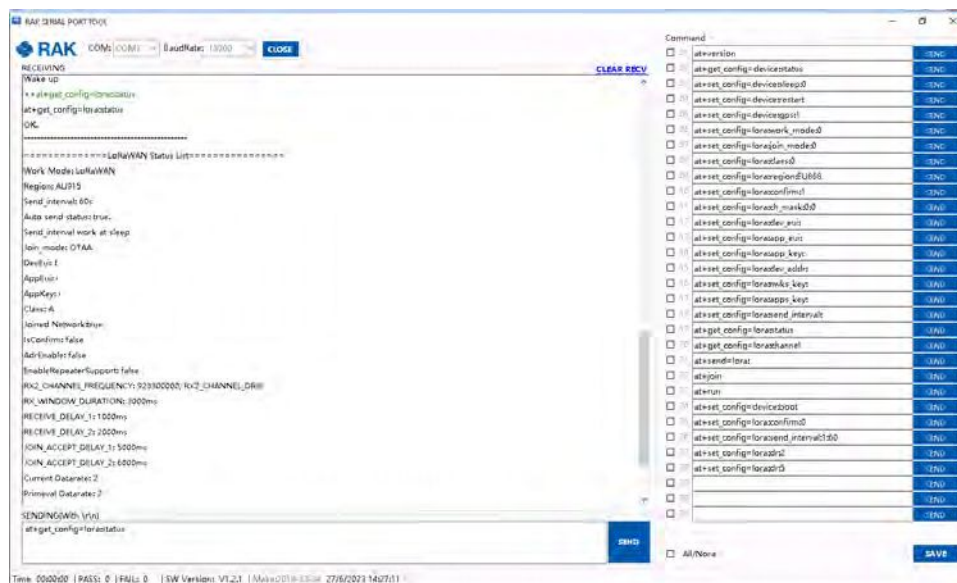


Fig. 6.6: Herramienta Serial Port Tool de RakWireless

fuente: autor

6.1.3 Tarea C: Selección y armado del gateway

El armado del gateway, se realiza con un kit de desarrollo RAK7243C LPWAN de la marca Rakwireless ², que integra una Raspberry Pi 3B+ y un módulo RAK2245 ³, que desempeña el papel de un transceptor LoRa, como se ilustra en la Fig. 6.7 . El armado es en una caja estanca, para ser utilizado en el exterior. Se envía energía, a través de un cable con (Power over Ethernet) PoE para su alimentación y cuenta con una **antena exterior de 3dBi**, como se muestra en la Fig. 6.8.

El gateway es de 8 canales, configurado en el **segundo octeto de 8 a 15 de 125kHz**, de los 64 canales disponibles que cuenta la especificación AU915, visto en la sección 4.2.8.

²<https://www.rakwireless.com/>

³https://github.com/RAKWireless/rak_common_for_gateway

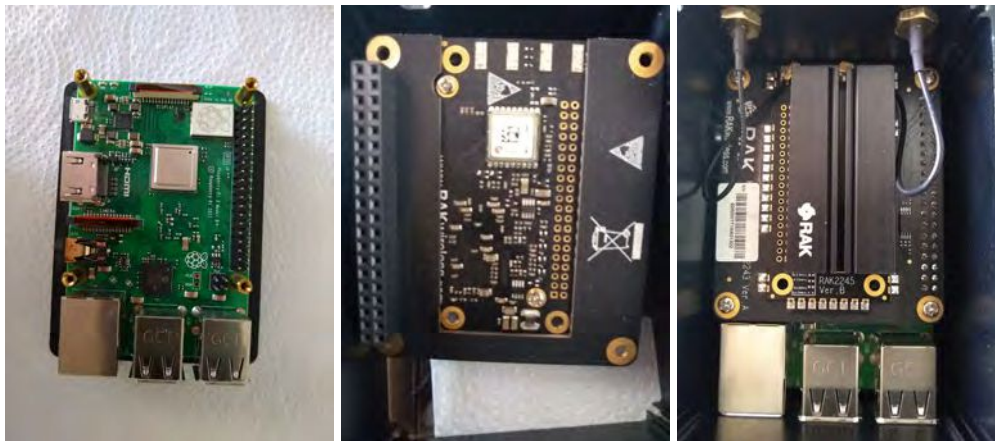


Fig. 6.7: Raspberri Pi con módulo RAK2245
fuente: autor



Fig. 6.8: Gateway en caja estanca para exterior
fuente: autor

La ubicación del gateway, es en el sector de laboratorios y oficinas, proporcionando acceso a internet y suministro eléctrico para su alimentación, mediante una fuente PoE. Está montado en la parte superior de un mástil, elevándose a aproximadamente 7 metros, como se ilustra en la Fig. 6.9.



Fig. 6.9: Gateway a 7 metros de altura

fuelle: autor

6.1.4 Tarea D: Implementación del servidor de red LoRaWAN

El servidor de red LoRaWAN implementado es ChirpStack, con los componentes *chirpstack-gateway-bridge*, *chirpstack-network-server* y *chirpstack-application-server*, ver la Fig. 6.10 con las versiones instaladas. Éstos componentes juntos, forman una solución, que incluye una interfaz web fácil de utilizar para la administración del gateway y dispositivos. (ChirpStack, 2023). La configuración se realiza accediendo a la url *chirpstack.unnoba.edu.ar:8080* .

```

pi@rak-gateway:~$ dpkg -l | grep chir
ii  chirpstack-application-server  3.17.9      armhf      ChirpStack Application Server
ii  chirpstack-gateway-bridge     3.14.6      armhf      ChirpStack Gateway Bridge
ii  chirpstack-network-server     3.16.7      armhf      ChirpStack Network Server

```

Fig. 6.10: Componentes con versiones de ChirpStack instalados en Raspberry Pi

fuelle: autor

Para añadir uno o varios gateways, se deben completar campos obligatorios, incluyendo el **nombre**, su **descripción**, **ubicación** (que puede obtenerse a través del GPS del propio gateway o proporcionar coordenadas específicas) y un **gateway_ID** único. Este último, sirve como identificador único utilizado para reconocer y llevar a cabo las operaciones relacionadas con un gateway en particular, como se muestra en la Fig. 6.12. Éstas operaciones incluyen, configurar la comunicación con el gateway, supervisar su estado y ver la cantidad de paquetes recibidos y transmitidos por los dispositivos, observar los datos recibidos, entre otras funcionalidades, detalladas en la Fig. 6.11.

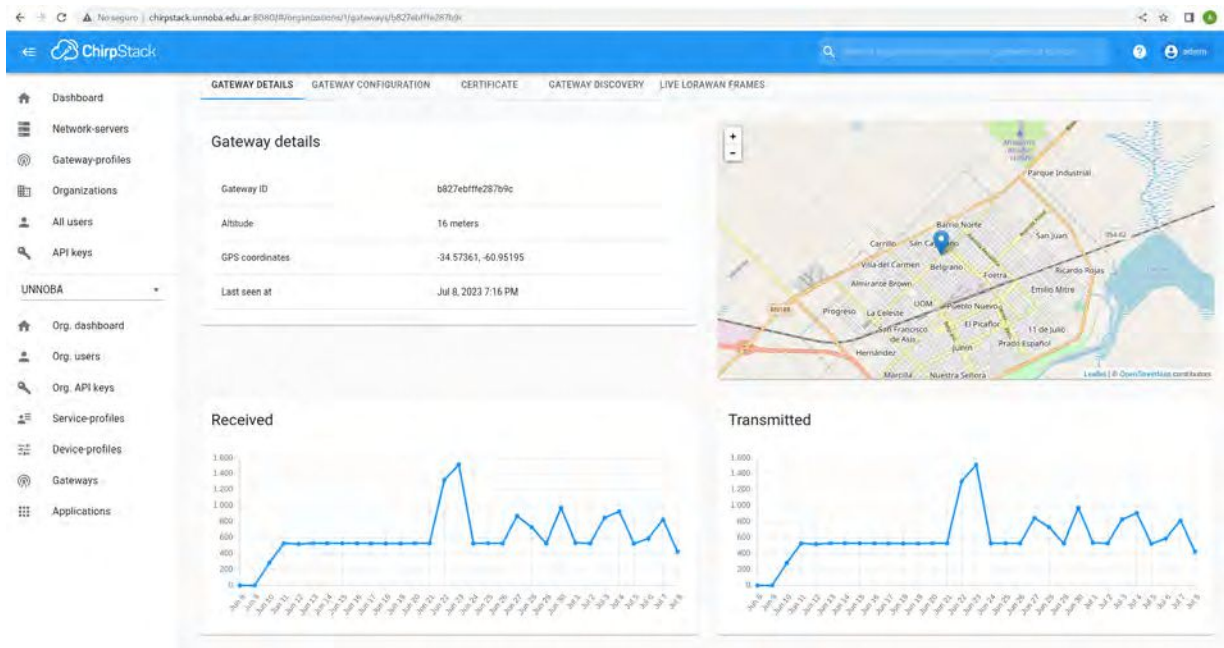


Fig. 6.11: Configuración de Gateway

fuentes: autor

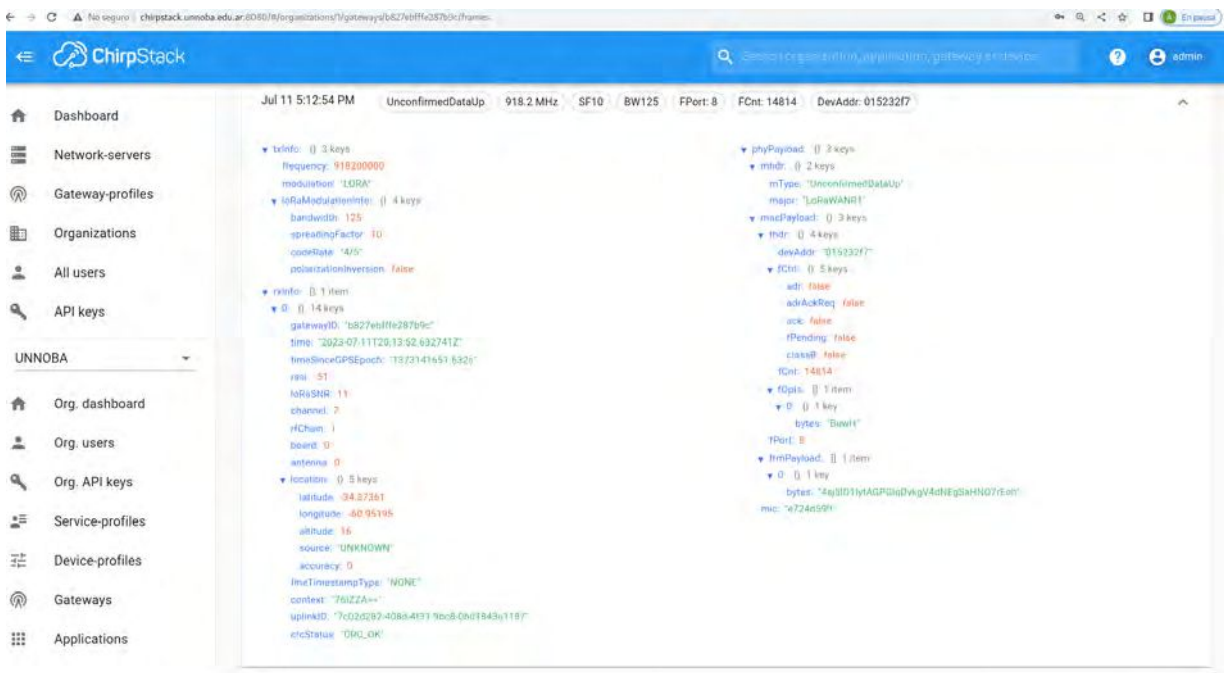


Fig. 6.12: Captura de datos recibidos de un nodo RAK5205 en el Gateway

fuentes: autor

Los perfiles de dispositivos, consisten en configuraciones predefinidas que establecen los parámetros y comportamientos de los dispositivos que están vinculados a la red LoRaWAN. Cada perfil de dispositivo o conjunto de dispositivos, especifica distintas características particulares, como la clase de dispositivo, que puede ser: A, B o C, siendo la A la utilizada; el tipo de conexión a la red,

OTAA la utilizada o ABP. Ver Fig. 6.13 donde los nodos RAK5205 se configuran con este perfil utilizando las anteriores configuraciones marcadas, junto con la *Versión 1.0.2 b* de LoRaWAN.

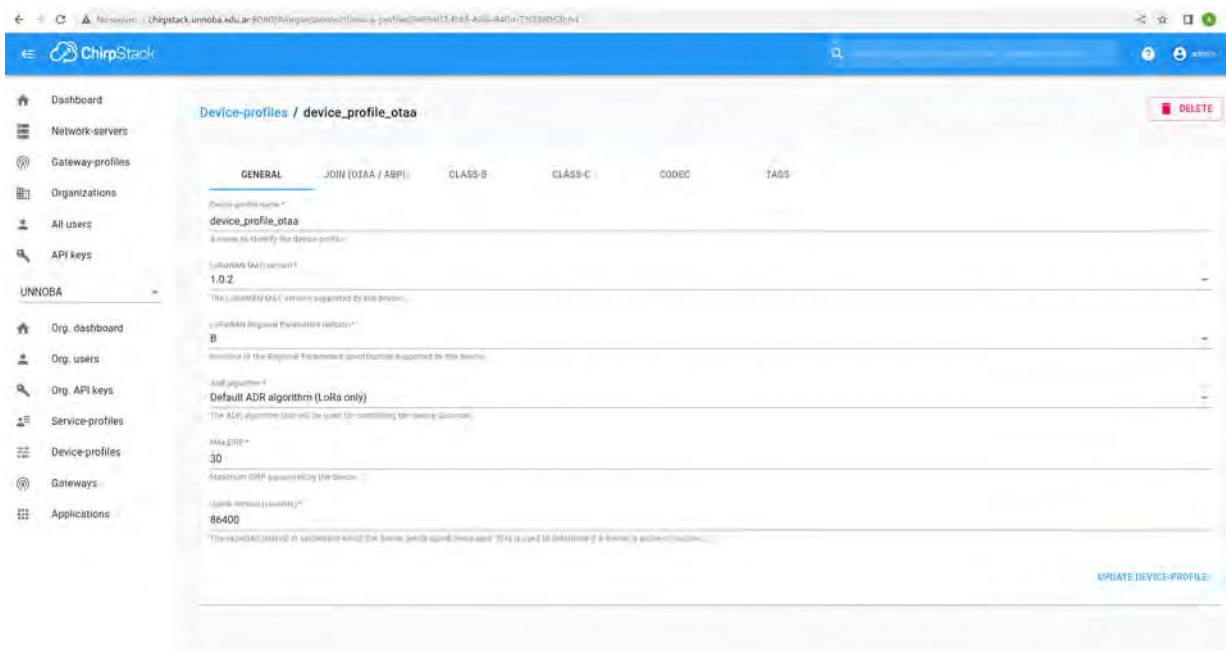


Fig. 6.13: Perfiles de los dispositivos

fuentes: autor

6.1.5 Tarea E: Implementación de la integración

Para establecer las integraciones con las aplicaciones, que definen cómo se envían los datos provenientes de los dispositivos o se procesan a través de otros sistemas o servicios, la capa de Application Server de ChirpStack ofrece integraciones con diversos servicios en la nube, sistemas de notificación, mensajería, bases de datos, entre otros. La configuración y gestión de estas integraciones se lleva a cabo en la sección de *Application*, donde se definen las aplicaciones de IoT y se gestionan los datos de los dispositivos conectados a la red LoRaWAN.

En este contexto, los datos recibidos por los dispositivos RAK5205 se integran con una base de datos de series temporales denominada *InfluxDB V1.8.4*, y se envían y almacenan en dicha base de datos a través de la dirección <http://lorawan.unnoba.edu.ar:8086/write>. Para obtener más detalles, consultar la Fig. 6.14.

