

Herramienta Prototipo Software de Estimación de Cobertura Radioeléctrica para la Planificación de una Red IoT

Edward O. Navarro, Víctor M. Quintero, Guillaume Leblanc

Departamento de Telecomunicaciones - GRIAL

Universidad del Cauca - FIET

Popayán, Colombia

edward@unicauba.edu.co, vflorez@unicauba.edu.co, guillaume.leblanc@wndgroup.io

Abstract—Colombia has decided to adopt and implement the SigFox network technology to provide highly competitive Internet of Things (IoT) services for Colombian companies. The deployment of the network in the country implies, among many other processes, a greater precision in coverage estimates and the identification of points where communication is difficult. Therefore, it is of fundamental importance to have radio coverage estimation tools that allow operators to size the complexity of the deployments necessary to cover the service demand. This article presents the development of an open source software prototype tool that allows the estimation of radio coverage of the BSs that are part of the SigFox network in different urban and rural settings of Colombia. The tool is based on a series of algorithms and calculation methods that allow estimating the characteristics of radio propagation in different types of scenarios, based on free topographic information and the characteristics of the equipment and elements that are part of the SigFox network. The tool is conceived as part of a general tool for implementation, planning and commissioning and maintenance of the SigFox network in Colombian scenarios.

I. INTRODUCCIÓN

Internet ha revolucionado las comunicaciones de una manera radical, convirtiéndose en la herramienta tecnológica más poderosa de todas. En la actualidad internet no es solo una red de computadores, sino que ha evolucionado a través del tiempo hasta convertirse en una red de dispositivos de todo tipo y tamaño, todos conectados, todos comunicando y compartiendo información todo el tiempo [1]. El Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), surge como parte de esta evolución y se trata de un concepto que hace referencia a la interconexión digital de objetos cotidianos con la red de internet. Esta integración del mundo físico con el mundo digital tiene el potencial de transformar la forma de vida de las personas, la forma de hacer negocios, y especialmente la forma de tomar decisiones, en áreas de aplicación como la energía, el transporte, el medio ambiente, la salud, etc [2].

Por otra parte, gran cantidad de dispositivos IoT dependen de una conexión inalámbrica para el intercambio de información. Actualmente existen muchas tecnologías de red inalámbrica que permiten este propósito, las cuales pueden ser divididas en dos grandes categorías: tecnologías inalámbricas de corto alcance (Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN, *Wireless Local Area Network*) y Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, *Wireless Personal Area Network*)) y tecnologías inalámbricas de largo alcance (redes móviles celulares, redes satélites). Sin embargo, en los últimos

años han surgido nuevas tecnologías de redes inalámbricas, denominadas tecnologías de Red de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, *Low Power Wide Area Network*), las cuales son consideradas específicamente para aplicaciones IoT masivas que requieren una baja velocidad de transmisión de datos, áreas de cobertura amplias, diseños económicos y bajo consumo de energía [3], [4].

SigFox es una empresa que ha desplegado una red global de tipo LPWAN, siendo una de las opciones más importantes para la interconexión de dispositivos IoT actualmente, tanto por la facilidad de interconectar dispositivos, como por su rápido crecimiento y aceptación en el mercado. Colombia es uno de los países que implementa esta tecnología, de la mano del grupo de Desarrolladores de Redes Inalámbricas (WND, *Wireless Network Development*) Colombia. El cuál es el operador SigFox encargado de la planificación, despliegue, operación y administración de la red en el país [5]. Este despliegue en Colombia implica entre muchos procesos, una mayor precisión en las estimaciones de cobertura y la identificación de puntos donde es difícil la comunicación. En el presente artículo se muestra el desarrollo de una herramienta prototipo *software* de código abierto que permite la estimación de cobertura radioeléctrica de las BSs que hacen parte de la red SigFox en diferentes escenarios urbanos y rurales de Colombia.

