



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Nota Técnica | Technical Report

Estudio de cobertura radial para la implementación de una red de sensores con tecnología de radios de largo alcance (LoRa)

Radial coverage study for the implementation of a sensor network with long range radio technology (LoRa)

Ernesto Alonso Arias-Argueta¹, David Isaí Orozco-Mejía¹, Werner David Meléndez-Valle¹

Correspondencia: aa17001@ues.edu.sv

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador

RESUMEN

La tecnología Long Range (LoRa), mediante el protocolo LoRaWAN, permite la transmisión eficiente de datos a largas distancias con mínimos recursos, funcionando así por un tiempo más prolongado. Esta tecnología es utilizada mayormente para la monitorización y puede ser utilizada en una gran cantidad de áreas que van desde la meteorología hasta aplicaciones médicas. Se realizó un estudio de cobertura en algunos sectores de la Universidad de El Salvador entre los meses de noviembre y diciembre, donde se buscó establecer una metodología para predecir el nivel de recepción en diversas condiciones geográficas dentro de esta. Para ello, se utilizaron diversos recursos como softwares de simulación, modelos matemáticos, mediciones de campo con el analizador de espectro RSA306B de la marca Tektronix y la placa TTGO LoRa 32,

DOI: [10.5377/revminerva.v7i3.18910](https://doi.org/10.5377/revminerva.v7i3.18910)

Enviado: 17 de enero 2024
Aceptado: 22 de febrero de 2024

Palabras clave: Gateway, UIT, factor de ensanchamiento, atenuación, propagación, frecuencia.

Keywords: Gateway, ITU, spreading factor, attenuation, propagation, frequency.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

para determinar su eficacia bajo condiciones específicas. Los datos se tabulan, comparan y se elige la metodología de predicción más adecuada de acuerdo con el entorno, los cuales van desde zonas con gran presencia de edificaciones a zonas con densa vegetación.

ABSTRACT

Long Range (LoRa) technology, through the LoRaWAN protocol, allows efficient transmission of data over long distances with minimal resources, thus operating for a longer time. This technology is used mostly for monitoring and can be used in a large number of areas ranging from meteorology to medical applications. A coverage study was carried out in some sectors of the University of El Salvador between the months of November and December, where it sought to establish a methodology to predict the level of reception in various geographical conditions within it. To do this, various resources were used such as simulation software, mathematical models, field measurements with the Tektronix brand RSA306B spectrum analyzer and the TTGO LoRa 32 board, to determine its effectiveness under specific conditions. The data is tabulated, compared and the most appropriate tool is chosen according to the environment, which ranges from areas with a large presence of buildings to areas with dense vegetation.

INTRODUCCIÓN

El acrónimo LoRa proviene del inglés *Long Range* y es una tecnología de comunicación aplicada (principalmente) para la interconexión de nodos en redes de internet de las cosas (IoT). Una de sus características fundamentales es que utiliza técnicas de modulación basadas en Chirp Spread Spectrum (CSS). Este tipo de modulación es relativamente reciente y es utilizada por distintos tipos de dispositivos para lograr una cobertura de largo alcance y que no requiera consumos muy altos de potencia y energía. Esta tecnología pertenece en la actualidad a la compañía Semtech y corresponde a la primera capa o capa física del modelo OSI. (Becolve Digital, 2022)

El inicio de esta tecnología se considera desde 2009 cuando Nicolas Sornin y Olivier Sellaer comienzan a desarrollar los primeros prototipos. Luego en 2010 se une a la investigación François Sforza y los

3 juntos fundan la empresa Cycleo que no mucho tiempo después es adquirida por Semtech. 5 años después se funda LoRa Alliance y el protocolo de red desarrollado se estableció como LoRaWAN; donde los objetivos principales de esta alianza son promover la interconectividad y la globalización. (Bassi, 2019)

Actualmente esta tecnología es ampliamente utilizada en diversos sectores como la agricultura y ganadería, en la creación de ciudades inteligentes, monitoreo de generación y consumo de energía eléctrica, en el campo de la medicina, etc. Y se plantea que, con el paso del tiempo, su uso crezca aún más dado su potencial y la reducción de costos que su uso implica.

En El Salvador, esta tecnología ha sido poco explorada; su uso se limita mayormente a pruebas de aplicaciones en la banda ISM (902-928 MHz). Un ejemplo de esto es la instalación de una antena y Gateway en la zona de San Benito para que los dispositivos dentro de la zona de cobertura pudiesen hacer pruebas de envío de datos a esta para motivar a las personas a utilizar esta tecnología. (Ibarra, 2019)

El presente estudio se realiza con el objetivo de determinar un método eficiente para la predicción de cobertura en los diferentes escenarios y condiciones geográficas dentro de la Universidad de El Salvador, utilizando diferentes herramientas de predicción de cobertura como softwares de simulación de cobertura, modelos matemáticos de propagación de señal; así como también mediciones de campo con el analizador de espectro RSA306B de la marca Tektronix y un módulo receptor realizado a partir de la placa TTGO LoRa 32. Además, también se busca determinar los parámetros de comunicación que optimicen la calidad de la comunicación entre dispositivos.

Fundamentación teórica de funcionamiento

Modulación

LoRa es una tecnología que se basa en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), la cual posee características similares a la modulación Phase Shift Keying (PSK); que busca minimizar los recursos necesarios para su óptimo funcionamiento

y también aumentar el rango de comunicación. Esta modulación ha sido utilizada anteriormente en comunicaciones de origen militar y espacial (ITU-T, 2021). La técnica de modulación CSS depende de ciertos parámetros que pueden modificarse y que determinan las propiedades del enlace, estos parámetros son enlistados a continuación:

Frecuencia portadora: define la frecuencia portadora del medio utilizado para la transmisión y recepción, donde, según la recomendación internacional ITU-T Y.4480 (2021), esta se establece entre los 902 y los 928 MHz en USA y América Latina.

Ancho de banda de la señal: este ancho de banda está definido por lo general el 125 KHz, aunque es posible aumentarlo a 250 KHz y hasta 500 KHz según las necesidades que la aplicación requiera. Se toma en consideración que a mayor ancho de banda la recepción de la señal se ve reducida, pero aumenta la resistencia a interferencias.

Coding Rate: este parámetro define la tasa de corrección de errores delantera (FEC), es utilizado por los transmisores y receptores LoRa para reducir las afectaciones producidas por las interferencias de RF.

Factor de propagación (SF): este parámetro representa la cantidad de chirps que se envían por segundo. El valor de este se encuentra entre 7 y 12; donde un valor más grande de SF aumenta el rango de comunicación, pero también aumenta la cantidad de energía utilizada y disminuye la velocidad de transmisión de datos y el tamaño de los paquetes que pueden ser enviados. A su vez, entre menos sea el valor de SF, el rango se ve reducido, pero el gasto de energía es menor y la velocidad y el tamaño de datos que pueden ser transmitidos no se ven afectados.

Potencia de transmisión: se refiere a la medida de la energía que irradia la antena del nodo LoRa.

Polaridad Chirp: este parámetro delimita la polaridad de los chirp transmitidos. Los Gateway LoRaWAN utilizan polaridad invertida para la transmisión de paquetes a los nodos y los dispositivos finales, por el contrario, utilizan polaridad no invertida para la transmisión de paquetes.

Sync Word: este parámetro está definido por el valor de un byte que corresponde a los dos últimos chirps ascendentes del preámbulo y cuya importancia radica en que es con este que se diferencian redes LoRa que utilizan bandas de frecuencia iguales (Electrodaddy, 2021).

Regionalización

Las frecuencias utilizadas por LoRa son frecuencias libres no licenciadas y en su mayoría se utilizan para procesos industriales, científicos y médicos (Banda ISM); es de destacar que cada país o región cuenta con su propia banda de frecuencia. Según la recomendación ITU-TY.4480, En la Tabla 1 se muestra la asignación de frecuencias.

La banda utilizada en USA es conocida como la banda ISM, que corresponde a aplicaciones industriales, médicas y científicas. Esta misma banda es utilizada por la mayor parte de países de América Latina como El Salvador.

Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de comunicación a Nivel de red (Capa OSI Nivel 2,3). Este va sobre la capa física de LoRa. Este protocolo de comunicación LoRaWAN es abierto, por tanto, es factible para una multitud de fabricantes poder desarrollar dispositivos y de esta forma abaratar los costes de estos (Becolve Digital, 2022).