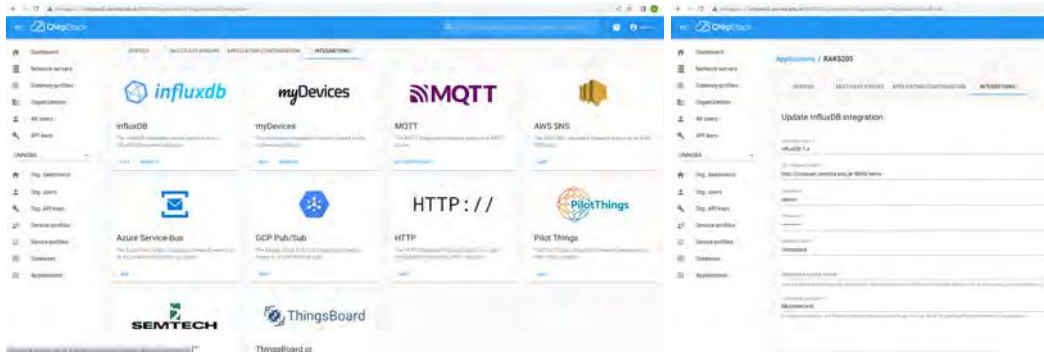


Fig. 6.14: Distintas posibilidades de integración y configuración de la integración de la aplicación de los nodos RAK5205

fuelle: autor

En la sección *Applications/RAK5205/Devices/RAK5205_03*, se presenta un ejemplo de los datos transmitidos por el dispositivo RAK5205_03, identificado por su devEUI:60c5a8fffe76019f. En la terminal, se evidencia la recepción y el almacenamiento de estos datos en la base de datos, siendo la tabla de datos de humedad denominada *device_frmpayload_data_humiditySensor_7*. Consultar la Fig. 6.15 para una visualización detallada de este proceso.

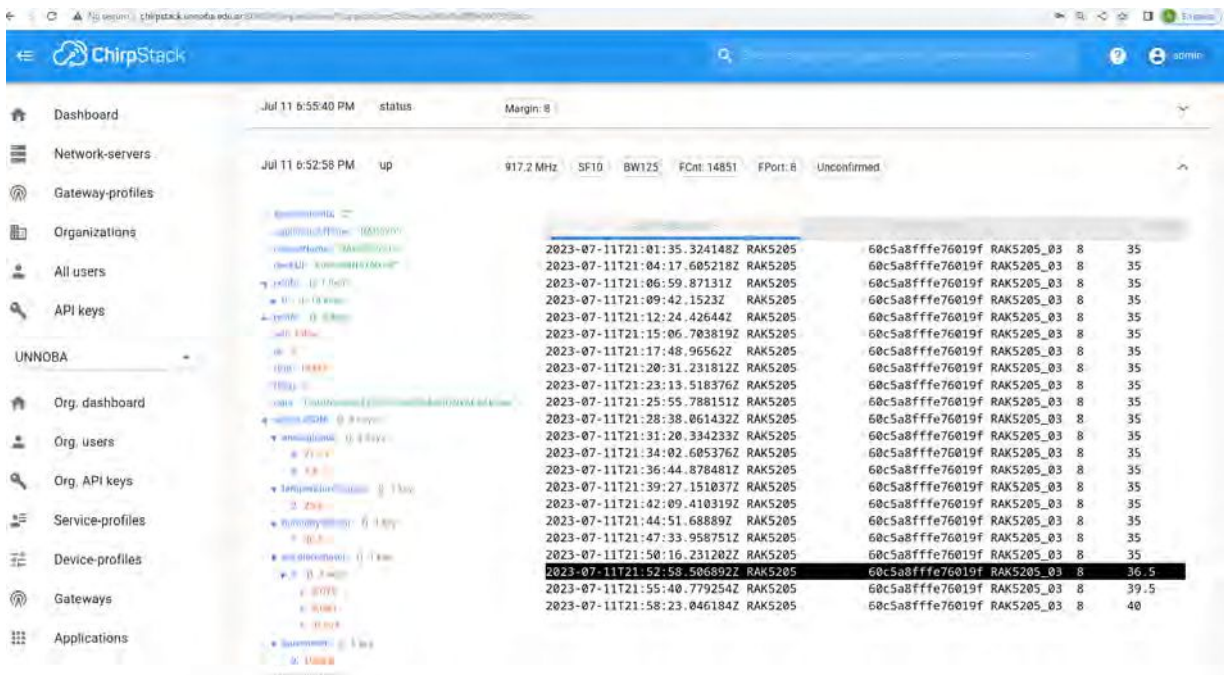


Fig. 6.15: Sección Applications/RAK5205/Devices/RAK5205_03 datos enviados y recibidos en la base InfluxDB

fuelle: autor

6.1.6 Tarea F: Armado de dashboards de información

Con el propósito de construir dashboard informativos y simplificar la supervisión y análisis, se instaló la aplicación Grafana en un servidor. Grafana, posibilita la creación de dashboard personalizados con gráficos, lo que facilita la visualización de datos en tiempo real o con escalas temporales, para obtener detalles más precisos. Esta aplicación se integra con la base de datos InfluxDB, tal como se muestra en la Fig. 6.16.

Para llevar a cabo esta integración, se utiliza una máquina virtual con un Domain Name Server (DNS) interno denominado *lorawan.unnoba.edu.ar*, alojado dentro de la infraestructura central de la Universidad situada en la ciudad de Junín. El mismo funciona con un sistema operativo Ubuntu 18.04.4 LTS (GNU/Linux 4.15.0-166-generic x86_64) y cuenta con 20 GB de espacio en disco y 2 GB de memoria RAM.

La sede *Las Magnolias* se encuentra conectada a la sede central de la Institución mediante un enlace inalámbrico de 20 Mbps, proporcionado por un proveedor local. Sobre este enlace, se establece una red intranet y se asegura mediante una Virtual Private Network (VPN) una comunicación fluida y segura entre ambas sedes, garantizando un intercambio eficiente de datos desde gateway, Network Server y Application Server.

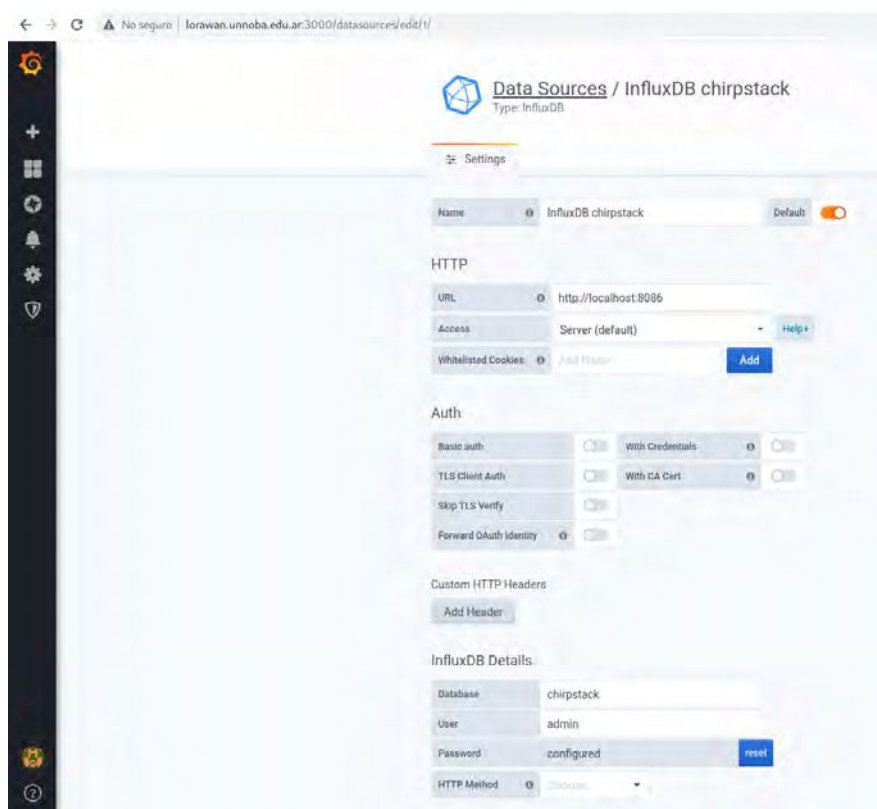


Fig. 6.16: Configuración de la base de datos InfluxDB en grafana
fuente: autor

La utilización de Grafana para la visualización de datos, permite observar en tiempo real la representación mediante indicadores, parámetros, como: temperatura, humedad, presión barométrica y calidad del aire⁴. Además, Grafana, facilita la visualización histórica mediante gráficas, que muestran la evolución de los datos a lo largo del tiempo. Ver la Fig. 6.17 para una representación visual detallada.



Fig. 6.17: Nodo Sensor de: Temperatura, Humedad, Presión barométrica y Index for Air Quality (IAQ) - RAK5205_03

fuente: autor

El dashboard a continuación, proporciona información detallada sobre el nodo seleccionado, incluyendo los valores de RSSI y SNR recibidos en el gateway, el tipo de DR que está utilizando el nodo, su ubicación representada en un mapa y su trayectoria a lo largo del tiempo, gracias a la inclusión del complemento TrackMap⁵. Este último, está instalado en Grafana. Además, se presenta una tabla que muestra valores de tiempo, RSSI, SNR, latitud y longitud, siendo útil para exportar estos datos y realizar análisis posteriores. Los detalles del dashboard se encuentran en la Fig. 6.18.

⁴El sensor MOX (óxido metálico) se calienta y absorbe moléculas de oxígeno, variando su conductividad y, por ende, su resistencia, lo que permite calcular un índice de calidad del aire. Consultar https://download.datasheets.com/pdfs2/2021/12/28/6/13/10/415730/bsc_/manual/bst-bme680-ds001.pdf

⁵TrackMap para Grafana, creado por Carey Metcalfe, visualiza puntos GPS como una línea en un mapa interactivo. Ofrece opciones de fondos de mapas, como OpenStreetMap, OpenTopoMap e imágenes de satélite.

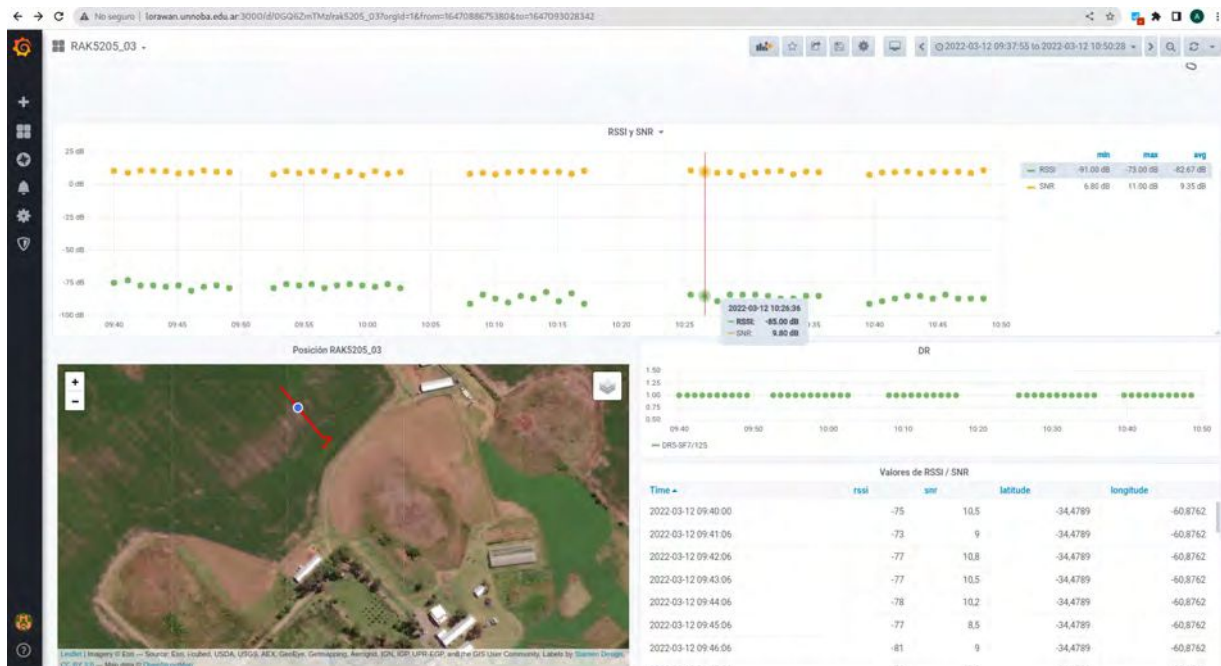


Fig. 6.18: Puntos de tomas de muestras vistas en la Aplicación
fuente: autor

6.1.7 Cuadro resumen de parámetros

La siguiente tabla 6.2 es un resumen de las configuraciones de los nodos y parámetros utilizados, para realizar la experimentación :

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

Tab. 6.2: Parámetros de los nodos y el gateway

6.2 Análisis de las mediciones

Se evalúa la calidad de la señal de los nodos ubicados a diferentes alturas, junto con el gateway, de acuerdo con la configuración experimental previamente detallada, con el objeto de estudiar la influencia de la vegetación de la soja. Para este propósito, se realiza un primer estudio utilizando los dashboards de información de los nodos y de comparación de datos entre nodos. Esto permite llevar a cabo un análisis inicial y la exportación de datos, para que en una segunda instancia, con GNU Octave, versión 8.4.0 (Eaton et al, 2024), se elaboren los cálculos y gráficas correspondientes de los diferentes modelos de propagación.

6.2.1 Dashboard de comparación

Se elaboró un dashboard de comparación con los datos observados de RSSI y SNR, que llegan al gateway, de los nodos RAK5205_01 y el RAK5205_03 de acuerdo a la configuración del DR2 y DR5 utilizado en los nodos para su comparación y análisis.

Con ambos nodos configurados con DR5 (SF7/125kHz):

Tomando los 5 puntos de observación, comenzado el 12 de marzo de 2022 desde las 9:39hs hasta las 10:48hs como muestra la Fig. 6.19 los valores de RSSI y SNR recibidos en el gateway junto con una tabla de los mínimos, máximos y promedio. Se evidencia de manera visual que tanto el nodo RAK5205_01 como el RAK5205_03, ambos configurados con DR5, presentan una disparidad de 11 dBm en el RSSI de los promedios, RSSI-RAK-01: -93,67dB y RSSI-RAK-03: -82,67dB, ver Fig. 6.20.

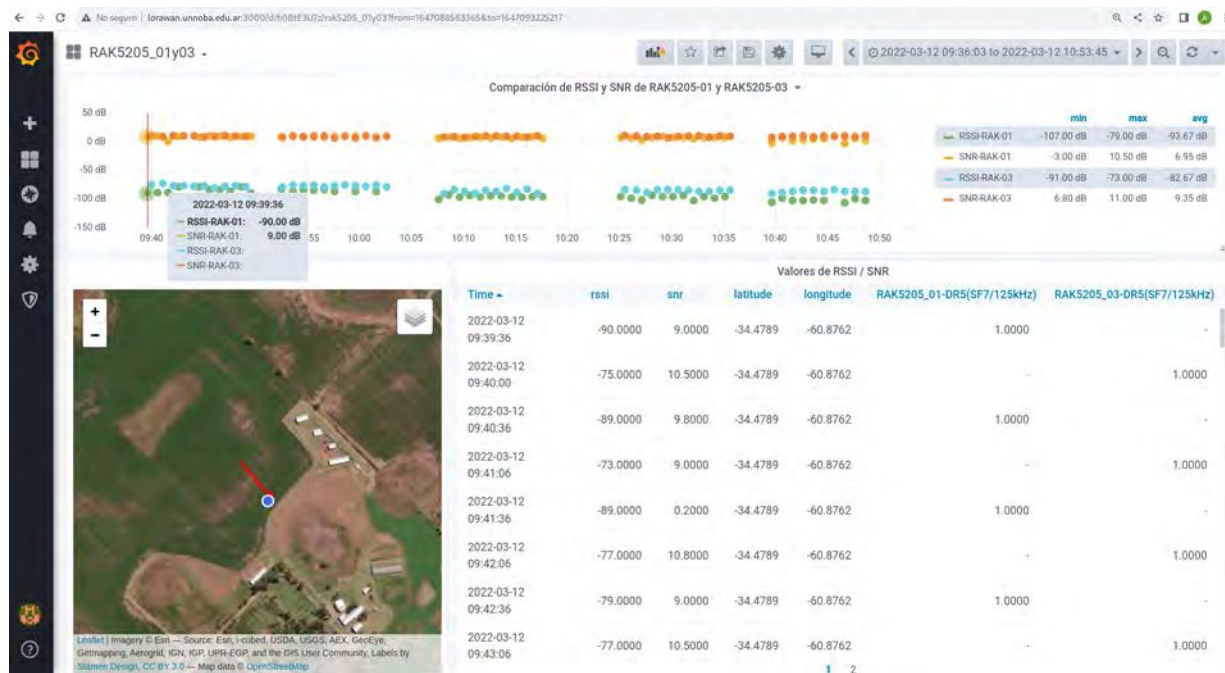


Fig. 6.19: Comparación RAK5205_01 y RAK5205_03 con DR5 (SF7/125kHz)

fuelle: autor

	min	max	avg
RSSI-RAK-01	-107.00 dB	-79.00 dB	-93.67 dB
SNR-RAK-01	-3.00 dB	10.50 dB	6.95 dB
RSSI-RAK-03	-91.00 dB	-73.00 dB	-82.67 dB
SNR-RAK-03	6.80 dB	11.00 dB	9.35 dB

Fig. 6.20: mín máx avg - DR5 (SF7/125kHz)

fuelle: autor

Con ambos nodos configurados con DR2 (SF10/125kHz):

Cuando RAK5205_01 y RAK5205_03 se encuentran configurados con DR2, se comienza por el punto 5 a 310 metros del gateway a las 11:15hs del 12 de marzo del 2022, hasta llegar al punto 1 a 230 metros del gateway a las 12:13hs, ver Fig 6.21. Ahora la diferencia entre los promedios es de 9,16 dBm, Fig. 6.22 .