II. TECNOLOGIA SIGFOX

SigFox es una tecnología de red propietaria que permite una comunicación de largo alcance entre dispositivos (30-50 km en escenarios rurales y 3-10 km en escenarios urbanos), operando en varios países en las bandas ISM sub- GHz sin licencia (e.g. 868 MHz en Europa y 902 MHz en EE.UU). Los dispositivos finales transmiten sus mensajes a las BSs en una Banda Ultra Estrecha (UNB, *Ultra Narrow Band*) (100 Hz en Europa y 600 Hz en EE.UU) a una baja velocidad de transmisión de datos (100 bps en Europa y 600 bps en EE.UU). SigFox al emplear UNB usa eficientemente el espectro disponible y tiene niveles de ruido muy bajos, lo que lleva a un bajo consumo de energía de los dispositivos conectados a la red (30 mA en transmisión y 6 nA en reposo), una alta sensibilidad del receptor y un diseño de dispositivos de bajo costo.

Sigfox utiliza mayoritariamente la transmisión de Enlace Ascendente (UL, *Up Link*). Las comunicaciones bidireccionales son solicitadas únicamente por los dispositivos

IoT cuando la aplicación realmente lo requiera. Sin embargo, el número de mensajes para comunicaciones UL está limitado a 140 mensajes por día. La longitud máxima de carga útil para cada mensaje UL es de 12 bytes. Por otro lado, para garantizar la fiabilidad de la transmisión SigFox utiliza diversidad de tiempo/frecuencia y redundancia de mensajes. En dónde, cada dispositivo IoT envía un mensaje tres veces a través de diferentes canales de frecuencia. Las BSs pueden recibir mensajes simultáneamente a través de todos los canales, por lo que el dispositivo IoT transmite en un canal elegido aleatorio [6], [7].

III. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Las herramientas de planificación radioeléctrica son el instrumento informático que se utilizan como apoyo al diseño, puesta en marcha y optimización de redes radioeléctricas en todo el mundo. Estas herramientas permiten de entre muchas otras funciones, obtener mapas de cobertura teórica de las redes de comunicaciones inalámbricas para ayudar a dimensionar la complejidad de los despliegues necesarios para cubrir la demanda de servicio. Incorporando modelos matemáticos que estiman las pérdidas por propagación en un área geográfica determinada, a partir de información geográfica y de parámetros radioeléctricos particulares de cada sistema de radiocomunicación. La herramienta de estimación de cobertura radioeléctrica presentada en este documento se divide funcionalmente en tres partes:

A. sistema de información geográfica

El cual es un sistema formado por componentes (*hardware* y *software*) y procedimientos elaborados para permitir la captura, gestión, análisis, manipulación y representación de información geográficamente referenciada, con la finalidad de resolver problemas complejos de planificación y gestión. La principal característica que posee un SIG, es la de ser capaz de representar a los objetos del mundo real mediante diferentes capas temáticas. Permitiendo a los usuarios modelar el escenario en el que se produce la propagación de la señal (orografía del terreno, presencia de edificios, etc.) y visualizar los resultados de cobertura, de manera rápida y sencilla. La información geográfica que se utiliza en los SIG suele estar almacenada principalmente en dos formatos diferentes [8]:

1) *Formato raster*: Representa al mundo real en una serie de unidades mínimas denominadas celdas o píxeles, donde cada píxel almacena un valor de información del espacio geográfico considerado. La Figura 1 presenta como se modela uno de los departamentos de Colombia (Valle del cauca) mediante un Modelo Digital de Elevaciones (DEM, *Digital Elevation Model*), en donde el color de los pixeles representa las diferentes alturas de los accidentes geográficos. En este tipo de formatos cuanto mayor sean las dimensiones de las celdas (resolución) menor es la precisión o detalle en la representación del espacio.