Las redes creadas a partir del protocolo LoRaWAN utilizan una técnica de modulación adaptativa con transceptor multicanal multi-módem en una

Tabla 1

Cuadro de distribución de frecuencias para comunicación LoRa.

País o región	Frecuencias
Europa	863-870 MHz 433 MHz
USA y América Latina	902-928 MHz
China	470-510 MHz 779-787 MHz
Australia	915-928 MHz
India	865-867 MHz
Asia	433 MHz

estación, esto es lo que le permite recibir una cantidad considerable de señales desde diferentes canales; estas señales pueden ser recibidas por todas las estaciones base en un determinado rango. Esta recepción redundante mejora la tasa de mensajes recibidos. Sin embargo, el despliegue de múltiples accesos a la red con el fin de aumentar la cobertura implica en algunos casos una inversión mayor.

La tasa de bit de esta modulación se relaciona con la tasa chirp y la tasa de símbolo, en (Bullian y Urbina, 2018) se indica la relación matemática (1).

$$R_b = SF * \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \frac{\text{bits}}{s} \quad (1)$$

donde:

R: tasa de datos.

SF: factor de ensanchamiento.

BW: ancho de banda.

De forma general se puede decir que LoRa son los cables que conectan los dispositivos en una red Ethernet y LoRaWAN se refiere al proceso de comunicación entre los dispositivos a nivel de la dirección MAC y de la dirección IP de red de los dispositivos en la red Ethernet.

Elementos que componen una red LoRaWAN

Nodos (End points): son los dispositivos finales, para este tipo de redes usualmente estos son sensores, aunque también pueden ser actuadores o trackers. Estos dispositivos son los encargados de recibir o enviar información.

Gateway: es el dispositivo al cual se conectan los nodos por medio de LoRaWAN y que también es el que permite la comunicación de los nodos con el servidor de red.

Servidor de red: software utilizado para controlar la red y definir la lógica de comunicaciones entre los nodos y el Gateway; esta lógica es la que previene el envío de paquetes duplicados y delimita el acceso de los dispositivos.

Servidor de aplicación: es el software que se encarga de tratar los datos que se comunican a través de LoRaWAN. Es completamente independiente de la red LoRaWAN y dependiendo del servidor de red puede comunicarse con MQTT, Modbus TCP, API REST, etc (Becolve digital, 2022).

Clasificación de los dispositivos LoRaWAN (nodos)

Los dispositivos finales empleados en una red LoRaWAN se clasifican en tres categorías: clase A, clase B y clase C. Según la recomendación establecida por Unión Internacional de Telecomunicaciones, todos los dispositivos LoRaWAN deben implementar la clase A; y las clases B y C son extensiones de los dispositivos clase A. Esta clasificación entre los dispositivos define el comportamiento de estos en cuanto a la transmisión de paquetes, así como también brinda información acerca del gasto energético de cada uno.

Para realizar la transmisión y recepción de datos a través de la red LoRAWAN, deben registrarse y habilitarse los nodos en el proveedor del servidor de aplicaciones, que es quien administra las puertas de enlace de la red abierta. Por tanto, el dispositivo LoRaWAN puede unirse a la red por medio de dos métodos: uno, a través de una activación por aire (OTAA), que requiere un procedimiento de comunicación de protocolo de enlace con la puerta de enlace para el intercambio de claves; dos, con un método de activación por personalización, que permite una configuración manual de una clave de cifrado.

Valores representativos de operabilidad en los dispositivos LoRa

Existen Parámetros que delimitan el funcionamiento de los dispositivos LoRa, es decir, el rango que puede cubrir la transmisión, la velocidad, la cantidad de paquetes, etc.; dichos valores se ven afectados en gran medida por el factor de propagación (SF por sus siglas en inglés), que define la duración del tiempo de emisión del chirp. El valor puede oscilar entre 7 y 12. Entre mayor sea, mayor será la distancia cubierta por la señal, pero tiene como consecuencia que la tasa de datos transmitida es más baja y también aumenta el consumo de energía.

También es importante hacer mención a otro parámetro condicionado por el valor del SF, el cual es la carga máxima de paquetes, cuyo funcionamiento cambia drásticamente según sea el valor de SF utilizado. A mayor SF, la carga máxima de paquetes es menor, esto además afecta en cierta medida el dato promedio de la sensibilidad de los dispositivos a determinadas distancias para entornos sin obstáculos (Electrodaddy, 2021).

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los cambios experimentados por los dispositivos según el factor de propagación.

Metodologías para predicción de cobertura

Para la presente investigación, se evaluaron las siguientes opciones: a) Software de simulación (de uso libre y licenciado), b) Modelos matemáticos y c) Instrumentos para medición en campo.

Software de simulación (de uso libre y licenciado)

Para poder establecer una comparativa entre los diferentes métodos posibles de análisis de cobertura es fundamental contar con un simulador, pues este permite realizar un análisis en una zona definida de forma más rápida y automatizada, por tanto, se realiza una exploración de diferentes opciones existentes en el mercado que permitan realizar un análisis y con base a los resultados observados, se determina cual es el que presenta las mejores características. Los simuladores probados son los siguientes: Radio Mobile, XIRIO, TowerCoverage, CloudRF.

Para poder probar su funcionamiento se realiza una prueba tomando como punto de referencia el edificio principal de la Facultad de Medicina, en el cual, se coloca un Gateway teórico y se realiza la simulación. Para ello, se delimitan algunos parámetros, los cuales son: Frecuencia de trabajo entre los 902-928 MHz, Potencia de la antena emisora de 20 dBm, Umbral de recepción de -148 dBm, Polarización vertical, La antena emisora se coloca a 30 metro sobre el nivel del suelo, mientras que la receptora se coloca a 1.5 metros, La antena es de tipo omnidireccional y La ganancia de la antena es de 2dB.

Estos parámetros son delimitados de acuerdo con las especificaciones de funcionamiento del chip SX1276, que es utilizado por la placa TTGO LoRa 32 V1 para llevar a cabo las transmisiones de este tipo. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 1-3.

Radio Mobile posee la capacidad de exportar los mapas a Google Earth, que es una mejor opción para visualizar los mapas de cobertura generados. Visto en esta plataforma, el mapa es el mostrado en la Figura 2.

De esta imagen se puede resaltar que el rango de cobertura es demasiado amplio y que la recepción es óptima en toda el área de estudio, sin embargo, no son resultados que puedan considerarse reales, ya que no se toman en cuenta las pérdidas debidas a obstáculos en la línea de visión. Es posible obtener un mapa que muestra estas pérdidas, pero no muestra el nivel de recepción bajo esta configuración.

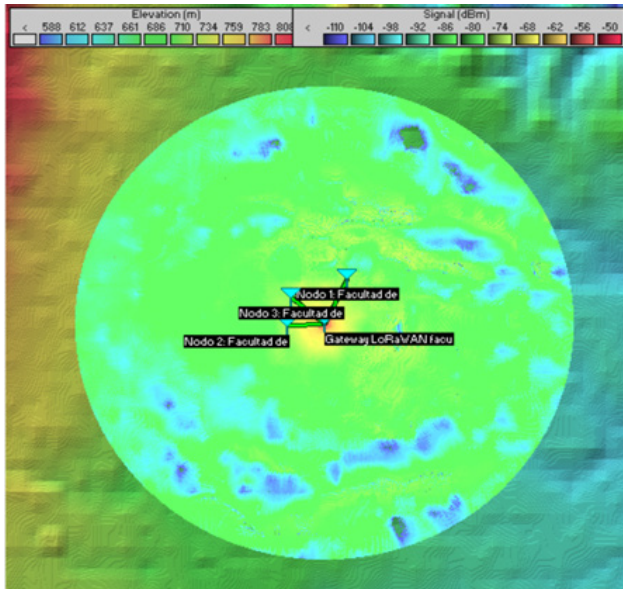
Tabla 2

Factores de propagación en envíos de datos.