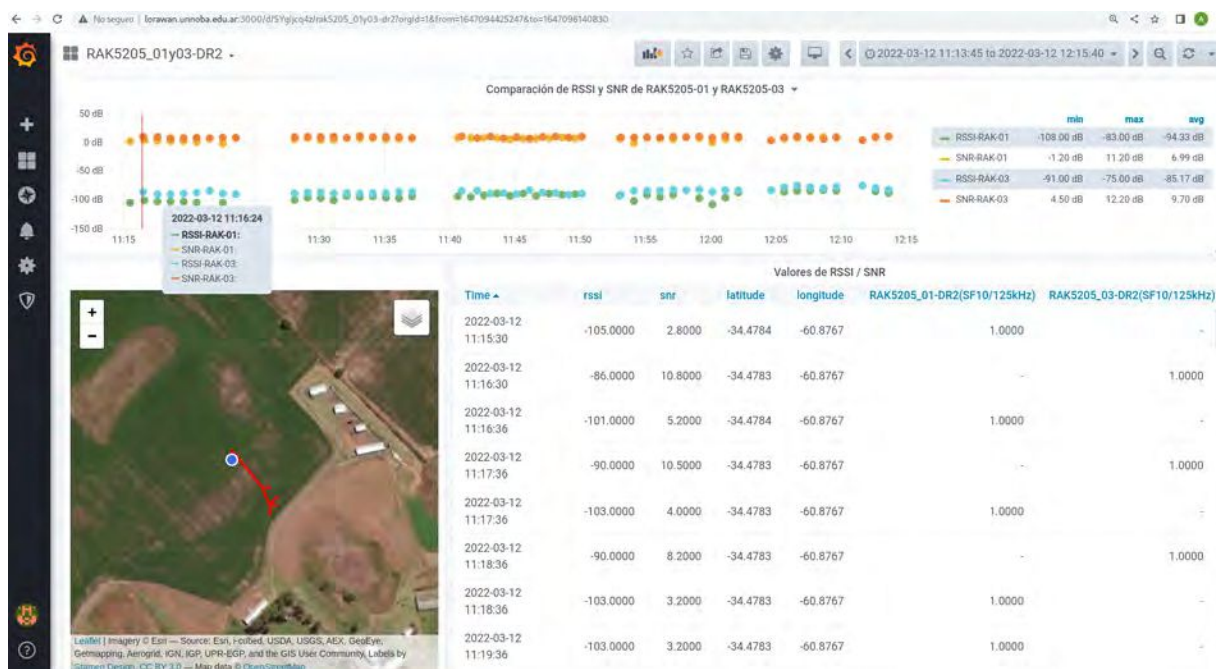


Fig. 6.21: Comparación RAK5205_01 y RAK5205_03 con DR2 (SF10/125kHz)

fuelle: autor

	min	max	avg
RSSI-RAK-01	-108.00 dB	-83.00 dB	-94.33 dB
SNR-RAK-01	-1.20 dB	11.20 dB	6.99 dB
RSSI-RAK-03	-91.00 dB	-75.00 dB	-85.17 dB
SNR-RAK-03	4.50 dB	12.20 dB	9.70 dB

Fig. 6.22: mín máx avg - DR2 (SF10/125kHz)

fuelle: autor

Se aprecia una interferencia más pronunciada con el RAK5205_01, que se encuentra a 0,3 metros sobre el nivel del suelo, especialmente en los datos relevados en el punto 5 de observación. Como también, se percibe en el RAK5205_03, una mejor SNR, una mejor calidad de la señal recibida, de ésta manera, si los nodos tuvieran activado ADR se optimizaría al SF más chico, para maximizar la capacidad de la red y la vida útil de la batería del nodo, como se vio en la sección 3.5.4 .

A su vez, en el RAK5205_01 con DR2 el mínimo SNR fue -1,20 dB y con DR5 el mínimo -3dB donde la señal está inmersa en ruido e igualmente se decodifica, porque como se vió en la sección 3.5.2 para DR2/SF10 el mínimo es -15 dB y para DR5/SF07 es -7,5 dB.

Como conclusión se observa que no hay grandes disparidades entre las dos elecciones de los DR para este análisis y se debe a que las distancias son relativamente cercanas entre los nodos y el gateway.

Las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales en el día de las mediciones de campo, dan cuenta que en promedio, se realizaron con una temperatura de unos 28 °C, 44 % de humedad y una presión atmosférica de 1010 hPascales, lo que indica un clima acorde para la fecha de realización de las muestras. También, se observa las ubicaciones que fue teniendo el nodo, cuando envió los datos de los sensores.



Fig. 6.23: Datos de sensores en el dashboard del nodo RAK5205_01
fuente: autor

6.2.2 Comparación de las mediciones con los distintos modelos

Se toma como base la ecuación (6.1), donde la potencia de recepción 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 (modelos vistos en Sección 5.2 y Sección 5.3) según sea el caso de evaluación, menos las atenuaciones provistas por la vegetación (Sección 5.5) :

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{bf} \text{ o } L_{pe} - Att_{(atenuaciones de propagación con vegetación)} \quad (6.1)$$

Se utiliza el RMSE, que es la abreviatura de Root Mean Square Error, que sería el Error de la Raíz Cuadrática Media, para medir la desviación promedio de las predicciones del modelo, con respecto a los valores reales. Cuanto menor sea el valor del RMSE, mejor será la precisión del modelo.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_{real} - x_{pred})^2} \quad (6.2)$$

Siendo:

n es 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

Cálculos de RMSE y gráficas

Para los cálculos de RMSE y gráficas, se toman para evaluar los datos obtenidos de los nodos RAK5205_01 a 0,3 metros y RAK5205_03 a 0,6 metros. Los datos son los valores de RSSI de los dashboards de cada nodo RAK5205_01 y RAK5205_03 con la configuración de cada DR de los mismos. Se utilizan cuatro programas con GNU octave, ver Fig: 6.24. Son para cada nodo RAK5205_01 y RAK5205_03 para el calculo de espacio libre más las atenuaciones con vegetación y para el modelo de reflexión terrestre de dos rayos y los modelos de atenuación con vegetación.

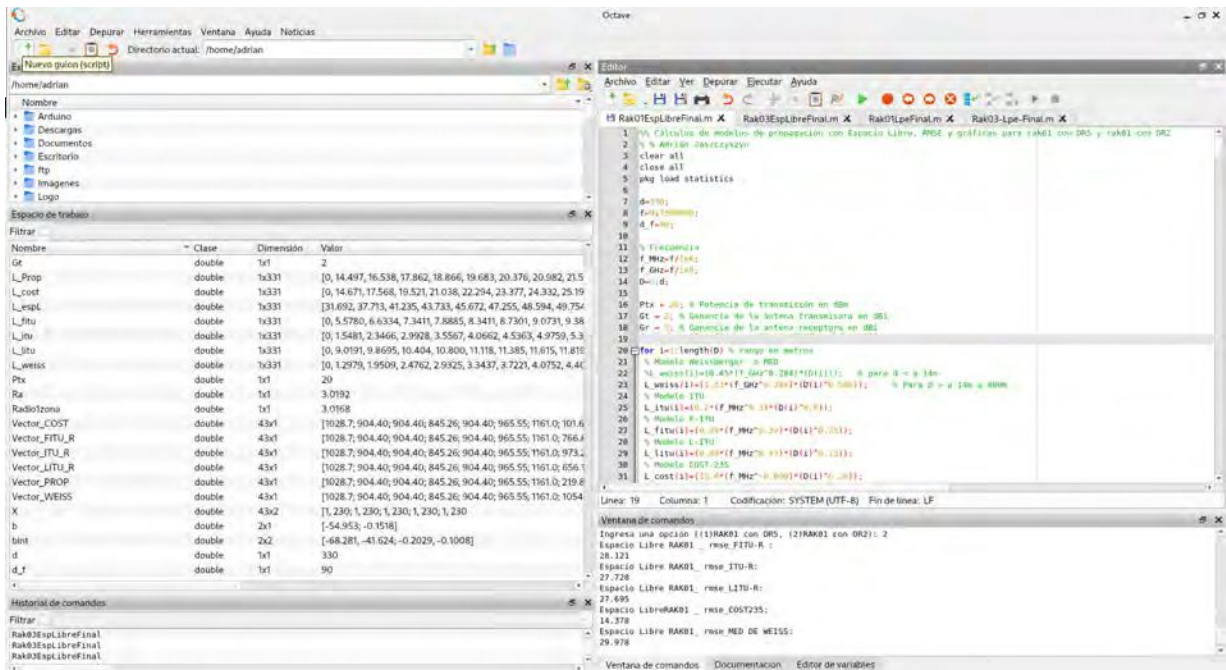


Fig. 6.24: Programas en Octave para cálculos de RMSE y gráficas

fuelle: autor

Para el modelo de espacio libre, se agrupa los RMSE con cada modelo de atenuación con vegetación para el nodo RAK5205_01 con ambos DR y para nodo RAK5205_03 con ambos DR y se resume en la siguiente tabla:

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	28,121	30,078	14,378	29,977	27,727

RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Modelo de Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	27,742	27,523	14,703	29,193	26,876

RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Modelo de Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	19,446	18,987	13,811	21,349	19,460

RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Modelo de Espacio Libre				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	17,021	16,705	14,412	18,669	16,778

Tab. 6.3: Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación

Luego, se realiza las cuatro gráficas de las atenuaciones del modelo de espacio libre con la suma de los modelos en presencia de vegetación, con los valores obtenidos de cada nodo con ambos DR se realiza una regresión lineal con los datos observados en cada punto de observación, a los 230, 250, 280, 310 metros del gateway. Las gráficas son las siguientes:

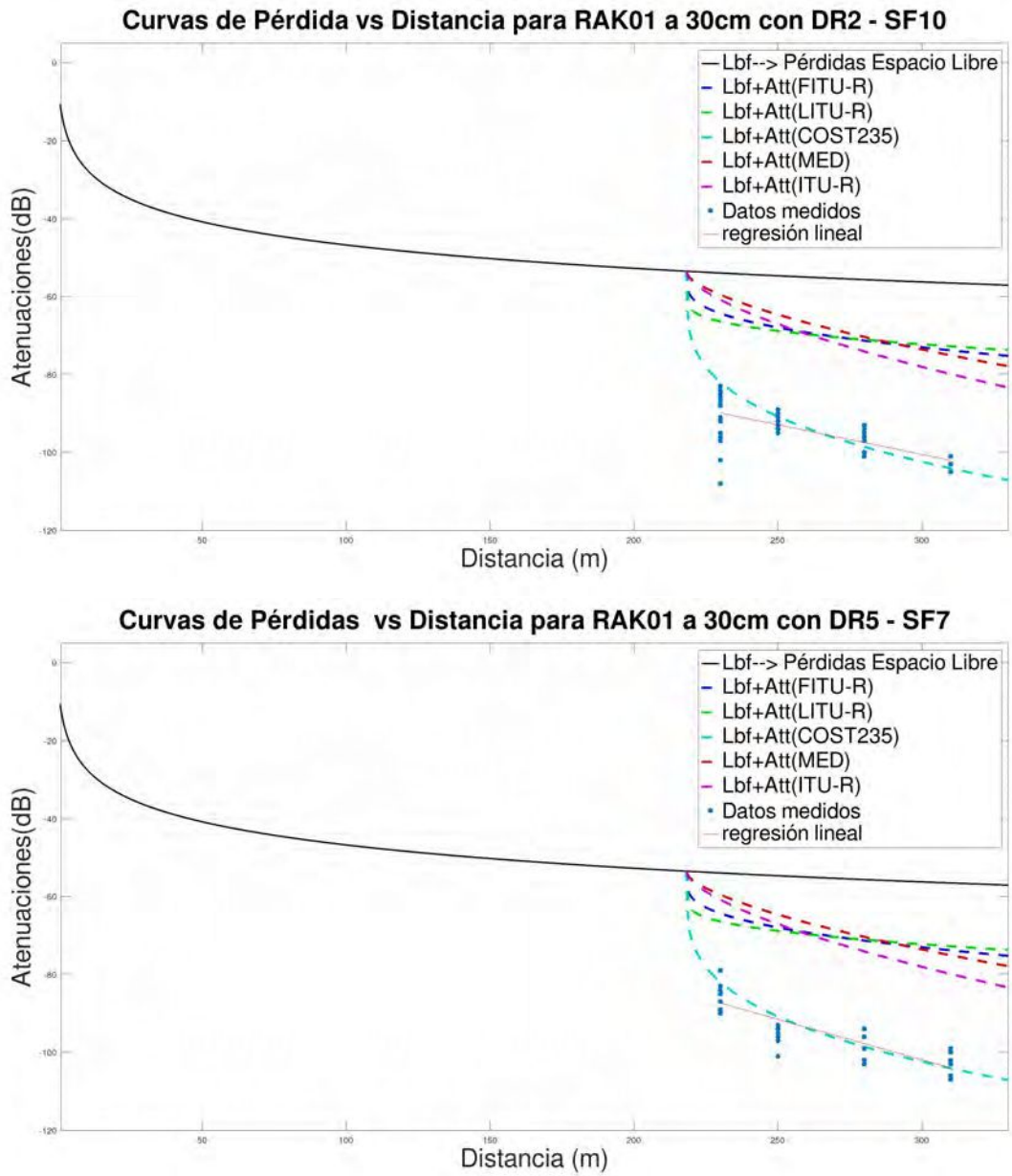


Fig. 6.25: Modelo de Espacio Libre y atenuaciones de vegetación en RAK5205_01
fuente: autor