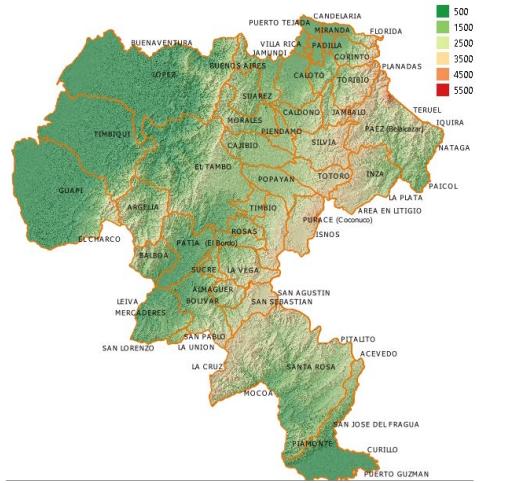


Fig. 1. Representación del departamento del Cauca (Colombia). Mediante un modelo digital de elevaciones.

2) *Formato vectorial*: Representa al mundo real mediante tres objetos espaciales: puntos, líneas y polígonos. La Figura 2 muestra como se modela una ciudad de Colombia mediante un modelo digital de edificios, donde cada polígono representa la forma de un edificio y cada color representa la cantidad de pisos que tiene el edificio en cuestión. Este formato se utiliza cuando se requiere precisión en la ubicación de los objetos sobre el espacio y los fenómenos a representar son discretos.



Fig. 2. Representación de la ciudad de Popayán (Colombia). Mediante un modelo digital de edificios.

Esta información es utilizada dentro de la herramienta de estimación de cobertura radioeléctrica presentada en este documento, con el fin de realizar los cálculos de predicción de cobertura, debido a que el terreno influye enormemente en la propagación de las señales radioeléctricas. Para ello hace uso del *software* libre Quantum Gis como plataforma de creación, análisis, almacenamiento y gestión de la información geográfica.

B. Base de Datos de Elementos Radioeléctricos

Almacena la descripción de los elementos que constituyen la red SigFox y sus parámetros radioeléctricos (potencia de transmisión, sensibilidad del receptor, ganancia de antenas, etc). Dicha base de datos esta vinculada a la nube de SigFox

(también conocida como SigFox Backend). En la nube se administran los mensajes transmitidos, los elementos que constituyen la red, los usuarios de la red, la facturación de los clientes, etc [9].

C. Principios Básicos de Propagación de las Señales Radioeléctricas

Consiste en una serie de algoritmos y métodos de cálculo, implementados dentro de la herramienta, los cuales a partir de la información suministrada por los bloques anteriores, y para una configuración de red definida por el usuario, permiten estimar las características de la propagación radioeléctrica en distintos tipos de escenarios. Los tipos de propagación que se consideran dentro de la herramienta son [10]–[12]:

1) *Propagación por Espacio Libre:* El cual sirve como marco de referencia y se considera como la pérdida de propagación mínima que cabe esperar en un enlace radioeléctrico. se expresan matemáticamente como:

$$L_{fs}(dB) = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d), \quad (1)$$

dónde, d es la distancia entre la BS y el dispositivo final, en kilómetros (Km) y f es la frecuencia de operación del sistema en megahercios (MHz).

2) *Propagación por Reflexión:* La propagación en espacio libre es aplicable únicamente bajo condiciones restrictivas. En la práctica, existen superficies donde las ondas de radio pueden ser reflejadas. Un caso simple pero de interés práctico, es donde se modela la propagación mediante un rayo directo y otro reflejado en el suelo. En este caso se consideran dos situaciones: en primer lugar, cuando la distancia entre las antenas es lo suficientemente pequeña como para obviar la curvatura de la tierra y asumir que la superficie es plana; y en segundo lugar, cuando la distancia es tal que la tierra debe ser considerada. En ambos casos, las pérdidas básicas de propagación se calculan como:

$$L_b(dB) = L_{fs} - 10 \log \left(1 + (D|R|)^2 + 2D|R| \cos(\beta + \Delta) \right), \quad (2)$$

dónde, L_{fs} son las pérdidas de propagación por espacio libre (ecuación 1), D se conoce como factor de divergencia (para distancias menores a 15 Km $D \approx 1$), $|R|$ es la magnitud del coeficiente de reflexión del suelo, β es la fase del coeficiente de reflexión del suelo y Δ la diferencia de fases entre ambos trayectos.