Factor de propagación	Tasa de transferencia de datos	Velocidad de bits [bits/s]	Rango [km]	Sensibilidad Rx [dBm]	Carga máxima de paquetes [Bytes]
12	0	290	12	-136	51
11	1	440	10	-133	51
10	2	980	8	-132	51
9	3	1760	6	-129	115
8	4	3125	4	-126	222
7	5	5470	2	-123	222

Figura 1

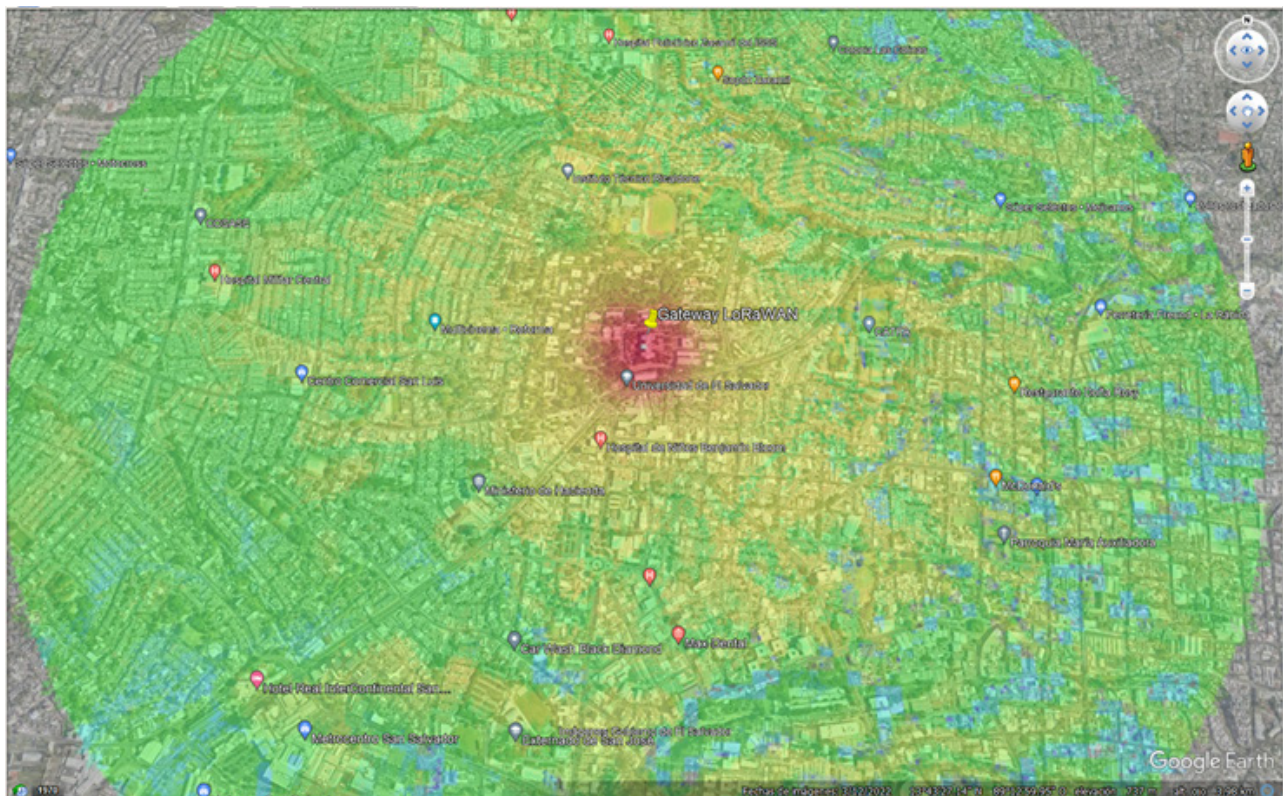
Nivel de señal de cobertura.



Además de esto, otra desventaja de este programa es que no permite delimitar el tipo de modelo que se desea aplicar al análisis.

Figura 2

Cobertura de Radio Mobile compatible con Google Earth.



Simulación en XIRIO

La herramienta XIRIO presenta algunas ventajas en comparación con Radio Mobile, ya que cuenta con una mejor resolución en las imágenes, permite modificar el tipo de modelo a ser empleado, las pérdidas por obstáculos se encuentran mejor calculadas y además, permite delimitar de mejor forma el área de estudio. El mapa de cobertura obtenido se muestra en las Figuras 4-6.

También, es una herramienta compatible con tecnología satelital, por lo que se pueden visualizar las imágenes de esta forma.

La desventaja de este programa es que, si bien los resultados se aproximan más a un análisis real de cobertura, no llegan a ser del todo concluyentes. Es posible mejorar la resolución y el cálculo de cobertura, pero el programa presenta el inconveniente que para ello la herramienta solicita un pago para cada uno.

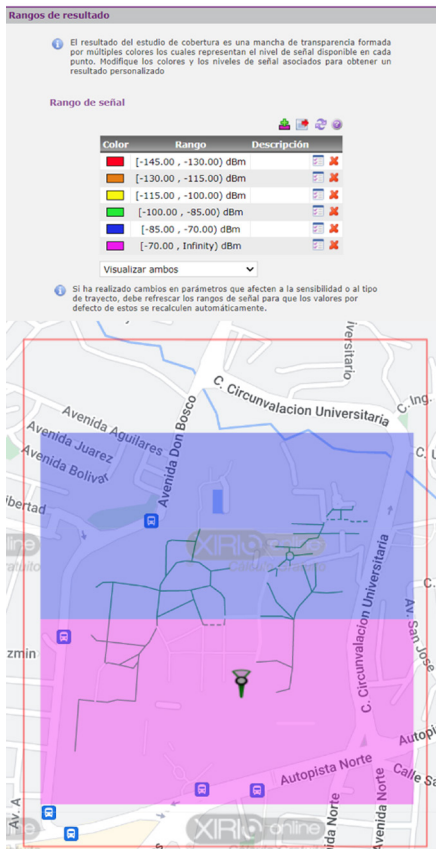
Figura 3

Simulación de cobertura en Radio Mobile compatible con Google Earth.



Figura 4

Simulador XIRIO para predicción de cobertura.



Simulación en Tower Coverage

Como se puede observar de la Figura 6, el resultado obtenido de este programa es bastante real y calcula de mejor forma las pérdidas debidas al terreno, aunque el área de cobertura continúa siendo

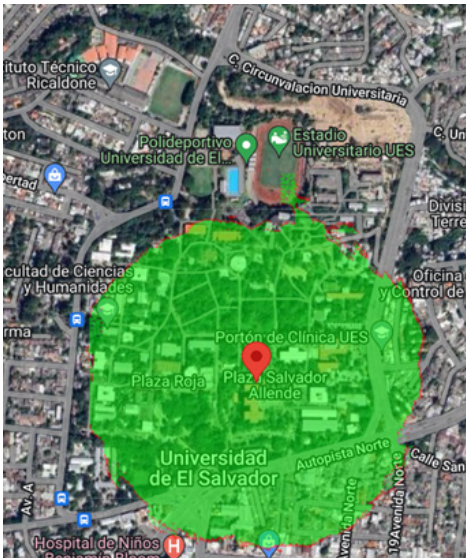
Figura 5

Análisis de resultados de simulación de cobertura.



Figura 6

Análisis de resultados de cobertura en simulador Tower Coverage.



bastante amplia y al realizar un cálculo de la cantidad de componentes a ser utilizados para una red LoRa, podría no ser adecuado.

Simulación en Cloud RF

Este simulador gratuito realiza cálculos bastante precisos de las pérdidas debidas a obstáculos, además de esto, permite personalizar la zona de estudio ya que permite agregar elementos que no se encuentren en los mapas o que no se encuentren bien definidos, esta herramienta permite agregar obstrucciones como edificios, bosques, elementos metálicos, etc. y configurar su incidencia en la recepción. Como extra, permite obtener además del mapa de recepción, un mapa de pérdidas (Figuras 7-8).

Síntesis de la prueba de simuladores

De acuerdo con las pruebas realizadas, se determina que el programa más compatible para poder realizar una comparación con los otros métodos a ser utilizados es CloudRF, ya que es el que realiza cálculos de forma exacta, de acuerdo con el modelo de propagación seleccionado para el análisis, el cual es el COST231 Walfisch-Ikegami. Permite, además, agregar obstáculos de diferente tipo a la zona de estudio en caso de ser necesarios, lo que garantiza

una simulación más aproximada a la real. Este programa es utilizado también para estudios de gran envergadura como por ejemplo el “Estudio de los modelos de propagación en banda de TV abierta ISDB-T con base a las condiciones atmosféricas de la gran Caracas” (Salazar & Buonanno, 2012).