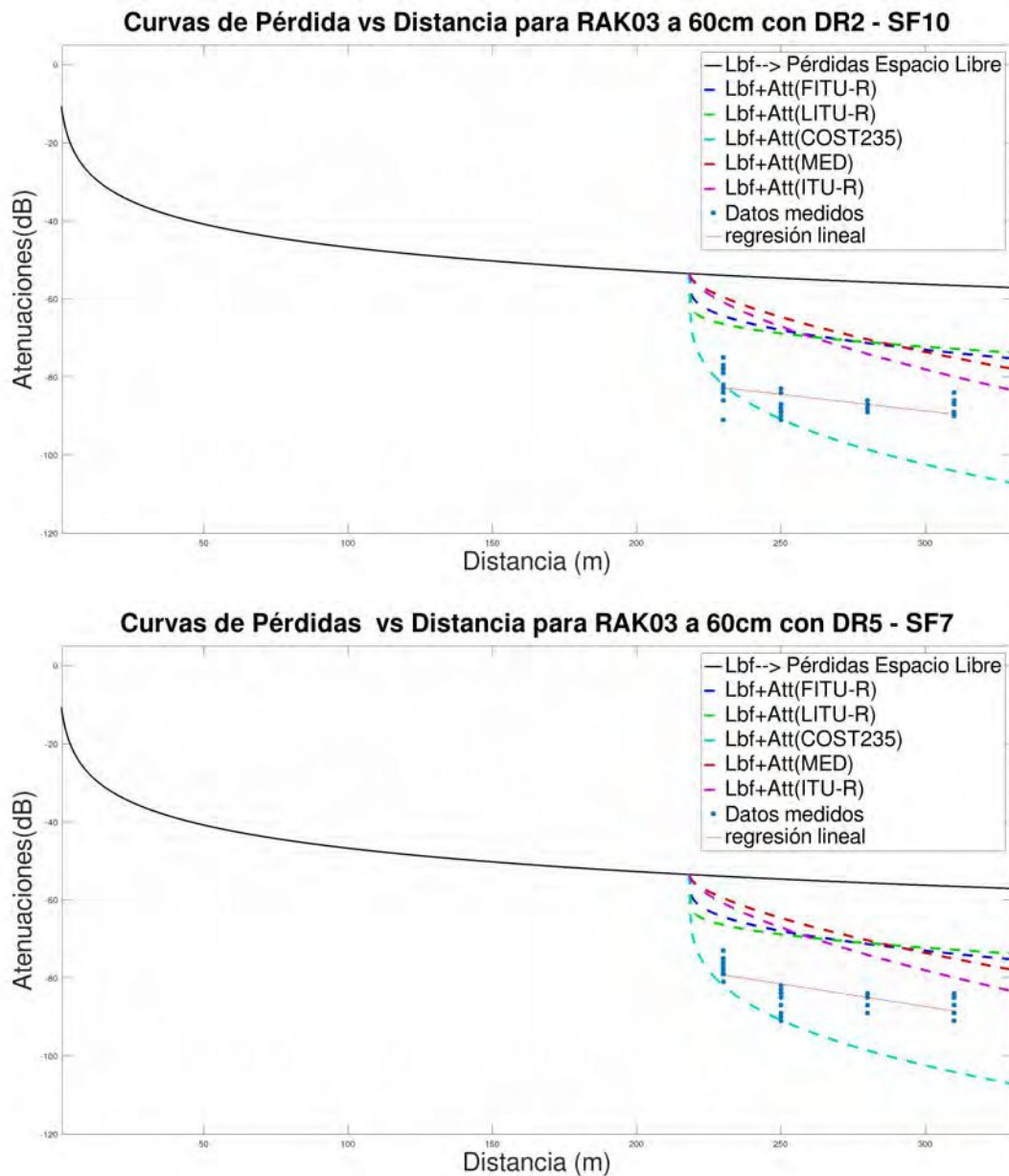


Fig. 6.26: Modelo de Espacio Libre y atenuaciones de vegetación en RAK5205_03
fuente: autor

Es relevante la ubicación de los nodos, como lo indicaba (Farhad et al., 2019) que situaban interés en la ubicación y elevación de las antenas, como así también, ponían énfasis en la importancia del SF en la cobertura. En este caso de estudio, como las distancias en que se toman las muestras en la experiencia son cortas, con menos de 310 metros entre el gateway y los nodos, no se observa un impacto representativo en la recepción, entre las dos configuraciones de los nodos con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz). La misma observación se ve, haciendo uso del dashboard de comparación, en los promedios del RSSI-RAK01 para DR5: -93,67dB y DR2: -94,33dB, Fig. 6.20 y Fig. 6.22 no hay unas diferencias relevantes.

Comparando con las alturas de los nodos y sus ubicaciones, el nodo RAK5205_01 ubicado a 0,3m del nivel del suelo, se observa que la **pendiente** es más pronunciada, ver Fig. 6.25, que la que tiene el RAK5205_03 ubicado a 0,6m, a medida que se avanza en la distancia con la vegetación, ver Fig. 6.26. La misma situación se observa con los dashboard de comparación, donde en el punto de observación más lejano del gateway a unos 310 metros y con 89 metros de soja, el punto P5, los valores de RSSI tienen más separación entre los RSSI-RAK01 y RSSI-RAK03, ver Fig. 6.27.



Fig. 6.27: Punto 5 de observación

fuelle: autor

En cuanto al RMSE el que mejor se aproxima es el modelo de espacio libre más la atenuación con presencia de vegetación COST235, para los dos DR y las dos alturas. Ninguna da menor de dos cifras. Da inquietud porque en el RAK5205_01 no dan valores más cercanos a 0, al observar la Fig. 6.25 la pendiente se encuentra cercana a la del modelo COST235. Éste interrogante se verá más adelante.

Para el modelo de reflexión terrestre de dos rayos, se agrupa los RMSE con cada modelo de atenuación con vegetación para el nodo RAK5205_01 con ambos DR y para nodo RAK5205_03 con ambos DR y se resume en la siguiente tabla:

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	18,319	17,861	13,173	20,230	18,219
RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	17,811	17,608	13,317	19,258	17,138
RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	15,737	15,226	15,281	17,714	16,092
RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	13,331	12,980	16,509	15,028	13,486

Tab. 6.4: Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación

Luego, se realiza las cuatro gráficas de las atenuaciones del modelo de reflexión de dos rayos con la suma de los modelos en presencia de vegetación, las gráficas son las siguientes:

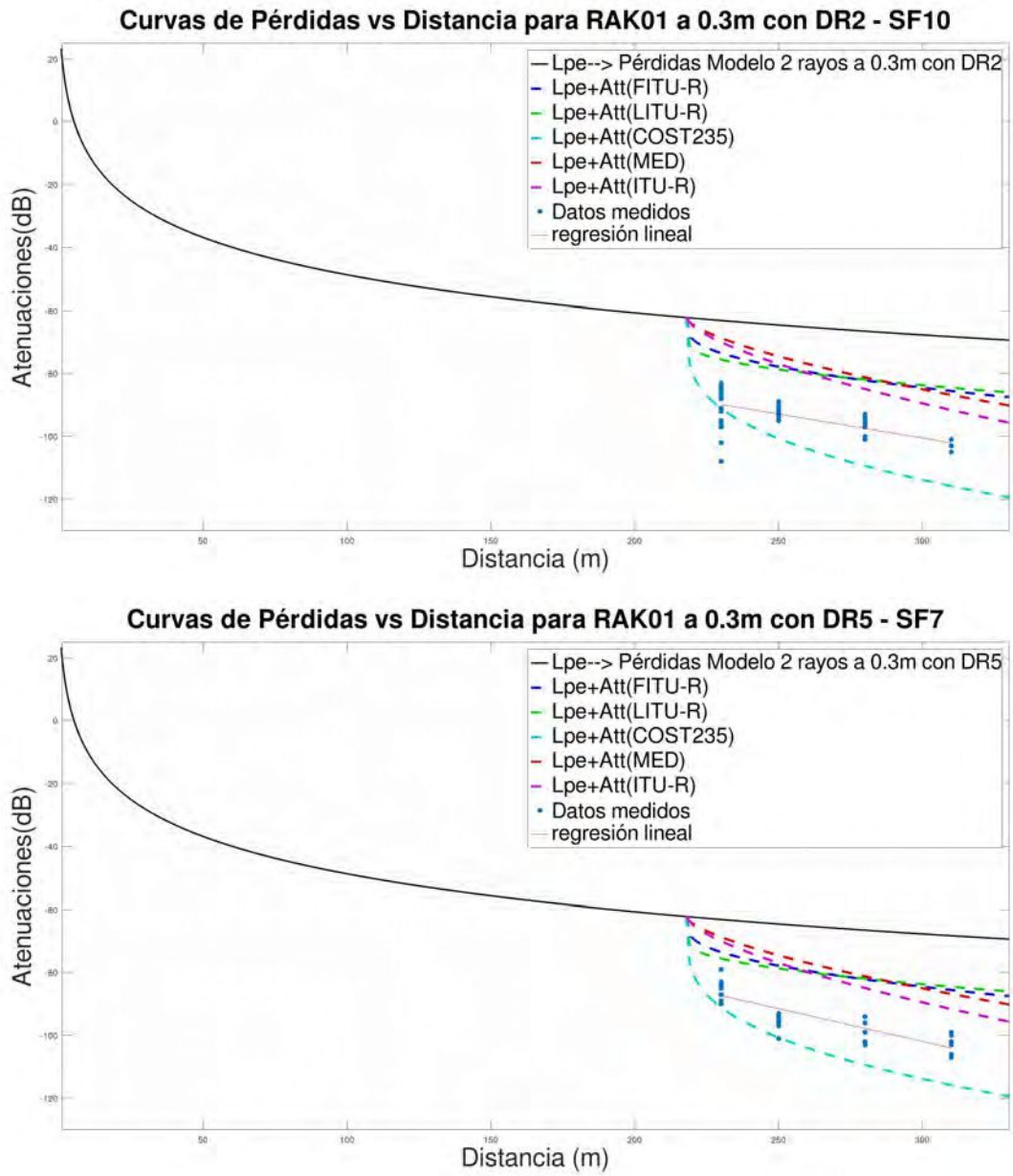


Fig. 6.28: Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones de vegetación en RAK5205_01
fuente: autor

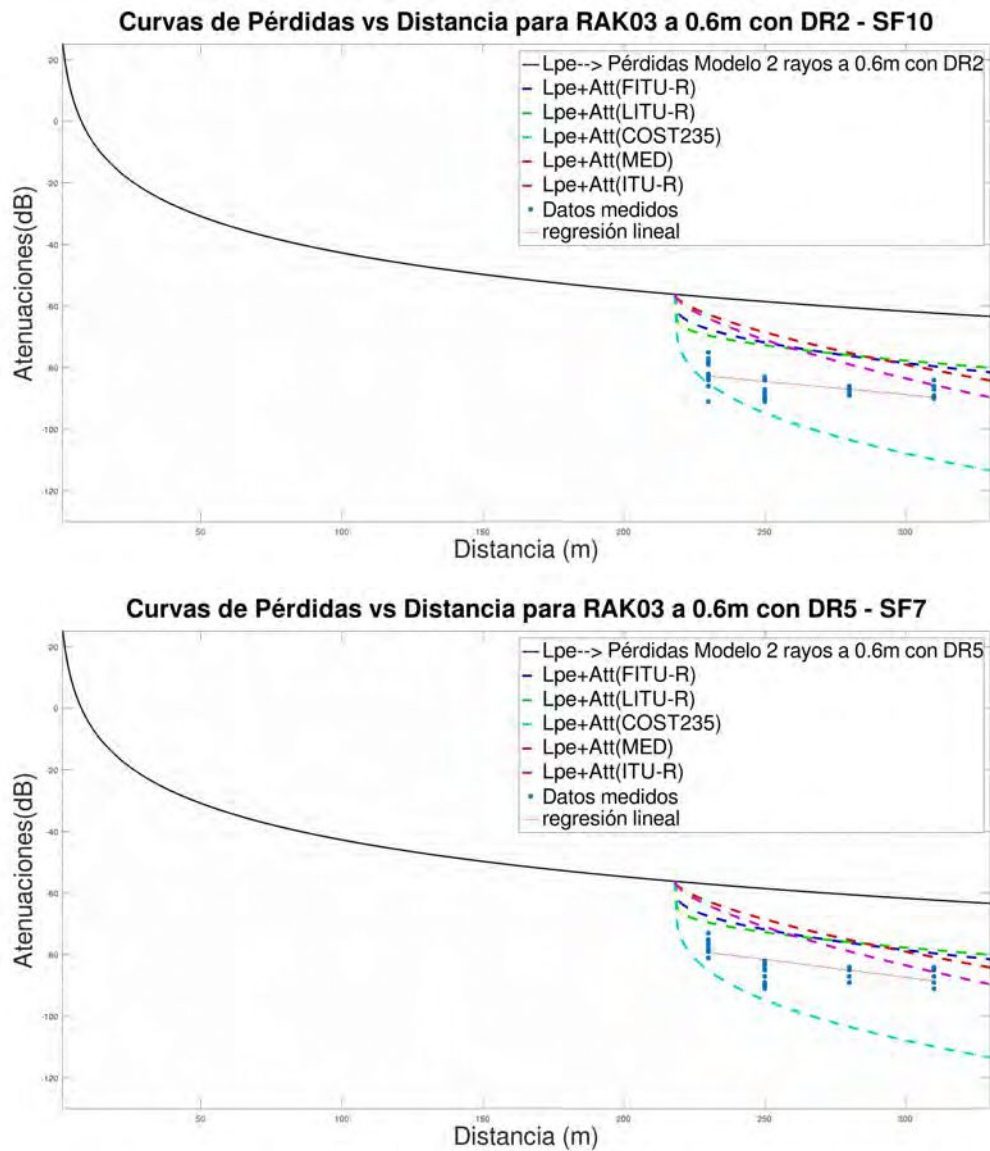


Fig. 6.29: Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones de vegetación en RAK5205_03
 fuente: autor

Para ésta comparación del modelo de reflexión terrestre de dos rayos y las atenuaciones de los modelos con vegetación, los valores observados se encuentran entre, el modelo de COST235 y los otros modelos con vegetación. Ahora, para el RAK5205_01 para ambos DR, el que mejor aproxima es el modelo de COST235 y para el RAK5205_03 para ambos DR, es el modelo LITU-R. También, ninguno de los modelos baja de las dos cifras. La atención se encuentra en los valores RMSE de las tablas 6.3 y 6.4, especialmente en la primer tabla, y la pregunta es ¿por qué en el modelo de espacio libre junto con el modelo de COST235 en el RAK5205_01 no da valores más cercanos a 0? La respuesta está al observar los datos en octave y la gráfica en el punto de muestra P1 que se encuentra a 230 metros del gateway y 0 m de vegetación, incorpora una desviación importante entre los valores observados en el P1 y el valor del modelo de espacio libre en este caso.

Análisis sin punto de observación P1

Por ésta razón, se decide **sacar el punto de observación P1** para contabilizar el RMSE nuevamente, porque es el que mayor desviación incorpora entre los valores reales y medidos, dado que, se calcula con 0 metros de obstáculo de vegetación y el modelo de espacio libre o el modelo de reflexión terrestre de dos rayos, según sea el caso de estudio. Ahora, sin el punto de observación P1, dan como resultado:

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de Espacio Libre sin P1				
	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	Modelo de Espacio Libre sin P1				
	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	Modelo de Espacio Libre sin P1				
	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	Modelo de Espacio Libre sin P1				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	15,125	14,681	11,278	17,365	14,784

Tab. 6.5: Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos sin P1				
	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 sin P1				
	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 sin P1				
	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 sin P1				
	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	11,043	10,511	15,471	13,473	11,273

Tab. 6.6: Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1

Con la quita del punto de observación P1, los valores de RMSE de los modelos, se han visto todos reducidos. El porcentaje de reducción, se puede ver en la Fig: 6.30, es la comparación de las tablas del modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación con y sin el punto de observación P1, Tab. 6.3 y 6.5 y del modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación con y sin el punto de observación P1, Tab. 6.4 y 6.6.