3) *Propagación por Refracción:* En un radioenlace de larga distancia, las señales radio eléctricas que funcionan en la banda de Ultra Alta Frecuencia (UHF, *Ultra High Frequency*) viajan por la capa baja de la atmósfera denominada troposfera, en dónde las señales experimentan un fenómeno denominado refracción a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas. Como consecuencia de la refracción, la trayectoria del rayo directo no es recta, sino que, en realidad se propaga de manera curvilínea. Por otro lado, se debe tener

en cuenta la curvatura terrestre, debido a que la curvatura de la Tierra hace que los accidentes geográficos tengan una mayor incidencia negativa sobre la propagación.

Estos efectos pueden modelarse de forma conjunta aplicando una corrección sobre la curvatura terrestre. En dónde, el radio de la Tierra debe multiplicarse por un factor conocido como factor de radio ficticio de la Tierra, o simplemente Factor K , el cual está definido como:

$$K = \frac{157}{157 + \Delta N}, \quad (3)$$

dónde, ΔN es el gradiente vertical del co-índice en la capa inferior de la troposfera.

4) *Propagación por Difracción:* Cuando la señal se encuentra con un obstáculo en su trayectoria es posible suponer la existencia de una fuente de ondas secundarias en el punto incidente, la cual replica la onda original pero con una notable atenuación. Por lo que, la señal radioeléctrica procedente de la antena transmisora continúa presente aun detrás de los obstáculos, este fenómeno es conocido como difracción de las ondas y es el fenómeno que mas afecta a la propagación de las señales radioeléctricas.

El cálculo teórico de la pérdida en exceso debida a la difracción en los obstáculos del terreno es muy complejo. Dentro de la herramienta, se han implementado procedimientos simplificados que proporcionan un grado de exactitud suficiente, basados en la recomendación UIT-R P.526. Idealizando la forma de los obstáculos a aristas agudas o cuñas de espesor despreciable, esto debido a la complejidad computacional para implementar otros métodos más exactos [13].

5) *Métodos Empíricos de Predicción de Propagación:* Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica de propagación en cualquier punto en torno a una BS. Son de utilización sencilla y su exactitud puede ser mejorada modificando parámetros teniendo en cuenta medidas de campo. La herramienta presentada en este documento implementa los métodos empíricos y semi-empíricos más utilizados en la banda de frecuencias UHF (banda que utiliza SigFox para sus comunicaciones), propuestos para ser utilizados en escenarios rurales y urbanos, tales como:

- Modelo de Propagación de Egli.
- Modelo de Propagación de Lee.
- Modelo de Propagación de Okumura Hata.
- Modelo de Propagación de Erceg SUI.
- Modelo de Propagación ECC 33.
- Modelo de Propagación de Ericsson.
- Modelo de Propagación Walfish Ikegami.
- Modelo de Propagación Xia Bertoni.

IV. FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta de estimación de cobertura radioeléctrica presentada en este documento, permite realizar dos procesos

de planificación radio. El primer proceso consiste en la creación de perfiles de terreno entre una BS de SigFox y un dispositivo IoT, lo que permite al usuario establecer radioenlaces punto a punto y/o analizar puntos críticos de cobertura. El segundo proceso consiste en la creación de mapas de cobertura teóricos alrededor de una BS de SigFox, lo que permite al usuario visualizar el área geográfica en donde puede desplegar los servicios de SigFox. Los procesos están diseñados para funcionar tanto en escenarios rurales como urbanos y están implementados dentro la plataforma *software* QGIS.

A. Generación de Perfiles del Terreno

Proceso que permite la representación de perfiles de terreno entre un dispositivo IoT y una BS de SigFox a partir de la información geográfica cargada por el usuario. Este proceso permite determinar obstáculos existentes en el radioenlace y calcular mediante principios básicos de propagación, el nivel de potencia en recepción. La Figura 3 muestra un gráfico de perfil de terreno rural entre dos puntos usando esta herramienta.