Modelos matemáticos

Como otra alternativa al estudio hecho por simuladores para predecir la intensidad de la señal en un área determinada, se tienen los cálculos matemáticos. Estos calculan las pérdidas de

Figura 7

Análisis de resultados de simulación de cobertura en simulador Cloud RF

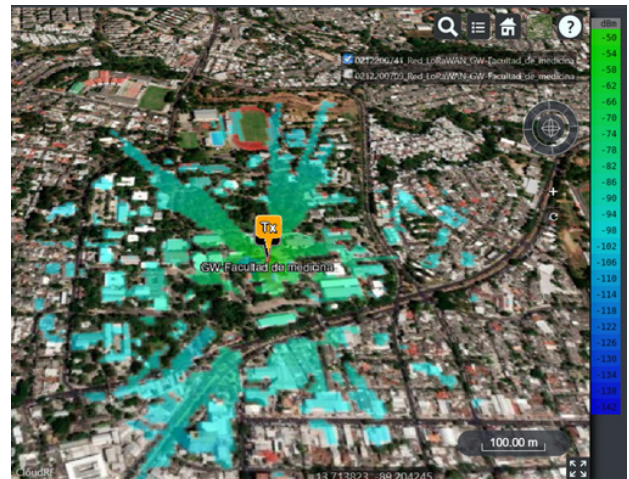
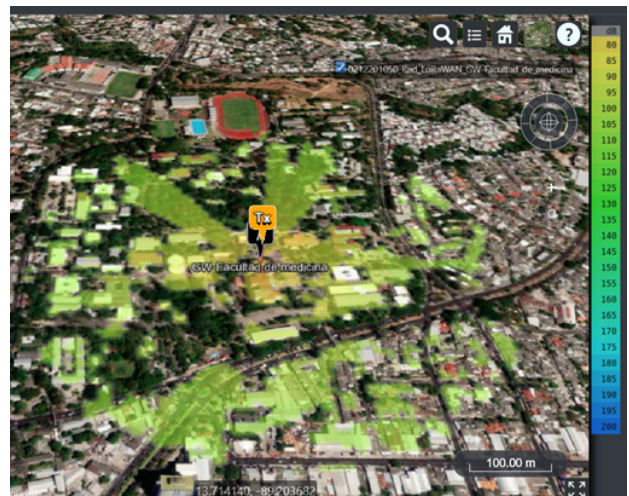


Figura 8

Prueba de cobertura en Cloud RF con modelo COST231.



propagación en una trayectoria, los métodos de propagación básicos según (XIRIO, 2023a, 2023b) son los siguientes:

Okumura-Hata: es un método empírico válido para las frecuencias de 150 MHz a 2 GHz. Recomendado para servicios móviles y de acceso de banda ancha en entornos rurales y urbanos cuando no se disponga de cartografía de alta resolución. (XIRIO, 2023b)

Rec. UIT-R P.528: método de cálculo empírico válido en la gama de frecuencias de 125 MHz - 15.5 GHz. Recomendado para servicios móvil aeronáutico y de radionavegación aeronáutica (XIRIO, 2023b).

Rec. UIT-R P.1147: método empírico de predicción destinado a la gama de frecuencias comprendidas entre 150 y 1700 kHz aproximadamente, para longitudes de trayecto entre 50 y 12000 km (XIRIO, 2023b).

COST 231, Walfisch-Ikegami: método determinístico válido en la gama de frecuencias de 800 MHz a 2 GHz. Recomendado para entornos urbanos en servicios móviles y acceso de banda ancha. Requiere cartografía urbana con información de edificios (XIRIO, 2023b).

En este estudio se utilizará el modelo COST 231, Walfisch-Ikegami. Este modelo es el que mejor se adapta a las condiciones del escenario de prueba pues, se basa en parámetros como densidad de edificios en ambientes urbanos, altura promedio de los edificios, altura de las antenas, anchura de las calles, separación entre los edificios, dirección de la calle con respecto a la trayectoria directa de la antena transmisora y receptora (Figuras 9 y 10). En general, las restricciones para el modelo son las siguientes:

- $F = 800 - 2000$ MHz
- $H_b = 4 - 50$ m (altura de transmisor)
- $H_m = 1-3$ m (altura de receptor)
- $d = 0.02 - 50$ Km (distancia entre transmisor y receptor)
- $\Delta h_b > 0$ m (altura relativa del transmisor respecto a los edificios)

Los parámetros definidos en el modelo COST 231 (XIRIO, 2023c) son los siguientes:

- h_r : altura media de los edificios (m)
- w : anchura de la calle (m)
- b : separación media entre edificios (m)
- ϕ : ángulo formado por la dirección de propagación y el eje la calle (grados)
- h_b : altura de la antena de la estación base (m)
- h_m : altura de la antena del dispositivo móvil (m)
- $\Delta h_m = h_r - h_m$ (m)
- $\Delta h_b = h_b - h_r$ (m)
- l : distancia total entre el primer y el último edificio del trayecto (m)
- d : distancia entre estación base y dispositivo móvil (km)
- f : frecuencia (MHz)

Figura 9

Parámetros para el cálculo de pérdidas del modelo COST 231.

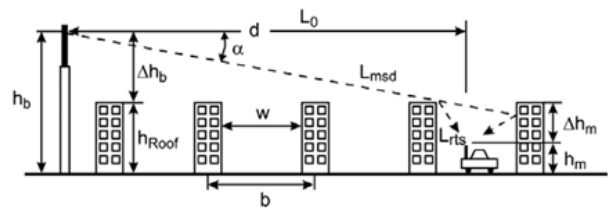
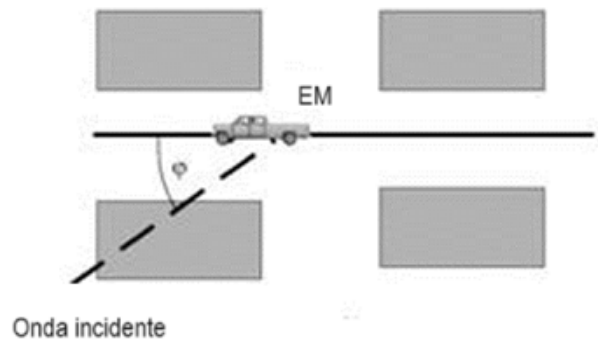


Figura 10

Vista superior entre edificios usando el modelo COST 231.



Las pérdidas en trayectos sin visibilidad directa se modelan con las ecuaciones 2-9.

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (2)$$

L_{bf} = son las pérdidas en condiciones de espacio libre.

$$L_{bf} = 32.45 + 20\log_{10}f(\text{MHz}) + 20\log_{10}d \quad (3)$$

L_{rts} = pérdida por difracción terraza-calle "entre la terraza de los edificios y el móvil."

$$L_{rts} = -8.2 - 10\log w + 10\log_{10}f + 20\log_{10}\Delta h_R + L_{ori} \quad (4)$$

si $L_{rts} \leq 0$, se toma $L_{rts} = 0$

El valor de l_{ori} se obtiene de la siguiente manera:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & 0 < \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 55^\circ), & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

L_{msd} = es una estimación de la "difracción multiobstáculo entre Tx y el edificio próximo al Rx."

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d * \log_{10} d + k_f * \log_{10} f - 9\log_{10} b \quad (6)$$

Donde:

$$L_{bsh} = -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b)$$

Si $\Delta h_b < 0$ entonces $L_{bsh} = 0$

$$K_a = \begin{cases} 54, & \Delta h_b \geq 0 \\ 54 - 0.8\Delta h_b, & \Delta h_b < 0 \text{ y } d \geq 0.5 \\ 54 - 0.8\Delta h_b \cdot \frac{d}{0.5}, & \Delta h_b < 0 \text{ y } d < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

$$K_d = \begin{cases} 18, & \Delta h_b \geq 0 \\ 18 - 15 * \frac{\Delta h_b}{h_r}, & \Delta h_b < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \frac{f}{925 - 1}, & \text{ciudades de tamaño medio} \\ -4 + 1.5 \frac{f}{925 - 1}, & \text{grandes centros metropolitanos} \end{cases} \quad (9)$$

Al sustituir las ecuaciones (3), (4) y (6) en (2) se calculan las pérdidas en la trayectoria entre el transmisor y receptor.