Porcentaje de reducción (en %) de RMSE de Espacio Libre con P1 a sin P1:

Modelo	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RAK5205_01 con DR2 a 0.3m	2.09	10.19	45.93	0.65	2.43
RAK5205_01 con DR5 a 0.3m	3.66	3.93	70.36	2.02	4.78
RAK5205_03 con DR2 a 0.6m	7.47	8.48	30.57	4.03	7.44
RAK5205_03 con DR5 a 0.6m	11.14	12.12	21.75	6.98	11.88

Porcentaje de reducción (en %) de RMSE de reflexión terrestre de 2 rayos con P1 a sin P1:

Modelo	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RAK5205_01 con DR2 a 0.3m	4.25	5.01	18.91	1.67	4.40
RAK5205_01 con DR5 a 0.3m	7.79	8.30	27.21	4.66	9.57
RAK5205_03 con DR2 a 0.6m	11.07	12.80	12.60	5.94	9.99
RAK5205_03 con DR5 a 0.6m	17.16	19.02	6.29	10.35	16.41

Fig. 6.30: Porcentaje de reducción de RMSE

fuentes: autor

De manera similar, nuestro análisis, llega a la misma conclusión que la investigación de (Raheemah et al., 2016), donde se centraron en analizar los modelos de propagación y distintos modelos con vegetación pero en su caso, en un invernadero de mango y el modelo basado COST 235 y espacio libre tuvo la mejor comparación con las mediciones empíricas frente a otros modelos con vegetación. Ahora tiene un mejor sentido, los valores de RMSE de la tabla 6.5 del RAK5205_01 que se encuentra a 0,3m configurado con DR5 (SF7/125kHz), como se observa en la Fig.6.25, es el que mejor se aproxima con el modelo de espacio libre más la atenuación de COST235, con RMSE:4,358 bajando un porcentaje de un 70,36% del RMSE de espacio libre + COST235 tomando en cuenta el punto de observación P1 a no tomarlo en cuenta.

Los modelos de atenuación con vegetación considerados en este estudio no estiman las pérdidas de cultivos de soja a niveles inferiores a dos dígitos para los modelos analizados, como se vio en las tablas 6.3 y 6.4, excepto cuando se excluyó el punto de observación P1 en el modelo de espacio libre más la atenuación por vegetación de COST235 logró bajar a un dígito para el nodo RAK5205_01 para ambos DR. Aun así, el análisis realizado sin el punto de observación P1 no cambia el hecho de que el modelo de COST235 y espacio libre presentó la mejor comparación con las mediciones empíricas frente a otros modelos de atenuación con vegetación.

Otro dato importante a tener en cuenta, es el hecho que la altura en que se encuentran los nodos impacta en la pendiente de atenuación.

Propuesta de modelo MED

Como proponen en (Raheemah et al., 2016) y en (Barrios-Ulloa et al., 2023) que desarrollan un modelo de acuerdo a sus condiciones y vegetación dadas, se plantea implementar un modelo de atenuación de decaimiento exponencial modificado, **MED propuesto**, para este entorno específico de vegetación de soja, de acuerdo a las mediciones realizadas y altura de los nodos.

Se analiza partiendo de la evaluación anterior, sin tomar el punto de observación P1. Uno para el nodo RAK5205_01 con el modelo de espacio libre y otro para el nodo RAK5205_03 con el modelo de reflexión de dos rayos, dando como resultado:

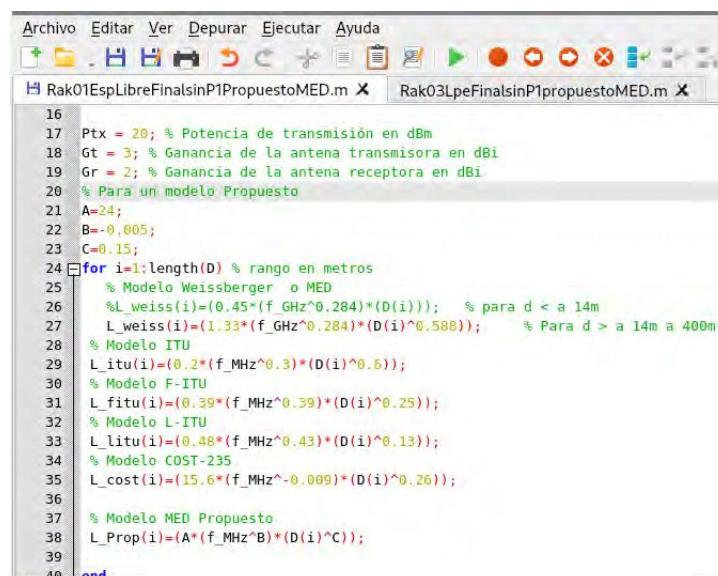
Modelo para el RAK5205_01 a 0,3m contemplando modelo de espacio libre + modelo MED propuesto

Para desarrollar el modelo MED propuesto, se consideró la ecuación del modelo que mostró la mayor aproximación, es decir, la del modelo de atenuación COST 235, ecuación(5.13). A partir de esta, se propone una nueva ecuación de atenuación:

$$Att_{(MED_{Propuesto})} = 24f^{-0,005}d^{0,15} [dB] \quad (6.3)$$

Los valores de X,Y,Z en la ecuación (5.9) se ajustaron hasta alcanzar un valor de RMSE menor que el de COST 235, que era el que mejor aproximaba.

Estos valores se incorporaron en los cálculos y gráficas en Octave:



```
Archivo Editar Ver Depurar Ejecutar Ayuda
Rak01EspLibreFinalsinP1PropuestoMED.m Rak03LpeFinalsinP1propuestoMED.m
16
17 Ptx = 20; % Potencia de transmisión en dBm
18 Gt = 3; % Ganancia de la antena transmisora en dBi
19 Gr = 2; % Ganancia de la antena receptora en dBi
20 % Para un modelo Propuesto
21 A=24;
22 B=-0,005;
23 C=0,15;
24 for i=1:length(D) % rango en metros
25 % Modelo Weissberger o MED
26 %L_weiss(i)=(0,45*(f_GHz^0,284)*(D(i))); % para d < a 14m
27 L_weiss(i)=(1,33*(f_GHz^0,284)*(D(i)^0,588)); % Para d > a 14m a 400m
28 % Modelo ITU
29 L_itu(i)=(0,2*(f_MHz^0,3)*(D(i)^0,6));
30 % Modelo F-ITU
31 L_fitu(i)=(0,39*(f_MHz^0,39)*(D(i)^0,25));
32 % Modelo L-ITU
33 L_litu(i)=(0,48*(f_MHz^0,43)*(D(i)^0,13));
34 % Modelo COST-235
35 L_cost(i)=(15,6*(f_MHz^-0,009)*(D(i)^0,26));
36
37 % Modelo MED Propuesto
38 L_Prop(i)=(A*(f_MHz^B)*(D(i)^C));
39
40 end
```

Fig. 6.31: Modelos de atenuación con vegetación y Modelo MED propuesto fuente: autor

Además, se calcula el porcentaje de reducción del RMSE del modelo que obtuvo el valor más bajo, en este caso el Modelo COST235, en comparación con el modelo MED propuesto. Los resultados se pueden ver en la Fig. 6.32

$$Reducción = \frac{RMSE_{COST} - RMSE_{PROP}}{RMSE_{COST} * 100} \quad (6.4)$$

Ventana de comandos	Ventana de comandos
Ingresar una opción ((1)RAK01 con DR5, (2)RAK01 con DR2): 2	Ingresar una opción ((1)RAK01 con DR5, (2)RAK01 con DR2): 1
Espacio Libre RAK01 _ rmse_FITU-R : 27.534	Espacio Libre RAK01 _ rmse_FITU-R : 26.727
Espacio Libre RAK01 _ rmse_ITU-R: 27.052	Espacio Libre RAK01 _ rmse_ITU-R: 25.592
Espacio Libre RAK01 _ rmse_LITU-R: 27.012	Espacio Libre RAK01 _ rmse_LITU-R: 26.441
Espacio Libre RAK01 _ rmse_COST235: 7.7741	Espacio Libre RAK01 _ rmse_COST235: 4.3582
Espacio Libre RAK01 _ rmse_MED DE WEISS: 29.781	Espacio Libre RAK01 _ rmse_MED DE WEISS: 28.603
Espacio Libre RAK011 _ rmse_Modelo Propuesto: 5.5684	Espacio Libre RAK01 _ rmse_Modelo Propuesto: 3.0391
Reducción de COST235 a MED propuesto: 28.3726 %	Reducción de COST235 a MED propuesto: 30.2662 %
>>	>>

Fig. 6.32: Porcentaje de reducción del Modelo COST235 a MED propuesto para el RAK5205_01 y el Modelo de espacio libre

fuentes: autor

En este caso, los valores de RMSE para el nodo RAK5205_01 ya estaban por debajo de los dos dígitos para ambas configuraciones de DR. No obstante, el modelo propuesto redujo el RMSE en un 28,37% para la configuración de DR2 y de un 30,26% para DR5, quedando los valores de RMSE de la siguiente manera:

RAK5205_01 a 0,3m con DR2	Modelo de Espacio Libre sin P1					
	MED Prop	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	5,5684	27,534	27,012	7,774	29,781	27,052

RAK5205_01 a 0,3m con DR5	Modelo de Espacio Libre sin P1					
	MED Prop	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	3,0391	26,727	26,441	4,358	28,603	25,592

Tab. 6.7: Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1 y el Modelo MED Propuesto

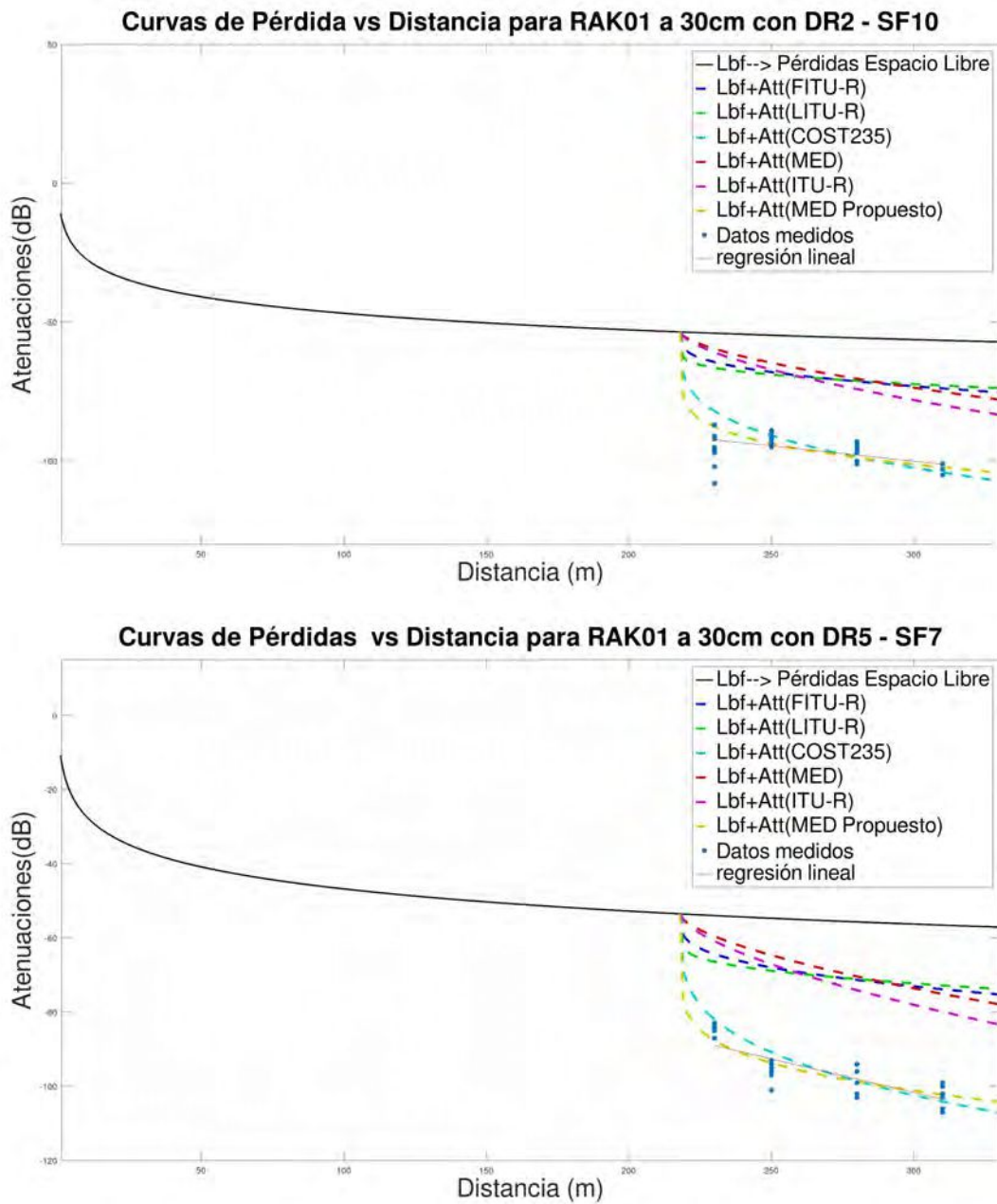


Fig. 6.33: Modelo de espacio libre, atenuaciones de vegetación y modelo MED Propuesto en RAK5205_01 para ambos DR

fuelle: autor

En la gráfica se observa que se trató de llevar lo más cercano a la curva de regresión dada por los puntos de observación.

Modelo para el RAK5205_03 a 0,6m contemplando el modelo reflexión terrestre de dos rayos + modelo MED propuesto

Para realizar el modelo también se tomó en cuenta la ecuación del modelo de atenuación COST235, Ecuación (5.13). En éste caso el nodo presenta una pendiente menor y se modifica la potencia de la distancia(Z) y el (X) para que no llegue tan abruptamente al punto de observación 2. Se propone una atenuación como la siguiente ecuación:

$$Att_{(MEDPropuesto)} = 23f^{-0,005}d^{0,04}[dB] \quad (6.5)$$

Se incorpora también para los cálculos y gráficas en Octave:

```

16
17 Ptx = 20; % Potencia de transmisión en dBm
18 Gt = 3; % Ganancia de la antena transmisora en dBi
19 Gr = 2; % Ganancia de la antena receptora en dBi
20 % Para un modelo Propuesto
21 A=23;
22 B=-0,005;
23 C=0,04;
24 for i=1:length(D) % rango en metros
25     % Modelo Weissberger o MED
26     %L_weiss(i)=(0.45*(f_GHz^0.284)*(D(i))); % para d < a 14m
27     L_weiss(i)=(1.33*(f_GHz^0.284)*(D(i)^0.588)); % Para d > a 14m a 400m
28     % Modelo ITU
29     L_litu(i)=(0.2*(f_MHz^0.3)*(D(i)^0.6));
30     % Modelo F-ITU
31     L_fitu(i)=(0.39*(f_MHz^0.39)*(D(i)^0.25));
32     % Modelo L-ITU
33     L_litu(i)=(0.48*(f_MHz^0.43)*(D(i)^0.13));
34     % Modelo COST-235
35     L_cost(i)=(15.6*(f_MHz^-0.009)*(D(i)^0.26));
36
37     % Modelo MED Propuesto
38     L_Prop(i)=(A*(f_MHz^B)*(D(i)^C));
39
40 end
  
```

Fig. 6.34: Modelo MED propuesto para RAK5202_03 fuente: autor

Dando como resultado, ver Fig. 6.35

Ventana de comandos	Ventana de comandos
Ingresar una opción ((1)rak03 con DR5, (2)rak03 con DR2): 2	Ingresar una opción ((1)rak03 con DR5, (2)rak03 con DR2): 1
Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_FITU-R : 13.995	Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_FITU-R : 11.043
Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_ITU-R: 14.485	Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_ITU-R: 11.273
ELpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_LITU-R: 13.277	Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_LITU-R: 10.511
Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_COST235: 13.355	Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_COST235: 15.471
Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_MED DE WEISS: 16.662	Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_MED DE WEISS: 13.473
Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_Modelo Propuesto: 3.1492	Lpe--> Pérdidas Modelo 2 rayos a 0.6m _ rmse_Modelo Propuesto: 3.5310
Reducción de LITU-R a MED propuesto: 76.282 %	Reducción de LITU-R a MED propuesto: 66.4078 %
>>	>>

Fig. 6.35: Porcentaje de reducción del Modelo LITU-R a MED propuesto para el RAK5205_03 y el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos

fuente: autor

Para éste escenario los valores de RMSE para el nodo RAK5205_03 se encontraban en los dos dígitos para ambos DR en la comparación con todos los modelos. El modelo que más se aproximaba fue el de reflexión terrestre de dos rayos, considerando el modelo con vegetación LITU-R. El modelo MED propuesto redujo en 76,282 % para la configuración de DR2 y de un 66,407 % para el DR2.