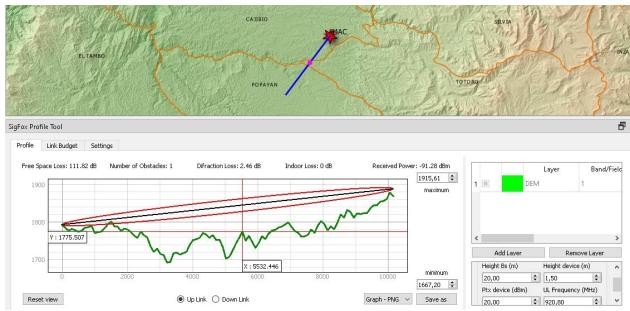


Fig. 3. Gráfico de un perfil rural entre un dispositivo IoT y una BS de SigFox ubicada en el departamento del Cauca (representada mediante una estrella de color rojo).

La herramienta también permite realizar perfiles urbanos entre un dispositivo IoT y una BS de SigFox, únicamente adicionando información vectorial de edificios a la misma. La Figura 4 muestra el gráfico de un perfil urbano utilizando información vectorial de edificios de la ciudad de Popayán.

En las Figuras 3 y 4 se visualizan los resultados más importantes correspondientes a los cálculos de pérdidas de propagación, tales como: número de obstáculos, pérdidas en exceso debidas a difracción, pérdidas en interiores (cuando el dispositivo se encuentra ubicado en el interior de un edificio) y principalmente el nivel de potencia obtenido en recepción. Adicionalmente la herramienta permite modificar los parámetros radioeléctricos más importantes del radioenlace, tales como: altura de la antena de la BS, altura a la que está ubicado el dispositivo, frecuencia de operación del sistema, parámetros utilizados en el balance del enlace (Potencia Efectiva Radiada Isotrópicamente (PIRE), ganancia en recepción, sensibilidad de los equipos), modelo de propagación, etc.

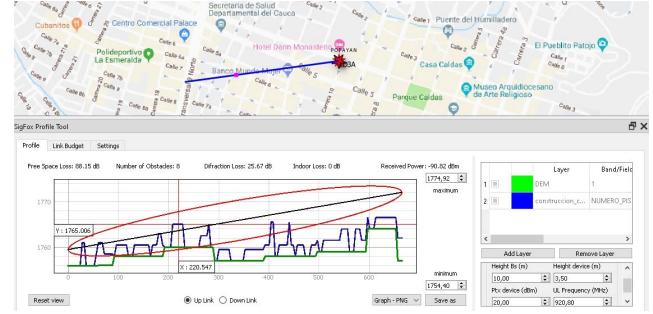


Fig. 4. Gráfico de un perfil urbano entre un dispositivo IoT y una BS de SigFox ubicada en la ciudad de Popayán (representada mediante una estrella de color rojo).

B. Generación de Zonas de Cobertura

La herramienta de predicción de cobertura permite obtener mapas de cobertura teórica en torno a las BSs de SigFox a partir de la información geográfica cargada por el usuario y parámetros radioeléctricos particulares de las BSs y los dispositivos IoT asociados. El cálculo se realiza utilizando diferentes modelos de propagación. La cobertura se estima utilizando parámetros de transmisión del dispositivo IoT (debido a que es el que transmite la mayor parte del tiempo) y se visualiza como la cobertura brindada por la BS. La Figura 5 muestra un gráfico de cobertura realizado por la herramienta para una BS de SigFox ubicada en una zona rural del departamento del Cauca.

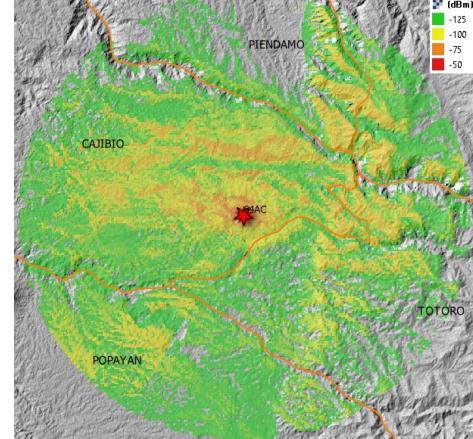


Fig. 5. Gráfico de una cobertura rural para una BS ubicada en el departamento del Cauca.