Aplicación del modelo de propagación UIT-R P.833-2

Aunque el modelo COST 231 es muy útil en ambientes urbanos, la mayoría de los sistemas de

comunicaciones terrestres requieren que las señales pasen a través de follajes o campos de vegetación en algún punto, particularmente cerca del receptor (Zamora, 2015). El modelo COST 231 no contempla las pérdidas por vegetación que se encuentran en el lugar por lo cual a la ecuación (2) se le deben de sumar las pérdidas por la vegetación.

Para calcular dichas pérdidas se utilizará el modelo de obstrucción vegetal (UIT R P.833-2) el cual considera 3 casos de aplicación (Zamora, 2015).

Caso 1: variante aplicable a frecuencias entre 30MHz y 60 GHz.

Considera que un extremo (Tx o Rx) y parte de la trayectoria LOS está dentro de la vegetación o zonas arboladas (Figura 11).

Caso 2a: variante aplicable a frecuencias hasta 3 GHz Considera que ninguno de los extremos de Transmisor y receptor está en zonas arboladas, pero hay vegetación en alguna parte de la trayectoria.

Caso 2b: útil para frecuencias mayores de 3GHz Cuando ni el transmisor ni el receptor están en zonas arboladas, pero hay vegetación en alguna parte de la trayectoria, medida en metros.

Para escoger qué caso usar, se debe de tomar en consideración la trayectoria que la señal va a recorrer, en este caso se escoge el Caso 1 debido a que es la que se adapta mejor al ambiente de pruebas. Para el cálculo de las pérdidas en el Caso 1 se tienen las ecuaciones 10 y 11 según (Zamora, 2015):

$$A_{veg} = A_m \left(1 - e^{-\frac{d_{veg} \gamma}{A_m}}\right) \quad (10)$$

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (11)$$

Donde:

A_{veg} : pérdidas en exceso de vegetación.

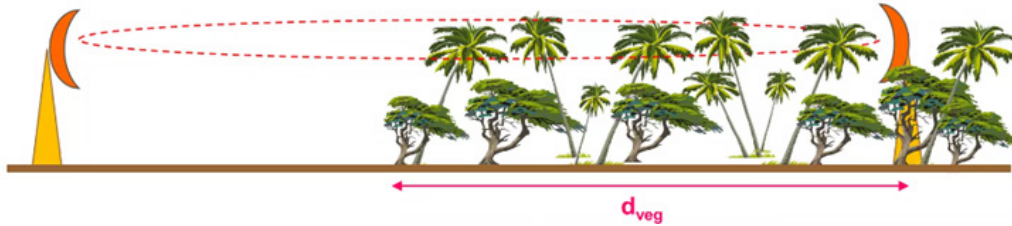
A_m : es la pérdida máxima para un terminal dentro de un tipo y profundidad específica de vegetación. (dB)

d_{veg} : es la parte de la trayectoria afectada el bosque(m)

γ : atenuación específica para un trayecto muy corto de vegetación (dB/m)

Figura 11

Caso 1 con vegetación parcial (Israel M. Zamora).



Para una frecuencia que oscile entre los 900 – 1900 MHz: $A_1 = 1.15 \text{ dB}$ y $\gamma = 0.43$, para árboles con altura media de 15 metros, antena de receptor a una altura de 1.6 metros y una antena transmisora a una altura de 25 metros. Al incluir las pérdidas de la fórmula (10) en (2) se obtiene un valor más real de las pérdidas de propagación en la trayectoria que llegaría a experimentar la señal.

Este modelo permitirá calcular las pérdidas en la trayectoria, si se desea saber la intensidad de la señal recibida en el receptor, se deberá seguir la ecuación 12 (Aida, 2014).

$$RSL = \text{Potencia transmitida} - \text{Pérdidas de propagación} \quad (12)$$

Donde:

La “potencia transmitida” es la potencia de la señal en el punto de transmisión.

Las “pérdidas de propagación” son las pérdidas que experimenta la señal al propagarse a través del entorno.

Al implementar la ecuación 12 se obtiene la intensidad de la señal en un punto determinado, al repetir el proceso para x cantidad de puntos, se puede estimar una cobertura del dispositivo en la zona seleccionada y estudiar cómo se comportaría la señal en los diferentes vanos y poder así predecir un comportamiento de la señal.

Instrumentos para medición en campo

Se muestran en este apartado los equipos seleccionados para la realización de las mediciones de campo de entre todos los explorados.

Analizador RSA306B

El dispositivo analizador de espectro (Figura 12) posee la propiedad de poder observar el espectro en tiempo real a 40 MHz. Destaca por su portabilidad y por su compatibilidad con dispositivos portátiles como computadoras portátiles para la visualización de resultados, alimentándose a través de estas utilizando únicamente un cable USB 3.0 que viene incluido con el instrumento. Puede utilizarse para distintas aplicaciones, por ejemplo: para fines educativos, mantenimiento, instalación y reparación de equipos, diseño y manufactura o también para detección de interferencias.

Entre sus características fundamentales de acuerdo con (Tektronix, 2021) se encuentran:

Puede operar en un rango de frecuencias que va desde los 9 kHz a los 6.2 GHz.

Trabaja de acuerdo con Especificaciones militares Mil-Std 28800, que habla acerca de las recomendaciones de uso para el testeo y la operación de dispositivos eléctricos o electrónicos. Estas recomendaciones son relativas al medio ambiente, impactos y vibraciones para operación en condiciones hostiles.

Figura 12

Analizador de espectro Tektronix RSA 306B.



Posee un ancho de banda de adquisición de señales de 40MHz para efectuar el análisis de vector de banda ancha y en tiempo real de banda ancha.

Es posible la visualización de resultados con el software signalVU-PC que cuenta con 17 modos de análisis. Esta aplicación permite además la personalización de la configuración según las necesidades que el estudio requiera.

Cuenta con diferentes opciones de mapeo, reproducción de señales grabadas, sondeo/ clasificación de señales.

Trabaja con una variedad de señales del tipo LTE, Bluetooth, APCO 25 WLAN.

Capacidad de almacenamiento de resultados en disco para el estudio de eventos de larga duración.

Rango de temperatura de operación de -10°C a 55°C .

Más de 15 opciones para mapeado, análisis de modulación, soporte estándar, pulso, reproducción de archivos guardados y más. Pequeño y ligero (0,75kg) con consumo de energía inferior a 4,5W

TTGO LoRa32

La placa OLED TTGO LoRa32 es una placa de desarrollo ESP32 que incluye el chip SX 1276 conectado de forma interna para la comunicación LoRa y una pantalla OLED SSD1306 para mostrar información de los paquetes recibidos teniendo mayor control de los datos recibidos y enviados (Figura 13). Esta placa posee una comunicación que puede ser mayor a 1 km de distancia entre dispositivos, alta inmunidad a interferencias y bajo consumo de energía, además de ser compatible con las frecuencias sin licencia disponibles en el mundo. Esta placa puede utilizarse para una gran variedad de aplicaciones dada su compatibilidad con la tecnología LoRa y algunos ejemplos realizados con ella pueden ser: sistemas de monitorización remotos de determinados fenómenos físicos como el volumen de líquidos en depósitos, estaciones meteorológicas o sistemas de alerta para desborde de ríos como la realizada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. (Cornelio, 2019)

Figura 13

Placa OLED TTGO ESP32 para envío de datos por LoRa.



El chip SX1276 basado en ESP32 posee una alta sensibilidad de hasta -148 dBm , potencia de salida de $+20\text{ dBm}$, circuito de carga con batería de 3.3 a 7V, velocidad de datos de 150 Mbps, rango de temperatura de funcionamiento de -40°C a 90°C y conexión Wi-Fi (Cameron, 2023).

Metodología de mediciones de campo

Definición de la zona de medición

En primer lugar, se identifican dos zonas dentro de la Universidad de El Salvador a las cuales se les realizan las pruebas de recepción de señal, estas son la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y la Facultad de Ciencias Económicas. Con esto se busca comprobar la incidencia del terreno en los valores de señal recibidos. Estas zonas se eligieron debido a que cuentan con lugares con una altura adecuada para la realización de pruebas de transmisión y recepción y además, permiten obtener una referencia adecuada de modo que se puedan generalizar los resultados para otras zonas dentro de la misma Universidad.