RAK5205_03 a 0,6m con DR2	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos sin P1					
	MED Prop	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	3,1492	13,995	13,277	13,355	16,662	14,485

RAK5205_03 a 0,6m con DR5	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos sin P1					
	MED Prop	FITU-R	LITU-R	COST235	MED	ITU-R
RMSE	3,5310	11,043	10,511	15,471	13,473	11,273

Tab. 6.8: Tabla de RMSE de RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1 y el Modelo MED Propuesto

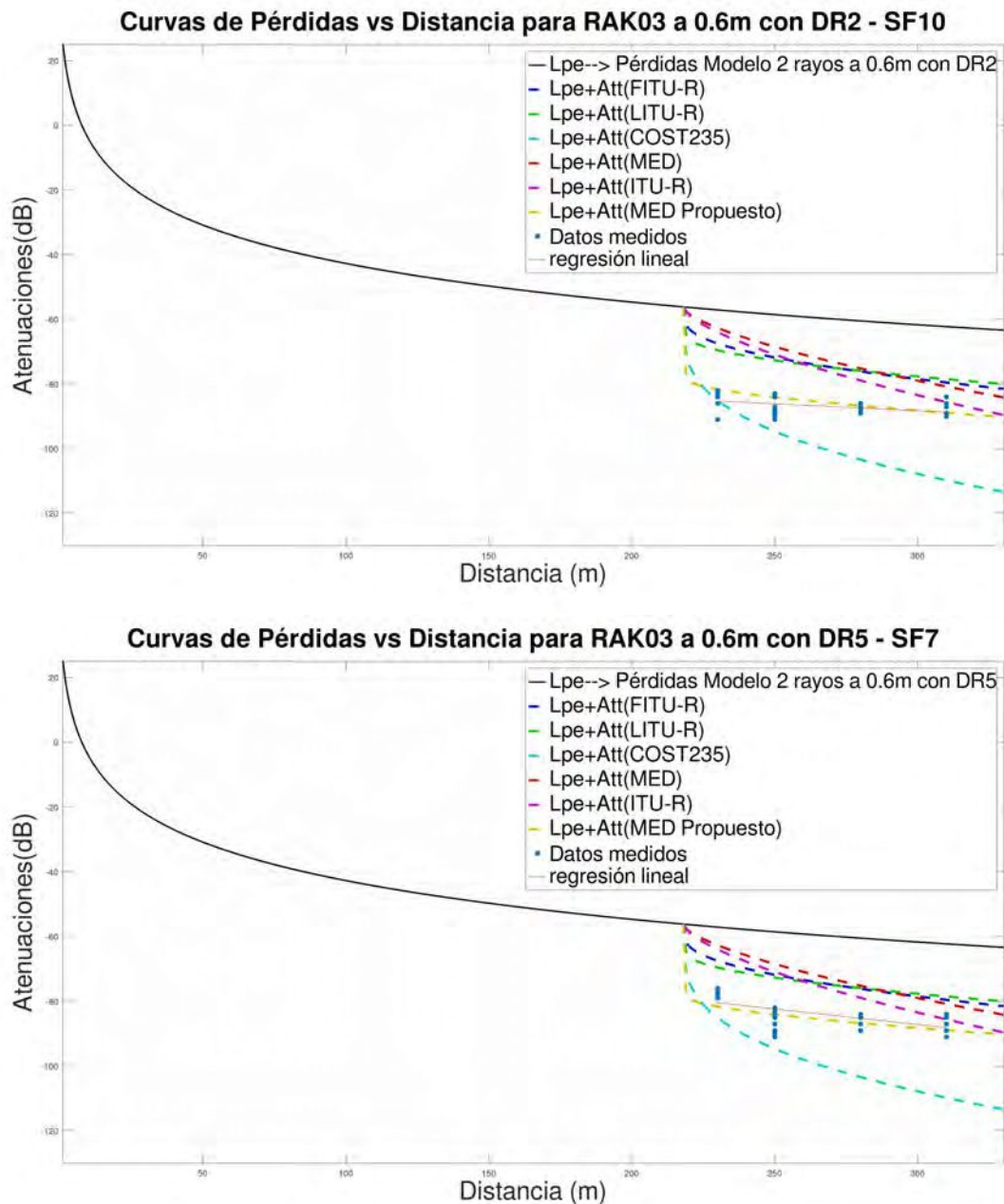


Fig. 6.36: Modelo de reflexión terrestre de dos rayos, atenuaciones de vegetación y modelo MED Propuesto en RAK5205_03 para ambos DR

fuelle: autor

Dado que el nodo se encuentra a 0,6 m de distancia, presenta una pendiente menor. Se utilizó el modelo COST235, modificando la pendiente con la potencia de la distancia (Z) y el parámetro (X) para evitar que la señal llegue de manera abrupta al punto de observación 2.

Conclusiones

Las soluciones IoT con tecnología inalámbrica están experimentando una expansión notable, como lo indica (Alobaidy et al., 2022) . Este avance ha despertado el interés tanto en el ámbito académico como en la industria, especialmente con el desarrollo del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), que implica una mayor integración de avances informáticos y redes inteligentes en la producción industrial y los sistemas de fabricación, con el fin de mejorar la automatización, la calidad y el control. En procesos agroindustriales ha demostrado mejorar la trazabilidad y optimizar las prácticas agrícolas en general, incluida la eficiencia en el uso de la tierra, la calidad de la producción agropecuaria y la seguridad.

En el transcurso de esta investigación y desarrollo, se ha observado la existencia de varios protocolos y tecnologías que satisfacen los requisitos de IoT, especialmente en lo que respecta a las redes de área extensa de baja potencia LPWAN. Dentro de estas tecnologías, se destaca LoRa® junto con LoRaWAN®, que ofrecen una solución eficaz para cubrir grandes áreas con un consumo energético reducido. La combinación de LoRa® y LoRaWAN® como protocolo de comunicación, junto con la arquitectura de red asociada, proporciona los elementos fundamentales para la implementación de IoT, incluyendo comunicación bidireccional, una alta tolerancia a las interferencias y frecuencias de trabajo compatibles en el rango ISM.

Por consiguiente, LoRa® y LoRaWAN®, junto con el servidor de red ChirpStack, ofrecen la flexibilidad para integrar una variedad de componentes, como se ha elegido para este proyecto. La integración, incluye el uso de una base de datos InfluxDB y la visualización de datos a través de Grafana, permitiendo la presentación de información adquirida de dos nodos sensores (RAK5205_01 y RAK5205_03) en tiempo real y en función de una línea de tiempo definida, especialmente adecuada para la recopilación, presentación y análisis. La misma, resulta una herramienta apropiada porque proporciona información detallada sobre un nodo, como también en comparación con otro, para la evaluación del entorno rural que se ha propuesto.

El desarrollo tecnológico para la configuración del escenario del entorno rural, fue en el predio del Campo Experimental "Las Magnolias", que pertenece a una institución pública, ubicada en la zona núcleo del noroeste de la provincia de Buenos Aires. Esta área es reconocida por su carácter agrícola, siendo especialmente destacada por el extenso cultivo de soja y desempeña un papel crucial en la economía agraria regional.

Durante el año 2022, en el Campo "Las Magnolias", se llevaron a cabo actividades experimentales en una parcela de una hectárea, dedicada al cultivo de soja, para labores de investigación, vinculación y docencia de la Universidad. La misma, contó con hileras de unos 10 metros de plantación y 1,5 metros de separación entre ellas. La experiencia se desarrolló en 5 ubicaciones, con distancias que iban desde 230 metros hasta 310 metros entre el gateway y los nodos, además de una obstrucción máxima de soja de 89 metros. Se programó la toma de muestras para el estadio fenológico R3-R4 de la soja, momento en el cual las hojas se encontraban completamente desarrolladas, lo que resultó propicio para el análisis de distintos modelos de propagación en un entorno con vegetación abundante. El día de las mediciones de campo, el 12 de marzo de 2022, presentó condiciones ambientales óptimas, con un cielo despejado, una temperatura de alrededor de 28 °C, una humedad del 44% y una presión atmosférica de 1010 hPa.

Se evaluó la calidad de la señal recibida en el gateway desde los nodos ubicados a diferentes alturas, según la configuración experimental, con el objeto de estudiar la influencia de la atenuación de la vegetación de la soja en la propagación de la señal. Para esto, se consideraron distintos modelos de atenuación de la propagación en presencia de vegetación (MED de Weissberger, COST235, ITU-R, FITU-R, LITU-R), además de incorporar cualquier otra pérdida no debida a la vegetación, como las atenuaciones de espacio libre (L_{bf}) o la reflexión terrestre de dos rayos (L_{pe}), en nuestra evaluación del caso.

Se llevó a cabo un primer estudio utilizando dashboards de información de los nodos y de comparación de datos entre ellos con distintos DR. Esto permitió realizar un análisis inicial y exportar los datos, para que, en una segunda instancia, se pudieran realizar los cálculos y gráficas correspondientes de los diferentes modelos de propagación utilizando GNU Octave.

Los primeros dashboard realizados contienen información de cada uno de los nodos RAK5205_01, situado a 0,3 metros sobre el suelo y el RAK5205_03, situado a 0,6 metros. Posteriormente, se elaboraron otros dos dashboards de comparación con los datos observados de RSSI y SNR recibidos por el gateway de los nodos, según la configuración de **DR2 (SF10/125kHz)** y **DR5 (SF7/125kHz)** empleada en cada uno de ellos.

De acuerdo con lo señalado por Farhad (Farhad et al., 2019), la ubicación y elevación de las antenas de los nodos, así como el SF, juegan un papel crucial en la cobertura de la red. Sin embargo, en este estudio de caso específico, donde las distancias son relativamente cortas, menos de 310 metros entre el gateway y los nodos, no se observó un impacto significativo en la recepción al comparar las configuraciones de los nodos con DR2 y DR5. Esta misma observación se confirma utilizando el dashboard de comparación, donde por ejemplo los promedios del RSSI-RAK01 para **DR5** y **DR2** son **-93,67 dB** y **-94,33 dB**, respectivamente, como se muestra en las Fig. 6.20 y Fig. 6.22, sin diferencias relevantes. Pero si hay discrepancia cuando se compara entre nodos que se encuentran a distintas alturas, se vislumbra una disparidad en el RSSI promedio, cuando ambos nodos están configurados con **DR5** hay una diferencia de **11 dB**, mientras que con ambos nodos configurados en **DR2**, la diferencia entre los promedios es de **9,16 dB**.

En este mismo sentido, el nodo RAK5205_01 ubicado a 0,3m del nivel del suelo, se observa que la **pendiente** de la curva de regresión lineal de los datos medidos es más pronunciada, ver Fig. 6.25, que la que tiene el RAK5205_03 ubicado a 0,6m, a medida que se avanza en la distancia con la vegetación, ver Fig. 6.26. La misma situación se observa con los dashboard de comparación, donde en el punto de observación más lejano del gateway a unos 310 metros y con 89 metros de soja, el punto P5, los valores de RSSI tienen más separación entre los RSSI-RAK01 y RSSI-RAK03, ver Fig. 6.27.

Por otro lado, se observa una mejora en la SNR del nodo RAK5205_03, lo que indica una mejor calidad en la señal recibida en comparación con el RAK5205_01. En este sentido, si se activa el ADR en los nodos, se podría optimizar el SF al mínimo para maximizar tanto la capacidad de la red como la vida útil de la batería de los nodos.

En cuanto a la elaboración de cálculos con GNU Octave, arrojaron que los modelos de atenuación con vegetación considerados en este estudio no estiman las pérdidas de cultivos de soja a niveles inferiores a dos dígitos para los RMSE de los modelos analizados, como se vio en las tablas 6.3 y 6.4.

Igualmente se llega a la misma conclusión que la investigación de (Raheemah et al., 2016), donde el modelo $L_{bf} + Att_{(COST235)}$ tuvo la mejor comparación con las mediciones empíricas frente a los otros modelos de atenuaciones con vegetación.

El nodo RAK5205_01 con DR2 (SF10/125kHz) obtuvo un RMSE de **14,378**.

El nodo RAK5205_01 con DR5 (SF7/125kHz) obtuvo un RMSE de **14,703**.

El nodo RAK5205_03 con DR2 (SF10/125kHz) obtuvo un RMSE de **13,811**.

El nodo RAK5205_03 con DR5 (SF7/125kHz) obtuvo un RMSE de **14,412**.

Para la comparación del modelo de reflexión terrestre de dos rayos y las atenuaciones de los modelos con vegetación, los valores observados se encontraron entre, el modelo de COST235 y los otros modelos con vegetación, ver Fig. 6.28 y Fig. 6.29 . Ahora, para el RAK5205_01 para ambos DR, el que mejor aproxima es el modelo $L_{pe} + Att_{(COST235)}$

El nodo RAK5205_01 con DR2 (SF10/125kHz) obtuvo un RMSE de **13,173**.

El nodo RAK5205_01 con DR5 (SF7/125kHz) obtuvo un RMSE de **13,317**.

Para el RAK5205_03 para ambos DR, el que mejor aproxima es el modelo $L_{pe} + Att_{(LITU-R)}$

El nodo RAK5205_03 con DR2 (SF10/125kHz) obtuvo un RMSE de **15,226**

El nodo RAK5205_03 con DR5 (SF7/125kHz) obtuvo un RMSE de **12,980**

Ninguna dió menor de dos cifras. Llamó la atención al ver la Fig. 6.25 donde la curva de regresión lineal de los datos observados del nodo RAK5205_01 se encuentra cerca del modelo $L_{bf} + Att_{(COST235)}$ y el RMSE no dió valores más cercanos a cero (0). Y al observar los datos en octave y la gráfica en los puntos de muestra P1 que se encuentran a 230 metros del gateway y 0m

de vegetación, incorporan una desviación importante entre los valores observados en el P1 y el valor del L_{bf} en este caso.

Se recalculó el RMSE excluyendo el punto de observación P1, lo que resultó en una reducción general de los valores de RMSE en **todos** los modelos, con algunos mostrando una reducción significativa, como se observa en la Fig. 6.30. En particular, los valores de RMSE presentados en la tabla 6.5 muestran una notable mejora. Por ejemplo, para el nodo RAK5205_01 con DR5, el RMSE se redujo en un **70,36%** de $L_{bf} + Att_{(COST235)}$ al no considerar el punto de observación P1, alcanzando un valor de **RMSE de 4,358**.

Como aporte, se propuso desarrollar un modelo de atenuación de decaimiento exponencial modificado, denominado $Att_{(MED\ propuesto)}$, con el objeto de reducir el RMSE a un dígito en este entorno específico de vegetación de soja. Este modelo se basa en las mediciones realizadas y considera la altura de los nodos.

El análisis se realiza partiendo de la evaluación excluyendo el punto de observación P1. Se consideran dos casos: uno para el nodo RAK5205_01 utilizando el modelo de espacio libre, y otro para el nodo RAK5205_03 utilizando el modelo de reflexión de dos rayos.

En el primer caso, los valores de RMSE para el nodo RAK5205_01 ya estaban por debajo de los dos dígitos para ambas configuraciones de DR. Sin embargo, el modelo $L_{bf} + Att_{(MED\ propuesto)}$ logró reducir, para DR2 el RMSE en un **28,37%** alcanzando un valor de **5,5684** y para DR5 el RMSE en un **30,26%** con un valor de **3,0391**.

Para el segundo caso, para el nodo RAK5205_03 con el modelo de reflexión de dos rayos, los valores de RMSE se encontraban en los dos dígitos para ambos DR en la comparación con todos los modelos. El modelo que más se aproximó fue el modelo con vegetación LITU-R. El modelo $L_{pe} + Att_{(MED\ propuesto)}$, redujo en un **76,282%** para la configuración de DR2 llegando a un dígito con un RMSE de **3,1492**. A su vez, bajó en un **66,407%** para el DR5 llegando a un RMSE de **3,5310**.