El cálculo de la potencia recibida mostrada en la Figura 5 se realiza creando perfiles de terreno (ver subsección IV-A) para cada uno de los píxeles que componen al DEM, dentro de un radio de cobertura (máx 30 Km). Por lo que, la definición de los resultados obtenidos dependerá de la resolución de la información geográfica de terreno cargada a la herramienta (mín. 100 m de resolución). Por otro lado, la herramienta también permite obtener mapas de cobertura urbana a partir de un DEM y de información vectorial de edificios. La Figura 6 muestra un gráfico de cobertura realizado por la herramienta

para una BS de SigFox ubicada en la ciudad de Santiago de Cali (Colombia).

Sin embargo, el proceso para obtener los resultados de la Figura 6 es diferente al presentado en la creación de zonas de cobertura rurales. Este nuevo proceso consiste en trazar radiales desde la BS de SigFox en distintas direcciones acimutales (máx. 36 radiales), dentro de un radio de cobertura definido por el usuario (máx. 3 Km). Para cada radial se calcula el nivel de potencia en recepción a distancias equidistantes (mín. 10 m), haciendo uso de la herramienta de perfil de terreno (ver subsección IV-A).

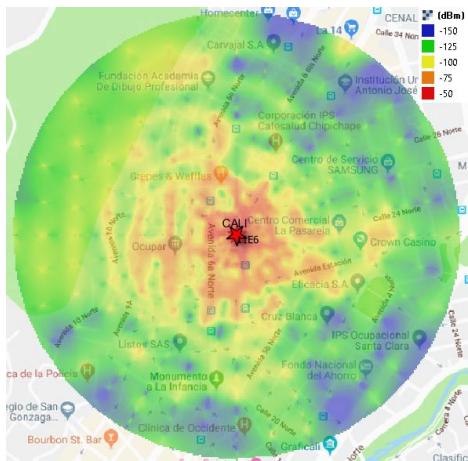


Fig. 6. Gráfico de una cobertura urbana para una BS ubicada en la ciudad de Santiago de Cali.

V. PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de analizar la diferencia entre los resultados teóricos calculados por la herramienta con medidas reales obtenidas en campo. Se realiza una recopilación de mediciones alrededor de una BS ubicada en el Edificio el Ariete de la ciudad de Popayán, la cual usa una antena omnidireccional ubicada a 12 m de altura sobre el piso, con una ganancia de 5 dBi y una sensibilidad de -134 dBm. El dispositivo transmisor que se utiliza para este propósito es conocido como Suntech ST730, el cual permite obtener la posición geográfica de cualquier objeto (incluido personas) con una precisión de hasta 2.5 m [14]. El dispositivo se ubica a 1.5 m de altura sobre el suelo, transmitiendo a 22 dBm, alrededor de los 920 MHz, con una ganancia de antena de -0.01 dBi. La Figura 7 muestra un total de 40 puntos alrededor de la BS elegidos para realizar este experimento. Cada uno de estos puntos representa las medidas del nivel de potencia con el que llegan los mensajes transmitidos por el dispositivo Suntech ST370 a la BS.

En la Figura 8 se presenta un gráfico comparativo entre los valores calculados por la herramienta (usando los modelos de la subsección III-C5) y valores reales medidos, en cada uno de los puntos de la Figura 7. Se observa en la Figura 8 como los modelos siguen el mismo comportamiento de las muestras tomadas en campo, por lo que la herramienta modela el terreno y los obstáculos circundantes de forma concordante con la realidad.

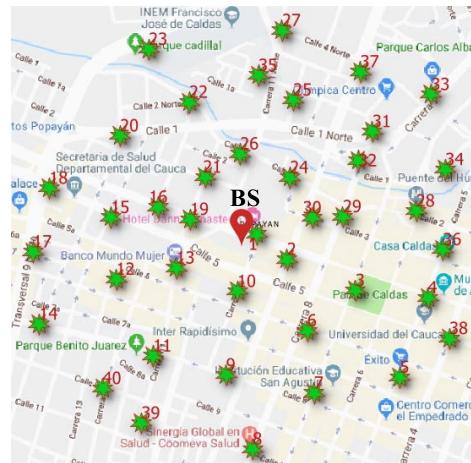


Fig. 7. Puntos donde se realizaron mediciones alrededor de una BS de SigFox.