Las pruebas realizadas poseen una distancia de cobertura no mayor a los 200 metros, esto debido a que lo que se busca es obtener una señal no menor a los -110 dBm ya que, a partir de este punto, cualquier interferencia debida al clima u otros factores asociados, puede afectar el funcionamiento de los equipos (Figuras 14 y 15).

Puntos de prueba

Una vez delimitadas las zonas de prueba, se procede

a seleccionar una cantidad significativa de puntos de medición ubicados en localizaciones con diferentes características geográficas, así, por ejemplo: en zonas con línea de visión sin obstáculos, zonas con pocos obstáculos, detrás de edificaciones, lugares con mucha vegetación. Además, se identifican las características de los vanos entre el emisor y el receptor, luego, contrastar esa información con la medición obtenida.

Para cada prueba se tomaron 20 mediciones que se realizaron alrededor del Gateway. Los puntos seleccionados fueron los siguientes:

Geolocalización

Para obtener el dato exacto del lugar de medición se programó el módulo NEO-6M-0-001 el cual es un módulo GPS cuyo funcionamiento se basa en la comunicación con diferentes satélites que, al establecer un enlace con el módulo, calculan su posición (Figura 16).

Selección del rango de frecuencias de medición

En El Salvador, no existe ninguna ley que regule las comunicaciones realizadas mediante el protocolo LoRaWAN o la tecnología LoRa. Sin embargo, el

Figura 14

Ubicación de Gateway (azul) en cuarta planta del edificio B y puntos de prueba (rojo) en Facultad de Ingeniería y Arquitectura en QGIS.

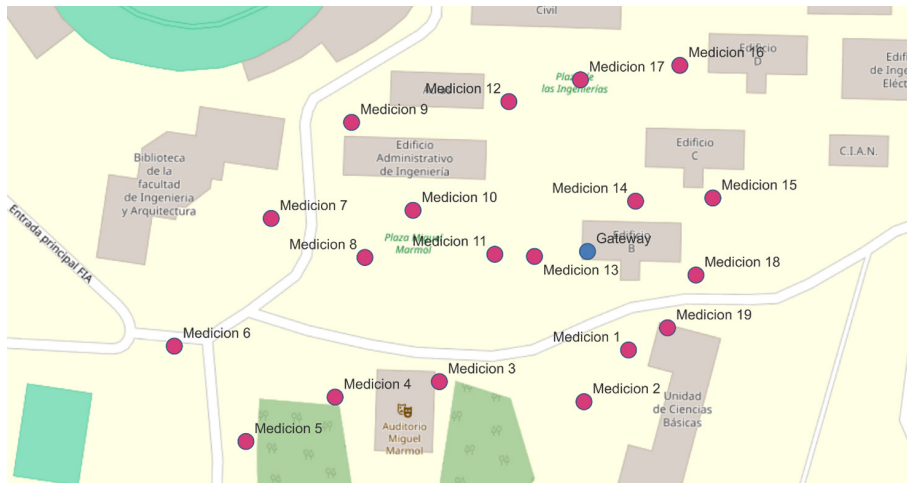


Figura 15

Ubicación de Gateway (azul) en cuarta planta de edificio "Rafael Menjívar" y puntos de prueba (rojo) en Facultad de Ciencias Económicas en QGIS.

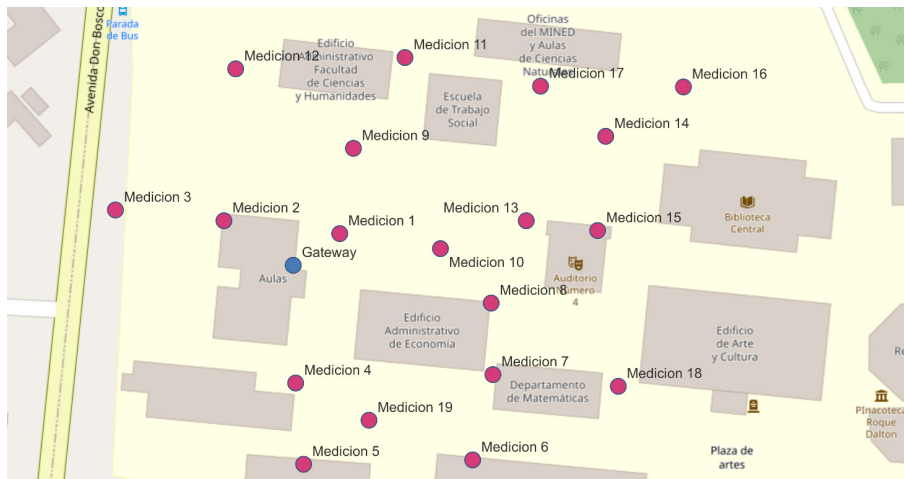
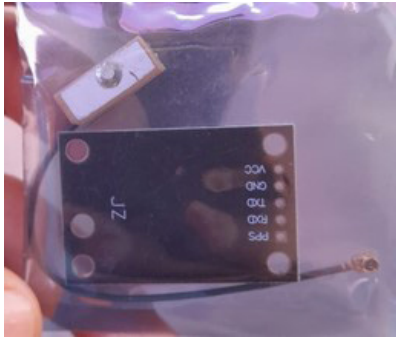


Figura 16

Módulo GPS NEO-6M-0-001 para ubicación de puntos de medición.



ente encargado de regular las telecomunicaciones a nivel general es la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET, 2017), y establece que: la porción del espectro 902-928 MHz, en El Salvador, conforme a la resolución clasificada con el número No. T-446-2002, del cinco de julio del dos mil dos; la banda 902-914 MHz está atribuida a título primario al servicio móvil terrestre, cuyo espectro es de uso regulado, y requiere concesión. Quedando la parte alta de esta banda (914-928 MHz) disponible para ser utilizada por tecnologías SPREAD SPECTRUM; como el caso de las transmisiones LoRa (Figura 17).

Dadas estas recomendaciones, se puede utilizar el ancho de banda de 914-928 MHz, no obstante, como se menciona anteriormente, la banda de 915

a 928 MHz es una banda libre conocida como banda ISM, que es utilizada para aplicaciones industriales, médicas y científicas y por tanto, no existe una regulación en su uso, esto causa que se perciba una gran cantidad de interferencias en esta banda como se muestra a continuación:

Por ende, se utiliza para la medición la frecuencia de 914 MHz, lo cual permite ver de mejor manera el comportamiento de la señal emitida por el dispositivo transmisor.

Parámetros establecidos de transmisión y recepción

- Factor de ensanchamiento: 7
- Ancho de banda utilizado: 125 kHz
- Tasa de transferencia de datos: 5
- Potencia de transmisión: 20 dBm

Los valores son definidos de tal forma debido a que se busca priorizar la calidad del enlace antes que la distancia, ya que como se muestra en la tabla – estos parámetros aumentan la transmisión de datos sacrificando el área de cobertura.

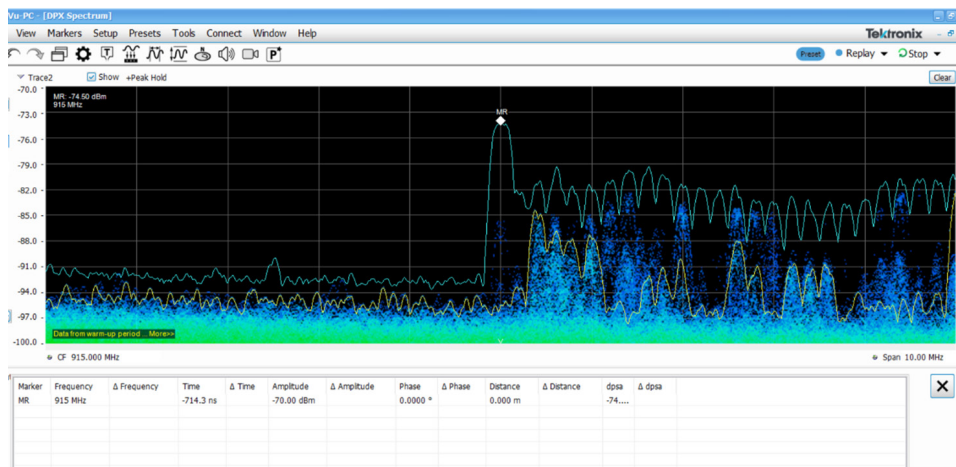
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materiales de construcción

Luego del estudio de cobertura se procede a la implementación de un prototipo utilizando tecnología de radio alcance, con el que se analizará la cobertura de la red y su comparativa con la

Figura 17

Software SignalVU-PC



simulación y cálculos obtenidos para su predicción de cobertura. Para este prototipo se utilizará la tecnología LoRaWAN explicada en las secciones anteriores.