En resumen, el estudio evaluó distintos modelos de atenuación en presencia de vegetación y los resultados mostraron que no hubo grandes diferencias entre las configuraciones para los DR2 y DR5 debido a las cortas distancias entre los nodos y el gateway. Sin embargo, se notaron diferencias significativas en la calidad de la señal según la altura de los nodos. Los cálculos indicaron que la mayoría de los modelos de atenuación no estimaron con precisión las pérdidas en un campo de soja, con la excepción del modelo $L_{bf} + Att_{(COST235)}$. Además, se propuso un nuevo modelo de atenuación de decaimiento exponencial modificado $Att_{(MED\ propuesto)}$, logrando reducir el RMSE a un dígito en este entorno específico. 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 la cobertura de señal, optimizar el rendimiento del sistema y asegurar una comunicación robusta y confiable en aplicaciones prácticas. La implementación experimental en su conjunto, ofrece una solución potencial para desplegar IoT en zonas rurales utilizando tecnología LoRaWAN y en particular en el campo Las Magnolias donde se concentran la mayoría de las necesidades de docentes e investigadores para mejorar los recursos y procesos productivos, donde esta tecnología puede cumplir con diversas expectativas y desempeñar un fuerte rol en la I+D+i (Investigación, Desarrollo e Innovación).

7.0.1 Publicaciones y presentaciones derivadas de la investigación

Con respecto a las distintas publicaciones y presentaciones que se fueron desarrollando a lo largo de la tesis, caben mencionar las siguientes:

- El 18 de Agosto de 2022 en el *Congreso Argentino de Sistemas Embebidos CASE2022* (CASE, 2022), en la sesiones virtuales de la sección Protocolos y Comunicaciones se expuso en la Universidad de La Plata el reporte “Plataforma de integración para la evaluación de redes LoRaWAN” y el trabajo forma parte de libro del CASE 2022 (Jaszczyszyn et al., 2022).
- 22 de Septiembre 2022 en la sesión de pósteres de informática del *II Congreso Multidisciplinario: Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible* se realizó la presentación del póster “IoT en la Universidad Nacional del noroeste de Buenos Aires” (UNNOBA, 2022a).
- 23 de Septiembre 2022 en el *Simposio de Tecnología de Ingeniería 4.0 y tecnología espacial* del II Congreso Multidisciplinario: Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible, organizado por la UNNOBA se expuso con una charla sobre **Internet de las cosas** en la Universidad del noroeste de la provincia de Buenos Aires (UNNOBA, 2022b).
- 15 de Noviembre de 2022 en la *I Jornada de Implementación y Gestión Sostenible de la Transformación Digital*, convocada por la red de referentes de Industria4.0 del Confedi (Centro de Industria 4.0 - Facultad de Ingeniería - Universidad Austral, 2022). Participación de la organización del evento y del comité académico de los trabajos de investigación y a su vez con la presentación de “Implementación de un desarrollo tecnológico de IoT en el noroeste de la provincia de Buenos Aires” (Noticias destacadas de la Universidad del Salvador, 2022).
- Mayo 2024 *Boletín Informativo Nro. XXX – Mayo 2024*, (Jaszczyszyn, A., 2024).

7.0.2 Futuras líneas de investigación

A partir de los temas teóricos y prácticos abordados en esta tesis, se derivan diversas líneas de investigación que involucran la exploración de otras métricas y rangos de distancia alcanzados, como (Insaurralde et al., 2020), (Petajajarvi et al., 2015). También realizar análisis por no contar con el despejamiento óptimo de fresnel, así como el estudio, de cómo los distintos factores ambientales; humedad, temperatura, lluvia, viento entre otros, pueden llegar a impactar en la confiabilidad y robustez de la red LoRaWAN en presencia de factores ambientales con vegetación, como en (Richardson Ansah et al., 2020), (Savage et al., 2003).

Bibliografía

- 3GPP. (2018). 3G PP TS 36.300-Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) (citado en la página 6).
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision (citado en la página 1).
- Almuhaya, M. A., Jabbar, W. A., Sulaiman, N., & Abdulmalek, S. (2022). A survey on Lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*, 11(1), 164 (citado en la página 6).
- Al-Nuaimi, M., & Stephens, R. (1998). Measurements and prediction model optimisation for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 145(3), 201-206 (citado en la página 50).
- Alobaidy, H. A., Mandeep, J., Behjati, M., Nordin, R., & Abdullah, N. F. (2022). Wireless Transmissions, Propagation and Channel Modelling for IoT Technologies: Applications and Challenges. *IEEE Access* (citado en la página 91).
- Aref, M., & Sikora, A. (2014). Free space range measurements with Semtech LoRa™ technology. *2014 2nd international symposium on wireless systems within the conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems*, 19-23 (citado en la página 7).
- Ayele, E. D., Hakkenberg, C., Meijers, J. P., Zhang, K., Meratnia, N., & Havinga, P. J. (2017). Performance analysis of LoRa radio for an indoor IoT applications. *2017 International Conference on Internet of Things for the Global Community (IoTGC)*, 1-8 (citado en la página 7).
- Aznar, Á. C., Robert, J. R., Casals, J. M. R., Roca, L. J., Boris, S. B., & Bataller, M. F. (2004). *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya. (Citado en la página 8).
- Barrios-Ulloa, A., Cama-Pinto, A., De-la-Hoz-Franco, E., Ramírez-Velarde, R., & Cama-Pinto, D. (2023). Modeling of Path Loss for Radio Wave Propagation in Wireless Sensor Networks in Cassava Crops Using Machine Learning. *Agriculture*, 13(11) (citado en la página 85).
- Bertoldo, S., Paredes, M., Carosso, L., Allegretti, M., & Savi, P. (2019). Empirical indoor propagation models for LoRa radio link in an office environment. *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 1-5 (citado en la página 7).
- CCIR, I. R. C. C. (1986). Influences of terrain irregularities and vegetation on troposphere propagation. *CCIR Report*, 235-236 (citado en las páginas 8, 45, 50).
- Chaudhari, B., & Zennaro, M. (2020). *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Elsevier Science. (Citado en las páginas 23, 25).

- Chung, H., Lee, S., & Jeong, J. (2018). NB-IoT optimization on paging MCS and coverage level. *2018 15th international symposium on wireless communication systems (ISWCS)*, 1-5 (citado en la página 5).
- COST235. (1996). Radio propagation effects on next-generation fixed-service terrestrial telecommunication systems. (Citado en la página 51).
- de Fornel, P., & Sizon, H. (2006). *Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications*. Springer Berlin Heidelberg. (Citado en la página 46).
- Farhad, A., Kim, D.-H., & Pyun, J.-Y. (2019). Scalability of LoRaWAN in an urban environment: A simulation study. *2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 677-681 (citado en las páginas 7, 78, 92).
- Insaurralde, F., Velazquez, S. H., Kiessling, R., Debattista, A., & Valenzuela, A. (2020). *Predicción del Alcance Teórico de Enlaces LoRa en Ambientes Rurales*. Actas del Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE2020), ISBN: 978-987-46297-7-7, p. 76-78. (Citado en las páginas 8, 48, 96).
- Islam, M. R., Syad Kamrul; Haider. (2010). *Sensors and Low Power Signal Processing*. p. 49. ISBN 978-0387793917. (Citado en la página 13).
- Jaszczyszyn, A., Charne, J., Guiguet, M., & Ramón, H. (2022). Plataforma de integración para la evaluación de redes LoRaWAN. *Libro de Trabajos*, 163-165 (citado en la página 95).
- Loriot, M., Aljer, A., & Shahrour, I. (2017). Analysis of the use of LoRaWan technology in a large-scale smart city demonstrator. *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)*, 1-4 (citado en la página 7).
- Luvisotto, M., Tramarin, F., Vangelista, L., & Vitturi, S. (2018). On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2018*, 1-11 (citado en la página 17).
- Meng, Y. S., Lee, Y. H., & Ng, B. C. (2009). Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(5), 1461-1468 (citado en la página 50).
- Noreen, U., Bounceur, A., & Clavier, L. (2017). A study of LoRa low power and wide area network technology. *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, 1-6 (citado en la página 19).
- Noreen, U., Clavier, L., & Bounceur, A. (2018). Lora-like css-based phy layer, capture effect and serial interference cancellation. *European Wireless 2018; 24th European Wireless Conference*, 1-6 (citado en la página 22).
- Okumura, Y. (1967). *Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service* (Vol. 16). (Citado en la página 8).
- Petajajarvi, J., Mikhaylov, K., Roivainen, A., Hanninen, T., & Pettissalo, M. (2015). On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. *2015 14th international conference on its telecommunications (itst)*, 55-59 (citado en las páginas 7, 8, 96).
- Raheemah, A., Sabri, N., Salim, M., Ehkan, P., & Ahmad, R. B. (2016). New empirical path loss model for wireless sensor networks in mango greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 553-560 (citado en las páginas 9, 48, 84, 85, 93).
- Ramón, H. D., Esnaola, L., Tessore, J. P., Adorno, S., & Rubio, I. (2019). Aplicaciones de Sistemas de Software: Innovación en procesos, productos y servicios. *XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2019, Universidad Nacional de San Juan)*. (citado en la página 4).

- Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR. (Citado en las páginas 7, 8, 46-48).
- Richardson Ansah, M., Sowah, R. A., Melià-Seguí, J., Katsriku, F. A., Vilajosana, X., & Owusu Banahene, W. (2020). Characterising foliage influence on LoRaWAN pathloss in a tropical vegetative environment. *IET Wireless Sensor Systems*, 10(5), 198-207 (citado en las páginas 8, 48, 96).
- Saari, M., bin Baharudin, A. M., Sillberg, P., Hyrynsalmi, S., & Yan, W. (2018). LoRa — A survey of recent research trends. *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 0872-0877 (citado en la página 20).
- Sanchez-Gomez, J., Gallego-Madrid, J., Sanchez-Iborra, R., & Skarmeta, A. F. (2019). Performance study of LoRaWAN for smart-city applications. *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, 58-62 (citado en la página 7).
- Sarkar, T. K., Ji, Z., Kim, K., Medouri, A., & Salazar-Palma, M. (2003). A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and propagation Magazine*, 45(3), 51-82 (citado en la página 45).
- Savage, N., Ndzi, D., Seville, A., Vilar, E., & Austin, J. (2003). Radio wave propagation through vegetation: Factors influencing signal attenuation. *Radio Science*, 38(5), 9-1 (citado en la página 96).
- Trinh, L., Bui, V. X., Ferrero, F., Nguyen, T., & Le, M. (2017). Signal propagation of LoRa technology using for smart building applications. *2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, 381-384 (citado en la página 7).
- Weissberger, M. A. (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* (citado en las páginas 8, 49).
- Wixted, A. J., Kinnaird, P., Larijani, H., Tait, A., Ahmadinia, A., & Strachan, N. (2016). Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *2016 IEEE SENSORS*, 1-3 (citado en la página 7).
- Yim, D., Chung, J., Cho, Y., Song, H., Jin, D., Kim, S., Ko, S., Smith, A., & Riegsecker, A. (2018). An experimental LoRa performance evaluation in tree farm. *2018 IEEE sensors applications Symposium (SAS)*, 1-6 (citado en la página 7).
- Yousuf, A. M., Rochester, E. M., & Ghaderi, M. (2018). A low-cost LoRaWAN testbed for IoT: Implementation and measurements. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 361-366 (citado en la página 7).

Bibliografía WEB

- Argentina.gob.ar. (2020). *Internet de las Cosas, Secretaría de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/paperbenchmarkinternacional-iot.pdf> (citado en la página 5).
- Banfi, J. (2019). *Evaluación de insecticidas con diferente nivel toxicológico en el control de lepidópteros, considerados plaga del cultivo soja y en sus enemigos naturales [Trabajo Final de Grado, Unnoba]*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://repositorio.unnoba.edu.ar/xmlui/handle/23601/242> (citado en la página 57).
- CASE. (2022). *Congreso Argentino de Sistemas Embebidos CASE 2022*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://case.ar/wp-content/uploads/2023/11/libro2022.pdf> (citado en la página 95).

- Centro de Industria 4.0 - Facultad de Ingeniería - Universidad Austral. (2022). *1era. Jornada de Gestión Sostenible de la Transformación Digital*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.linkedin.com/pulse/1era-jornada-de-gesti%C3%B3n-sostenible/> (citado en la página 95).
- ChirpStack. (2023). *ChirpStack architecture*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.chirpstack.io/project/architecture/> (citado en las páginas 44, 63).
- Cisco. (2020). *Cisco Annual Internet Report (2018–2023)*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (citado en la página 5).
- Eaton et al. (2024). *GNU Octave*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.octave.org/> (citado en la página 70).
- Ente Nacional de Comunicaciones. (2017). *RESOL-2017-1299-APN-ENACOM#MCO*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.enacom.gob.ar/multimedia/normativas/2017/res1299.pdf> (citado en la página 33).
- Escuela de Agrarias, Naturales y Ambientales, Noticias, Universitarias. (2022). *Recorrido por ensayos en el Campo Experimental “Las Magnolias”*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://sitio.unnoba.edu.ar/recorrido-por-ensayos-en-el-campo-experimental-las-magnolias/> (citado en la página 56).
- FAO. (2009a). *2050: un tercio más de bocas que alimentar*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/es/> (citado en la página 1).
- FAO. (2009b). *Cómo alimentar al mundo en 2050*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis_papers/C%C3%83mo_alimentar_al_mundo_en_2050.pdf (citado en la página 1).
- FAO, Secretaría del Foro de Alto Nivel de Expertos. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf (citado en la página 1).
- Fewkes, S. (2021). *Fewkes Sandy - Relaciones públicas de LoRa Alliance - LoRaWAN® Formally Recognized as ITU International Standard for Low Power Wide Area Networking*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://lora-alliance.org/lora-alliance-press-release/lorawan-formally-recognized-as-itu-international-standard-for-low-power-wide-area-networking/> (citado en la página 34).
- Gerardo, S. (2022). *Cima 9 Aplicaciones de agricultura inteligente LoRa a tener en cuenta*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.mokolora.com/es/lora-smart-agriculture-applications/> (citado en la página 2).
- Ghosly Sakshama. (2021a). *LoRa CHIRP Spread Spectrum Animated*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <http://www.sghosly.com/> (citado en la página 19).
- Ghosly Sakshama. (2021b). *LoRa: Symbol Generation*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <http://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html> (citado en la página 24).
- Hernández, J.C. (2023). *¿Qué es LoRa? LoRa una tecnología inalámbrica de bajo consumo para el IOT*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://alfaiot.com/page/que-es-lora> (citado en la página 18).
- Hernández, M. (2018). *Connectivity Now and Beyond; exploring Cat-M1, NB-IoT, and LPWAN Connections*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://ubidots.com/blog/exploring-cat-m1-nb-iot-lpwan-connections/> (citado en las páginas 1, 2).

- International Telecommunication Union. (2021). *Recommendation ITU-T Y.4480 : Low power protocol for wide area wireless networks*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4480-202111-I/en> (citado en la página 34).
- Jaszczyszyn, A. (2024). *Boletín Informativo Nro. XXX – Mayo 2024*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://lemej.unnoba.edu.ar/wp-content/uploads/Boletin-Informativo-LEMEJ-30.pdf> (citado en la página 95).
- Kuan Fiona. (2020). *IOT BÁSICO -¿Cuál es la tecnología detrás de la frecuencia LoRa?* Consultado 28 de febrero de 2021, desde <https://www.mokosmart.com/es/lora-frequency> (citado en las páginas 20, 28).
- Lawson, Eric. (2020). *LoRa Alliance® Releases LoRaWAN® TS1-1.0.4 Specification; Simplifies Development, Deployment, and Interoperability*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://resources.lora-alliance.org/lora-alliance-news/lora-alliance-releases-lorawan-ts1-1-0-4-specification-simplifies-development-deployment-and-interoperability> (citado en la página 27).
- Learning Center Semtech. (2023a). *Academy for LoRaWAN® - Module 2: LoRa® and LoRaWAN® Spreading Factors, Airtime, and Adaptive Data Rate*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://learn.semtech.com/> (citado en las páginas 26, 112).
- Learning Center Semtech. (2023b). *Academy for LoRaWAN® - Module 3: LoRaWAN Specifications - History of the LoRaWAN Layer 2 Specification*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://learn.semtech.com/> (citado en la página 36).
- Lie Robert. (2018). *LoRa Packet Format, Time on Air and Adaptive Data Rate*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part17.pdf (citado en la página 112).
- LoRa-Alliance. (2022). *LoRaWAN™ 101 A Technical Introduction, P.7*. Consultado 14 de junio de 2024, desde http://ecopower-eu.com/upload/files/LoRaWAN101-ATechnicalIntroduction_1643_1_eng.pdf (citado en la página 21).
- Lora-Alliance. (2020). *LoRaWAN™ What is it? - A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ Technical Marketing Workgroup 1.0*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf> (citado en las páginas 27-29, 31, 41).
- Lora-Alliance,Inc. (2016). *LoRaWAN Specification-1.0.2 LoRaWAN Regional Parameters*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-2/ (citado en las páginas 31-33).
- Lora-Alliance,Inc. (2020). *LoRaWAN Specification-RP002-1.0.2 LoRaWAN Regional Parameters*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp2-1-0-2-lorawan-regional-parameters> (citado en las páginas 37-39).
- Noticias destacadas de la Universidad del Salvador. (2022). *Jornada: Implementación y Gestión Sostenible de la Transformación Digital*”. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://noticias.usal.edu.ar/es/jornada-implementacion-y-gestion-sostenible-de-la-transformacion-digital> (citado en la página 95).
- Noticias, O. N. U. (2019). *La población mundial sigue en aumento, aunque sea cada vez más vieja*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://news.un.org/es/story/2019/06/1457891> (citado en la página 6).
- Pickering, P. (2017). *Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications> (citado en la página 5).