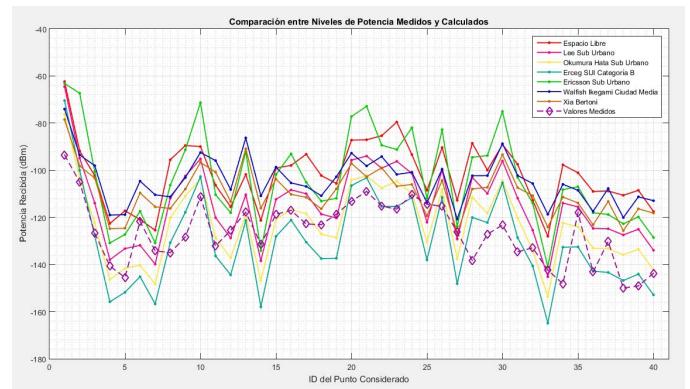


Fig. 8. Comparación entre niveles de potencia medida en campo y niveles de potencia calculados por la herramienta.

Sin embargo, cada modelo difiere en sus niveles de potencia con respecto a las medidas obtenidas en campo. Por lo que se adicionan a manera de ensayo y error factores de corrección a los resultados de los modelos de propagación presentes en la Figura 8. La Figura 9 muestra los resultados al agregar 12, 3, -4, 21 y 17 dB a los modelos principales mencionados en la subsección III-C5.

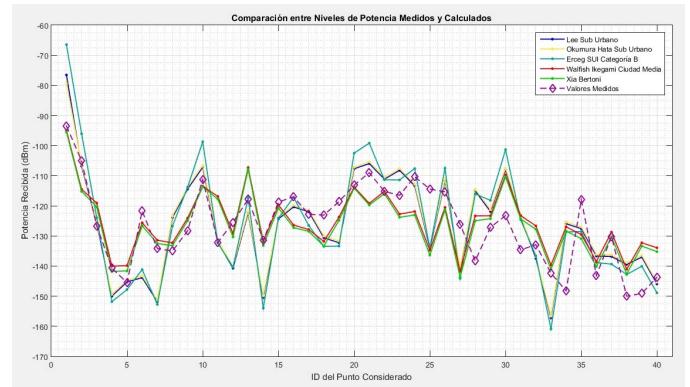


Fig. 9. Comparación entre modelos de propagación a los cuales se les han agregado factores de corrección

A los datos de la Figura 9, se le realizan análisis estadísticos generales, que permiten determinar cuál es el modelo de propagación que se adapta mejor a los resultados obtenidos experimentalmente. Se utiliza el criterio de Error Medio Absoluto (MAE, *Mean Absolute Error*) y el criterio de Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, *Root Mean Square Error*), los cuales permiten estimar de mejor manera que tan cercana es la predicción hecha por un modelo teórico al resultado real obtenido en la práctica [15].

El MAE RMSE se expresan matemáticamente como:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x - y|, \quad (4)$$

$$RMAE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x - y]^2}, \quad (5)$$

dónde, N es el numero de mediciones realizadas en campo, x es el valor medido en la practica en el punto i y y es el valor teórico calculado por la herramienta en el punto i .

En la Tabla I se resumen los valores de MAE Y RMSE calculados para cada uno de los modelos de propagación presentes en la Figura 9.

	Lee	Okumura Hata	Erceg SUI	Walfish Ikegami	Xia Bertoni
MAE(dB)	9.34	9.28	10.65	7.42	7.35
RMAE(dB)	11.47	11.34	12.75	9.26	9.24

Tabla I

Valores de MAE Y RMSE calculados para los modelos de propagación a los cuales se les ha agregado factores de corrección.