Para la implementación de este prototipo se usarán 2 placas TTGO ESP32 (LiLYGO), una será configurada como transmisor, que enviará una cadena de texto al nodo receptor, que tendrá un contador de mensajes recibidos y un indicador de intensidad de potencia recibida (Figuras 18 y 19). Cada placa cuenta con una batería de 5 voltios como fuente de alimentación. La placa utiliza el lenguaje de programación Arduino, lo que la hace muy versátil al momento de programar. Para poder establecer una comunicación entre placas, se utiliza la librería *lora.h*, la cual configura y envía los paquetes que se deseen por su antena.

En el lado del receptor, se utilizó además el analizador de espectro RSA306B (Tektronix, 2021, 2022) de la marca Tektronix. Este dispositivo se conecta a un ordenador, que cumple la doble función de mostrar los resultados y también funciona como fuente de alimentación. Este equipo al ser propiedad de la universidad se encuentra disponible para la realización de estos estudios. Una ventaja al usar este equipo es su portabilidad, lo que permite poder desplazarse con él a diferentes sectores mientras este esté conectado a la PC.

Condiciones de las pruebas

Las condiciones de prueba en las diferentes facultades se especifican en las Tablas 3 y 4.

Figura 18

Placa transmisor y receptor modelo TTGO ESP32.

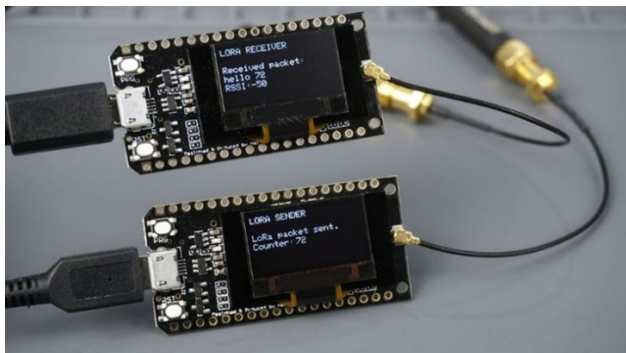


Figura 19

Ubicación física de prototipo para envío de datos.



Tabla 3

Condiciones de medición en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura con prototipo LoRa.

Condiciones de medición en Facultad de Ingeniería y Arquitectura	
Parámetros de medición en RSA	Frecuencia central= 914 Mhz, span 1 MHz, RBW= 5 KHz
Distancias entre Tx y Rx	25 a 125 metros
Altura de la antena transmisora	12 metros
Altura de antena receptora	1.5 metros
Equipos de medición	Tektronix RSA306 B
Escenarios	Línea vista, sin línea vista (obstáculos: edificios y árboles)

Tabla 4

Condiciones de medición en Facultad de Ciencias Económicas con prototipo LoRa.

Condiciones de medición en Facultad de Ciencias Económicas	
Parámetros de medición en RSA	Frecuencia central= 914 Mhz, span 1 MHz, RBW= 5 KHz
Distancias entre Tx y Rx	15 a 122 metros
Altura de la antena transmisora	16 metros
Altura de antena receptora	1.5 metros
Equipos de medición	Tektronix RSA306 B
Escenarios	Línea vista, sin línea vista (obstáculos: edificios y árboles)

Al realizar la medición de cobertura en ambas zonas de estudio, se tabularon los datos para cada una de ellas y con base a estas tablas, se realizó una comparativa para determinar cuál es la metodología adecuada para ser implementada según las condiciones geográficas que presentan dichas zonas.

Análisis de resultados

De los resultados se puede observar que la simulación realizada en el software Cloud RF presenta valores más cercanos a los medidos con el RSA en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, en la cual no hay zonas boscosas densas y es un área suburbana, determinando así que la simulación hecha en este software es una buena opción para zonas urbanas y suburbanas donde la vegetación no sea demasiado densa, por ejemplo, la medición realizada en el punto 7, donde el RSA306B mostró un valor de -91.80 dBm y la simulación un valor de -90 dBm, a diferencia de la predicción matemática que mostró un resultado de -74.66 dBm.

Para zonas donde hay una vegetación densa, como ciertos sectores de la Facultad de Ciencias Económicas, se recomienda usar el modelo matemático ya que el software no puede estimar a detalle las pérdidas debidas a la vegetación presente en el lugar. Estas zonas boscosas densas representan una pérdida de señal muy significativa, pérdidas que, a pesar de que el software permita recrearlas mediante la herramienta de creación de obstáculos, no se reflejan a cabalidad. Para estos casos presentados en este tipo de condiciones geográficas, Los cálculos matemáticos se asemejaron más a los medidos por el RSA siendo este una buena opción para lugares que tengan zonas boscosas densas. Como mejor ejemplo se pueden tomar los valores de la medición 8 en esta zona, ya que el RSA306B mostró una medición de -91.53 dBm, mientras que los valores obtenidos de la simulación y del cálculo matemático fueron de -80 dBm y -85 dBm, respectivamente, pudiéndose notar una mayor cercanía del valor del cálculo matemático. También, como se menciona anteriormente, en las zonas de la Facultad de Ciencias Económicas donde existe mayor presencia de edificaciones, los resultados de la simulación se apegan más a los valores percibidos en las mediciones, como en el

caso de la medición 9, donde el vano atraviesa una pequeña edificación y aquí, el RSA306B percibe un nivel de señal de -86.27 dBm, que se asemeja más al valor de -80 dBm, de la simulación, que al valor de -64 dBm del cálculo matemático.

Asimismo, se recomienda que, para aquellas zonas cercanas a los Gateway, la mejor manera de poder observar la señal es la realización de mediciones mediante el RSA306B directamente, pues tanto el modelo matemático como la simulación dan valores demasiado bajos de recepción a comparación a los obtenidos de las mediciones. Esto es sugerido principalmente para zonas cercanas que no presenten obstáculos de por medio entre el transmisor y receptor; tal es el caso de la medición 13 efectuada en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, donde el valor medido con el analizador de espectro es de -81.10 dBm y en la simulación y en los cálculos los valores obtenidos son de -50 dBm y -46.07 dBm respectivamente.

Las mediciones realizadas con el receptor realizado a partir de la placa TTGO ESP32 no son tomadas en cuenta debido a que, presentan valores de recepción demasiado bajos, esto quiere decir que las pérdidas entre placas son bastante significativas. Este receptor cuenta con la ventaja que permite la recepción de datos a mayor distancia en relación con el RSA306B, pero si se toman en cuenta estos valores, se corre el riesgo de que, al ser colocados los nodos de la red, se seleccionen ubicaciones donde estos sean susceptibles a presentar pérdidas de conectividad debido a interferencias producidas por fenómenos naturales o por otras redes de comunicación.

Finalmente, es importante destacar que, para aquellas zonas ubicadas detrás de edificios de longitud considerable, no aplican los análisis obtenidos mediante simulación y los resultados obtenidos de los cálculos, pues, estos sitios presentan pérdidas demasiado significativas como para poder tener una buena recepción, por tanto, en estos casos se recomienda la instalación de otro Gateway que tenga una mejor posición para poder establecer comunicación en ese punto.

La selección del método para la predicción de

cobertura de la placa TTGO ESP32 dependerá mucho de las características del lugar, las características de los edificios, la densidad de árboles y la ubicación de los nodos. Pero el comportamiento real de la cobertura de los nodos se verá afectado por otros factores como fenómenos hidrometeorológicos como pérdidas causadas por vapores, gases y lluvias. Siendo solo una predicción que se asemeja al valor real de cobertura.