- Quesada. (2004). *BandaEstrecha - Quesada at Spanish Wikipedia*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1575548> (citado en la página 12).
- RAK Documentation Center. (2023). *RAK5205 WisTrio LPWAN Tracker Datasheet*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisTrio/RAK7205-5205/Datasheet/#overview> (citado en la página 58).
- Santos, D. (2010). *Fenología en el Cultivo de Soja: una "hoja de ruta". Segunda edición (2010)*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-fenologia-en-el-cultivo-de-soja-una-hoja-de-ruta.pdfs> (citado en la página 3).
- SEMAK S.A. (2018). *WEBINAR IoT - SEMAK SA - 6 LPWAN (Low Power Wide Area Network) IoT Overview - Lora, NB-IoT, CAT-M, Sigfox*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://www.youtube.com/watch?v=KA_fXspVhSk (citado en la página 11).
- Semtech. (2015). *AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJu/xvKUc5w9yjG1q5Pb2IIkpolW54YYqGb.frOZ7HQBCrC> (citado en las páginas 12, 14, 18, 20).
- Semtech. (2021a). *Portal para el desarrollador, documnetos técnicos*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (citado en las páginas 14, 17).
- Semtech. (2021b). *Semtech Corporation. Semtech — LoRa FAQs*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <http://www.semtech.com/wireless-rf/lora/LoRa-FAQs.pdf> (citado en la página 20).
- Semtech. (2021c). *What is Lora*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> (citado en las páginas 18, 19, 29, 30).
- Semtech Corporation. (2019). *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan%20,%20https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf (citado en la página 6).
- Tecnología para los negocios. (s.f.). *Infraestructuras (I) Redes Inalámbricas: Capítulo 11 | Guía de Industria 4.0*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-11-infraestructuras-i-redes-inalambricas> (citado en la página 5).
- The Things Network. (2023). Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.thethingsnetwork.org/> (citado en las páginas 42, 43).
- thethingsnetwork. (2023). *Frequency Plans by Country*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/> (citado en la página 33).
- UBA Facultad de agronomía. (s.f.). *Galería de especies de uso industrial, soja*. Consultado 14 de junio de 2024, desde https://www.agro.uba.ar/catedras/cultivos_industriales/galeria/soja (citado en la página 57).
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2019). *Recomendación UIT-R P.525-4 (08/2019) – Cálculo de la atenuación en el espacio libre*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/es> (citado en la página 46).
- UNNOBA. (2021). *Convocatoria: SIB 2019 - UNNOBA*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.unnoba.edu.ar/wp-content/uploads/2021/03/Ramon.pdf> (citado en la página 4).

- UNNOBA. (2022a). *Segundo Congreso Multidisciplinario - Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://congresomultidisciplinario.unnoba.edu.ar/jueves-22/> (citado en la página 95).
- UNNOBA. (2022b). *Segundo Congreso Multidisciplinario - Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://congresomultidisciplinario.unnoba.edu.ar/viernes-23/> (citado en la página 95).
- Vailshery, L.S. (2022). *Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2021, with forecasts from 2022 to 2030*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (citado en la página 5).
- Valdez Naval, G. (2018). *Agricultura de Precisión, más que una herramienta: una manera de pensar*. . . Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://inta.gob.ar/documentos/agricultura-de-precision-mas-que-una-herramienta-una-manera-de-pensar%5C%E2%5C%80%5C%A6> (citado en la página 6).
- Wegner, P. (2021a). *6 IoT adoption trends for 2022*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://iot-analytics.com/iot-adoption-trends/> (citado en la página 5).
- Wegner, P. (2021b). *Global IoT spending to grow 24 % in 2021, led by investments in IoT software and IoT security*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://iot-analytics.com/2021-global-iot-spending-grow-24-percent/> (citado en la página 5).
- Wilford, E. (2022). *10 IoT technology trends to watch in 2022*. Consultado 14 de junio de 2024, desde <https://iot-analytics.com/iot-technology-trends> (citado en la página 5).

Índice de figuras

1.1	Figura de comparación de redes LPWAN	2
1.2	Arquitectura de Red LoRaWAN propuesta	4
2.1	Señal de banda estrecha, fácil de interferir o interceptar (De The original uploader was Quesada de Wikipedia en español. - Transferido desde es.wikipedia a Commons., CC BY-SA 3.0)	12
2.2	Modulación y demodulación de DSSS - Un sistema de espectro ensanchado multiplica los datos de entrada por una secuencia de código mucho más rápida que distribuye el ancho de banda de la señal.	14
3.1	Señal Portadora de CSS — Up-Chirp / Down-Chirp - Figura de "A study of LoRa low power and wide area network technology", pag.3"	19
3.2	Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)	19
3.3	Demodulación Lora® frente a FSK	20
3.4	Comparación de parámetros de un canal de comunicación LoRa®	21
3.5	Ancho de banda BW Bandwith	23
3.6	Comparación de Spreading Factor SF7 a SF12	24
3.7	Capacidades de detección y corrección de errores de LoRa® – imagen de pagina 68 LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications	25
3.8	ADR: Velocidades de datos de transmisión y distancia mostradas en un entorno 2D	26
4.1	LoRa® la capa física-LoRaWAN® capa de control de acceso al medio	28
4.2	Dos capas de seguridad	28
4.3	Topología de la arquitectura LoRaWAN®	29
4.4	Clasificación de dispositivos para distintas aplicaciones o requerimientos	31
4.5	Temporización de la ventana de recepción	31
4.6	Slot de recepción de balizas y ping slot	32
4.7	Equipos de clase C que luego de transmitir entran en modo recepción minimizando la latencia	33
4.8	Canales AU915	37
4.9	Primer Octeto de canales	38
4.10	Siguientes octetos de canales	39
4.11	Ejemplo de log del Gateway de la recepción de datos de un nodo	39
4.12	Ejemplo de log del Gateway específico	40
4.13	Redes públicas en el mundo	41

4.14	Comunidad TTN en el mundo	42
4.15	Arquitectura LoRaWAN® de The Things Network	43
4.16	Integración de un nodo a la Arquitectura LoRaWAN® de The Things Network	43
4.17	Arquitectura LoRaWAN® de ChirpStack	44
5.1	Modelo de reflexión en el suelo de dos rayos	47
5.2	Sucesivas zonas de fresnel	48
5.3	Modelos de pérdidas de propagación y modelos de atenuaciones en presencia de vegetación	53
6.1	Campo Experimental de UNNOBA "Las Magnolias"	56
6.2	Cinco puntos de tomas de muestras	57
6.3	Zona de parcelas de soja	58
6.4	WisTrio LoRa Tracker	59
6.5	Nodos sensores en las ubicaciones	60
6.6	Herramienta Serial Port Tool de RakWireless	61
6.7	Raspberri Pi con módulo RAK2245	62
6.8	Gateway en caja estanca para exterior	62
6.9	Gateway a 7 metros de altura	63
6.10	Componentes con versiones de ChirpStack instalados en Raspberry Pi	63
6.11	Configuración de Gateway	64
6.12	Captura de datos recibidos de un nodo RAK5205 en el Gateway	64
6.13	Perfiles de los dispositivos	65
6.14	Distintas posibilidades de integración y configuración de la integración de la aplicación de los nodos RAK5205	66
6.15	Sección Applications/RAK5205/Devices/RAK5205_03 datos enviados y recibidos en la base InfluxDB	66
6.16	Configuración de la base de datos InfluxDB en grafana	67
6.17	Nodo Sensor de: Temperatura, Humedad, Presión barométrica y Index for Air Quality (IAQ) - RAK5205_03	68
6.18	Puntos de tomas de muestras vistas en la Aplicación	69
6.19	Comparación RAK5205_01 y RAK5205_03 con DR5 (SF7/125kHz)	71
6.20	mín máx avg - DR5 (SF7/125kHz)	72
6.21	Comparación RAK5205_01 y RAK5205_03 con DR2 (SF10/125kHz)	72
6.22	mín máx avg - DR2 (SF10/125kHz)	73
6.23	Datos de sensores en el dashboard del nodo RAK5205_01	74
6.24	Programas en Octave para cálculos de RMSE y gráficas	75
6.25	Modelo de Espacio Libre y atenuaciones de vegetación en RAK5205_01	77
6.26	Modelo de Espacio Libre y atenuaciones de vegetación en RAK5205_03	78
6.27	Punto 5 de observación	79
6.28	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones de vegetación en RAK5205_01	81
6.29	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones de vegetación en RAK5205_03	82

6.30	Porcentaje de reducción de RMSE	84
6.31	Modelos de atenuación con vegetación y Modelo MED propuesto fuente: autor	85
6.32	Porcentaje de reducción del Modelo COST235 a MED propuesto para el RAK5205_01 y el Modelo de espacio libre	86
6.33	Modelo de espacio libre, atenuaciones de vegetación y modelo MED Propuesto en RAK5205_01 para ambos DR	87
6.34	Modelo MED propuesto para RAK5202_03 fuente: autor	88
6.35	Porcentaje de reducción del Modelo LITU-R a MED propuesto para el RAK5205_03 y el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos	88
6.36	Modelo de reflexión terrestre de dos rayos, atenuaciones de vegetación y modelo MED Propuesto en RAK5205_03 para ambos DR	90

Índice de cuadros

3.1	Spreading Factor y SNR limites	24
4.1	Historial de versiones de la especificaciones LoRaWAN®	36
4.2	Canales (AU915-928)	40
5.1	Valores empíricos para distintos modelos, en color azul los utilizados	52
6.1	Puntos de toma de datos	58
6.2	Parámetros de los nodos y el gateway	70
6.3	Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación	76
6.4	Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación	80
6.5	Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1	83
6.6	Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1	83
6.7	Tabla de RMSE de RAK5205_01 a 0,3m – RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de espacio libre y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1 y el Modelo MED Propuesto	86

6.8	Tabla de RMSE de RAK5205_03 a 0,6m con DR2 (SF10/125kHz) y DR5 (SF7/125kHz) con el Modelo de reflexión terrestre de dos rayos y atenuaciones con vegetación sin el punto de observación P1 y el Modelo MED Propuesto	89
-----	--	----

Tabla de acrónimos

ADR	Adaptive Data Rate
BW	BandWidth
COST235	European Cooperation in Science and Technology - COST
CR	Code Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
DNS	Domain Name Server
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ENACOM	Ente Nacional de Comunicaciones
IoT	Internet of things / Internet de las cosas
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Científico y Médico
ITT	Instituto de Investigación y Transferencia en Tecnología
ITU-R	International Telecommunications Union-Radiocommunication Sector
f	Frecuencia
FEC	Corrección de errores
FITU-R	Fitted ITU-R
FMEA	Failure mode and effects analysis
FSPL	Free-Space Path Loss
FSK	Desplazamiento de frecuencia
FUOTA	Actualizaciones de firmware por aire
Lbf	Pérdida básica de transmisión en el espacio libre
LITU-R	Modelo lateral ITU-R
LOS	Línea vista
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
Lpe	Pérdida terrestre de dos rayos
LPWA	Low Power Wide Area
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LR-FHSS	Long-Range Frequency Hopping Spread Spectrum
LTE-M	Long Term Evolution for Machine
LTE-MTC	Long Term Evolution Machine-Type
M2M	Machine-to-Machine
MED	Modified Exponential Decay
NB-IoT	Narrow Band IoT
NB-LTE-M	Narrow Band LTE-M
ODbL	Open Data Commons Open Database License
OSMF	OpenStreetMap Foundation
PDR	Packet Delivery Ratio
QoS	Quality of Service
RMSE	Root Mean Square Error / Error de la Raíz Cuadrática Media
RSSI	Received Signal Strength Indicator

SCMA	Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzada
SF	Spread Factor
SNR	Signal to Noise Ratio
TTN	The Things Network
UHF	Ultra High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
VHF	Very high frequency
VPN	Virtual Private Network

Anexos

Anexo A

ADR es un mecanismo simple que cambia la velocidad de datos según reglas simples:

- Si la intensidad de la señal de radio (llamada margen de enlace) es alta, la velocidad de datos se puede aumentar.
- Si el margen del enlace es bajo, la tasa de datos puede reducirse.

Adapta la tasa de datos del nodo de acuerdo al cálculo de enlace disponible.

Entonces, ¿cómo funciona esto, dónde se toma la decisión y dónde no usarlo?

El dispositivo final o nodo envía un mensaje a través del gateway. El servidor de red, que recibió los datos, selecciona la velocidad de datos ideal en función de la intensidades de señales recibidas. La velocidad de datos que debe usar el nodo se envía a través de un enlace descendente al dispositivo.

En la práctica, esto significa que los dispositivos que están ubicados **cerca del Gateway** usan una **tasa de datos alta**, lo que resulta en **menos tiempo en el aire**. Debido a que la actividad energética más alta que tiene el nodo es cuando transmite datos, esto **reduce radicalmente el consumo de energía** de muchos dispositivos.

Los dispositivos o nodos móviles no es recomendado usar ADR. Por ejemplo en una aplicación de seguimiento de automóviles, para cuando el Network Server toma la decisión de que tipo de ADR debe tener el nodo, el entorno de propagación habría cambiado tan radicalmente que la tasa de datos atribuida no sería válida. Esto simplemente se puede desactivar en el nodo (Learning Center Semtech, 2023a).

Ejemplo de ADR :

De los 20 mensajes de enlace ascendente recibidos, el Network Server toma el valor SNR máximo que ahora se denomina SNR medido y la tasa de datos correspondiente (Lie Robert, 2018). El Network Server calcula el margen de la siguiente manera:

$$\text{Margen} = \text{SNR}_{\text{medido}} - \text{SNR}_{\text{límite}} - \text{MargenDefault} \quad (7.1)$$

Data rate = SF12 y BW125
SNRmedido = 5 dB
SNRlímite = -20 dB (Ver tabla 3.1)
MargenDefault = 10 dB

De ecuación 7.1

$$\text{Margen} = \text{SNRmedido} - \text{SNRlímite} - \text{MargenDefault} = 5 - (-20) - 10 = 15 \text{ dB}$$

El margen es grande, lo que significa que el dispositivo o nodo usa demasiada batería y potencia innecesariamente para transmitir mensajes de enlace ascendente.

Con una tasa de datos optimizada el Network Server realiza el siguiente:

Data rate = SF7 y BW125 (antes era SF12 y BW125)
SNRmedido = 5 dB
SNRlímite = -7.5 dB (Ver tabla 3.1)
MargenDefault = 10 dB

De ecuación 7.1

$$\text{Margen} = \text{SNRmedido} - \text{SNRlímite} - \text{MargenDefault} = 5 - (-7.5) - 10 = 2.5 \text{ dB}$$

- El **margen** se cambia de 15 dB a 2.5 dB, pero se puede optimizar aún más bajando la potencia de transmisión.
- Esta tasa de datos optimizada y/o potencia de transmisión son los parámetros de transmisión calculado por el Network Server y enviado al nodo final.