Según los resultados de la Tabla I, el modelo de propagación con menor error después de haber adicionado factores de corrección, es el modelo de Xia-Bertoni, con una diferencia media de 9.24 dB respecto a los datos obtenidos en campo, seguido de los modelos de propagación: Walfish-Ikegami (9.26 dB) y Okumura-Hata (11.34 dB). Por lo que este modelo puede ser aplicable en escenarios similares al del escenario de pruebas considerado de la ciudad de Popayán.

Sin embargo, no es posible concluir un modelo para una determinada ciudad solo basándose en mediciones efectuadas en un único escenario de pruebas. Por lo que para un análisis correcto del comportamiento de los modelos de propagación en una región o país, conviene efectuar un número mayor de mediciones en un numero mayor de BSs.

VI. CONCLUSIONES

La herramienta *software* de estimación de cobertura radioeléctrica implementada en el presente documento permite al usuario establecer radioenlaces punto a punto y/o obtener mapas de cobertura teóricos alrededor de las BSs de SigFox, considerando en el proceso la mayor cantidad posible de información geográfica, lo que permite a los operadores de SigFox obtener una mejor estimación de cobertura en

escenarios complejos. La herramienta es modular, escalable y de fácil manejo, de forma que el usuario puede adicionar nuevas funcionalidades y métodos de cálculo de ser necesario. Proporcionando una visualización clara de los datos ingresados y de los resultados obtenidos. Todo esto con la ventaja de que al tratarse de un *software* libre y de código abierto puede ser distribuido y modificado libremente.

Por otro lado, la comparación de los datos teóricos obtenidos mediante la herramienta con las medidas reales realizadas en campo, permite garantizar un primer grado de confiabilidad. Sin embargo, los resultados obtenidos corresponden a un solo escenario de pruebas particular y no reflejan el comportamiento general de los modelos de propagación. Por lo que, conviene considerar un número mayor de BSs y efectuar igualmente un número mayor de mediciones para cada escenario de estudio, dónde es importante tener en cuenta que las zonas elegidas representen las condiciones de propagación más típicas de la región de interés (urbana/suburbana, densidad de vegetación, irregularidades del terreno, etc.).

REFERENCIAS

- [1] O. Vermesan and P. Friess, *Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems*. River publishers, 2013.
- [2] ———, *Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment*. River publishers, 2014.
- [3] KeySight Technologies, “The Menu at the IoT Café : A Guide to IoT Wireless Technologies,” *KeySight*, 2017.
- [4] J. P. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin, “IoT: The era of LPWAN is starting now,” *European Solid-State Circuits Conference*, pp. 25–30, Sep. 2016.
- [5] WND Group, “Wnd colombia sigfox operator for colombia,” Accessed April 26, 2019. [Online]. Available: <https://www.wndgroup.io/colombia/>
- [6] SIGFOX, “Sigfox Technical Overview,” vol. 1, p. 26, May. 2017.
- [7] A. Lavric, A. I. Petriaru, and V. Popa, “Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis under Large-Scale, High-Density Conditions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35 816–35 825, Mar. 2019.
- [8] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*, 2014.
- [9] SIGFOX, “Sigfox cloud integration,” Accessed May 15, 2019. [Online]. Available: <https://build.sigfox.com/backend-callbacks-and-api/>
- [10] J. M. Hernando Rábanos, *Transmisión por radio*. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Aráces, 2008.
- [11] ———, *Comunicaciones Móviles*. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Aráces, 2015.
- [12] V. S. Anusha, G. K. Nithya, and S. N. Rao, “A comprehensive survey of electromagnetic propagation models,” *ICCS 2017*, pp. 1457–1462, Apr. 2018.
- [13] ITU-R, “Propagation by diffraction. ITU-R P.526,” *P Series Radiowave propagation*, vol. 14, Jan. 2018.
- [14] Suntech, “ST730 Product Description,” *User Manual*, pp. 1–10, 2017.
- [15] T. Chai and R. R. Draxler, “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) -Arguments against avoiding RMSE in the literature,” *Geoscientific Model Development*, vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250, 2014.