CONCLUSIONES

Se determinó que, para las condiciones geográficas presentes en los diferentes escenarios de prueba seleccionados dentro de la Universidad de El Salvador, los parámetros de comunicación que deben utilizarse son, factor de ensanchamiento de 7, ancho de banda utilizado de 125 kHz, tasa de transferencia de datos ajustada en 5, potencia de transmisión establecida en 20 dBm. Esta selección se debe a que, en las zonas de estudio seleccionadas, así como en la gran mayoría de zonas dentro de la Universidad, existe una amplia presencia de obstáculos que pueden ocasionar pérdidas en los enlaces entre los gateways y los nodos sensores al implementar la red. Si bien el enlace aún es posible cambiando los valores de los parámetros seleccionados, a aumentar el factor de ensanchamiento, el ancho de banda o la tasa de transmisión de información, se corre el riesgo de aumentar las pérdidas de señal entre los enlaces, pues, valores más altos de estos, solo se recomiendan para zonas donde la presencia de obstáculos sea mínima.

Según las pruebas realizadas, se concluye que la frecuencia ideal para ser utilizada es la de 914 MHz. La selección de esta frecuencia se debe a que, como tal, el uso de la tecnología LoRa no está normado en El Salvador, pero se asocia a las tecnologías del tipo spread spectrum, que operativamente pueden ser utilizadas en la banda de 902-928 MHz; pero que según el cuadro nacional de distribución de frecuencias pueden ser utilizadas en la banda de 914-928 MHz. De acuerdo con las mediciones realizadas, se comprobó que, en la frecuencia de los 915 MHz en adelante, existe una gran cantidad de interferencias debido a que es una banda "libre", pero que la frecuencia de 914 MHz es menos utilizada, por lo

tanto, es idónea para este tipo de pruebas.

De acuerdo a las características de la zona de estudio, se eligió el modelo COST 231 (Ikegami et al., 1991), debido a que éste toma en consideración parámetros como altura de edificios, distancia entre edificios, ángulo de señal recibida, distancia entre el transmisor y receptor a una distancia de 20 metros o más; pues de acuerdo con estas, es el modelo que mejor se adapta a los entornos de prueba de nuestro prototipo. Aunque el modelo Okumura-Hata presente similitudes, no es posible implementarlo en este estudio debido a que este solo admite valores de distancia superiores a 1 kilómetro. Sin embargo, no puede describirse la cobertura de la zona únicamente con este modelo, ya que hay zonas donde la señal recorre árboles. En estas, el modelo Walfisch-Ikegami no contempla estas pérdidas de vegetación, siendo necesario anexar estas pérdidas por medio del modelo UIT R P.833-2 teniendo así un cálculo más exacto y valores más cercanos a los registrados por el medidor RSA306B.

Para distancias entre transmisor y receptor que sean menores a 20 metros, es necesario utilizar un analizador de espectro para la medición de la intensidad de señal, debido a que los valores obtenidos para estas distancias tanto de simuladores como aquellos obtenidos por cálculos matemáticos difieren mucho de los valores reales.

RECOMENDACIONES

En la actualidad, no existen simuladores asequibles que proporcionen información exacta acerca de las características de propagación de acuerdo con las condiciones geográficas de la Universidad de El Salvador y en general del territorio nacional. Por tanto, para obtener mejores resultados, se recomienda utilizar versiones superiores de estos simuladores ya que brindan acceso a imágenes de mayor resolución u otras herramientas de simulación más especializadas, aunque impliquen un costo significativo.

Este estudio se realizó con condiciones climáticas ideales. Para una investigación más amplia, se recomienda realizar mediciones en condiciones

atmosféricas diversas como pueden ser la presencia de lluvia, vientos, tormentas eléctricas, etc. Así también, se sugiere diseñar un dispositivo que sea capaz de soportar estas condiciones sin sufrir daños a su estructura a fin de poder realizar este tipo de pruebas.

El estudio de cobertura se realizó a partir de los datos obtenidos de un transmisor programado con una placa TTGO LoRa 32, la cual es asequible y cuyas capacidades son aceptables para este tipo de estudios, pues como emisor puede ajustarse a una potencia máxima de 20 dBm y con un alcance de alrededor de 1 km y como receptor posee un umbral de sensibilidad de hasta -148 dBm. Sin embargo, si se desea implementar un sistema más profesional es necesario explorar otras opciones en el mercado que cuenten con la tecnología LoRa, tanto para gateways como para nodos, pues esto implicaría una mejoría en la calidad de los enlaces, ya que pueden ser configurados a mayor potencia, un mayor umbral de recepción, algunos poseen una mejor antena, mayor capacidad de memoria, mejor procesador, etc.

REFERENCIAS

- Bassi, A. (03 de junio de 2021). *Intro a la tecnología LoRa*. Recuperado el 18 de noviembre de 2023, de gotoiot: https://www.gotoiot.com/pages/articles/lora_intro/content.html#:~:text=La%20historia%20de%20LoRa%20comenzó,convertir%20la%20idea%20en%20realidad
- Becolve digital. (2022). *Conceptos técnicos básicos que te ayudarán a entender LoRa y LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) en pocos minutos*. Obtenido de Becolve Digital: <https://becolve.com/blog/conceptos-tecnicos-basicos-que-te-ayudaran-a-entender-lora-y-lorawan-low-power-wide-area-network-en-pocos-minutos/>
- Cornelio, E. R. (2019). *Prototipo de alerta temprana para desborde de ríos*. UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTONOMA DE TABASCO . Tabasco, Mexico: DAIS. Recuperado el 20 de Diciembre de 2023
- ElectroDaddy. (2021). *LoRaWAN e Internet de las cosas*. *ElectroDaddy*. Recuperado el 20 de octubre de 2023, de <https://www.electrodaddy.com/lorawan-internet-de-las-cosas/>
- Ibarra, L. (7 de julio de 2019). (l. p. grafica, Editor). Recuperado el 22 de noviembre de 2023. Obtenido de la prensa grafica: <https://blogs.laprensagrafica.com/litoibarra/?p=5002>
- Zamora, I. M. (2015). *Lecture 4: Análisis de radiopropagación* [Presentación de Slideshare]. <https://es.slideshare.net/nica2009/lecture-4-analisis-radioprop-p2>
- Cameron, N. (2023). *ESP32 Microcontroller*. En N. Cameron (Ed.), *ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller* (pp. 1-54). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8_1
- Quistial, A., Lupera Mortillo, p., Tipantuña, C., & Carvajal, J. (2018). *Modelo Matemático Adaptado para el Cálculo de Pérdidas de propagación en la banda de 900 MHz para Microceldas en la Ciudad de Quito*. Escuela Politecnica Nacional , Departamento de Electronica . Quito: Revista Politecnica. Recuperado el 15 de noviembre de 2023
- Tektronix. (2021). *Spectrum Analyzer RSA306B USB Real Time Spectrum Analyzer Datasheet*. <https://www.tek.com/en/datasheet/spectrum-analyzer-0>
- Tektronix. (2022). *SignalVu-PC Vector Signal Analysis Software* [Software]. Tektronix. <https://www.tek.com/en/support/software/application/signalvupc-vector-signal-analysis-software-v450093>
- ITU-T. (2021). *Y.4480: Low power protocol for wide area wireless networks* (Serie Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects, next-generation networks, internet of things and smart cities). ¹ <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=14818>
- XIRIO. (2023a). *Métodos de Cálculo de Rec. UIT-R*

P.1147. https://www.XIRIO-online.com/web/help/es/rec_1147.htm

XIRIO. (2023b). *OKUMURA-HATA: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*. <https://www.XIRIO-online.com/web/help/es/okumura-hata.htm>

XIRIO. (2023c). *Modelo COST 231*. https://www.xirio-online.com/web/help/es/cost_231.htm

Ikegami, F., Takeuchi, T., & Yoshida, S. (1991). Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 39(3), 299-302. doi:10.1109/8.76325

Salazar, A., & Buonanno, N. (2012). *ESTUDIO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EN BANDA DE TV ABIERTA ISDB-T CON BASE A LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE LA GRAN CARACAS*. Universidad Católica Andrés Bello.

Bullian, L.; Urbina, C. (2018). *Implementación de una red LoRa en el ámbito de la Universidad Nacional de San Martín*. Universidad Nacional de San Martín. Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 10 de octubre de 2023

SIGET. (2017). *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. Obtenido de Portal de Transparencia- El Salvador : <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/siget/documents/314524/download>