

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RED DE  
COMUNICACIÓN DE SENSORES UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE RADIOS DE  
LARGO ALCANCE**

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**ARIAS ARGUETA, ERNESTO ALONSO**

**OROZCO MEJÍA, DAVID ISAÍ**

**DOCENTE ASESOR:**

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR, MAYO DE 2024**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

**MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA**

**SECRETARIO GENERAL:**

**ING. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

**ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

**SECRETARIO:**

**ARQ. RAÚL ALEXANDER FABÍAN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR INTERINO:**

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RED DE  
COMUNICACIÓN DE SENSORES UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE RADIOS DE  
LARGO ALCANCE**

Presentado por:

**ARIAS ARGUETA, ERNESTO ALONSO**

**OROZCO MEJÍA, DAVID ISAÍ**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

SAN SALVADOR, MAYO DE 2024

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por guiar cada uno de mis pasos, por darme la fortaleza, la perseverancia, la paciencia y la sabiduría para poder superar cada uno de los obstáculos que he tenido que atravesar a lo largo de mi vida para llegar a este punto.

Agradezco profundamente a mi madre y a mi padre, Violeta Argueta de Arias y Calixto Arias, por ser mis pilares fundamentales, por ser siempre ese soporte con el puedo contar en todo momento, de quienes nunca me hizo falta un consejo, palabras de apoyo, un hombro donde llorar y sobre todo su amor. Son mi mayor ejemplo de fortaleza, lucha y entrega, pero sobre todo de vida.

A mis queridos hermanos, Alice Violeta y Mario José, quienes son mis mejores amigos y con quienes puedo contar siempre, con quienes he compartido cada momento de mi vida y quienes hacen mi vida realmente bonita a pesar de que no sea siempre todo bonito. Aprecio de sobre manera las pláticas, los consejos, las risas, los llantos y cada cosa que hemos vivido juntos.

Quiero agradecer además a Nicole Domínguez, mi novia y confidente, compañera de mil batallas, quien me ha extendido su mano en cada momento, quien no me ha dejado solo a pesar de lo duro del proceso, quien siempre tiene las palabras correctas para animarme y seguir adelante.

A mi tío Manuel Arias, a quien le debo una segunda oportunidad de vida, un hombre al que le tengo mucha admiración y a quien tengo en una altísima estima por su sacrificio. Asimismo, al Dr. Ruiz Rodas, a quien considero parte de mi familia y ha sido fundamental en mi vida desde que lo conocí.

A mi primo Vladimir, que ha sido como un hermano desde siempre y cuyo aprecio he sentido siempre en cada reto que se ha presentado, donde él ha estado siempre presente con mil y un consejos y chistes para cambiar el panorama.

Quiero mencionar también a mis abuelos, Papá Chilo, Mamá Alicia y Mamá Conchita por todos sus consejos y apoyo.

Aprecio todo el apoyo brindado por todo el personal docente y administrativo de la EIE. Especialmente al ing. Werner Meléndez, Niña Reinita y Juancito, con quienes pude convivir mucho tiempo y pude aprender mucho de ellos.

Agradecimientos especiales a los ingenieros Diego Escobar, Lizardo Arias, Isaías Morales y Gerardo Guerrero por su participación en el proceso de investigación y desarrollo de este proyecto.

Y finalmente a todos los amigos y compañeros que hice a lo largo de toda mi vida, mencionando especialmente a: Julio, Pablo, Berrios, Alejandra, Arnoldo, Rodrigo, Cecilio, Eduardo, Krissia, Kevin y Fátima. Quienes me han ayudado a crecer y ser mejor.

**ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA**

## **AGRADECIMIENTOS**

El poder llegar hasta este momento en que una vez lo sentí tan lejano, difícil e imposible sin duda alguna es una gran alegría y gozo.

Pero no sería posible sin el apoyo de personas que estuvieron en mi camino y que me ayudaron a culminar este viaje.

Amigos que me daban ray los fines de semana cuando regresaba al pupilaje a comenzar una semana más, amigos y personas que me dieron la oportunidad de alquilar un cuarto para mi estancia durante la semana.

Amigos que conocí a lo largo de mi trayectoria que me ayudaron a estudiar y pasar buenos momentos que disfrute y que me sería imposible nombrarlos a todos.

Sin duda alguna mi mayor agradecimiento es con Dios y con mi familia.

Mi padre que siempre me ha apoyado incondicionalmente, haciendo sacrificios para darme su apoyo económico en todos mis gastos que tuve por el cual estoy eternamente agradecido y es mi mayor herencia que me pudo dar, mis estudios.

Mi madre que con su amor incondicional siempre ha estado orando por mi bienestar y me ha sostenido con sus oraciones, sus atenciones y con muchos sacrificios el cual estoy eternamente agradecido.

Mis hermanos que siempre me dieron ánimos y su apoyo incondicional para obtener este logro.

Mi alma mater, docentes y personal que me dieron sus conocimientos y me formaron para poner iniciar mi viaje en el mundo laboral.

No yo sino Cristo en mí el que hace posible lo imposible y que me va formando y moldeando y que algún día volveré a leer esto y diré “hasta aquí nos ayudó Jehová”.

**DAVID ISAÍ OROZCO MEJÍA**

## NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, martes 30 de abril de 2024, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle  
Director Interino

  
Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

  
Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

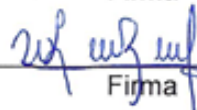
- ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE  
(Docente Asesor)

  
Firma

- Dr. CARLOS EUGENIO MARTINEZ CRUZ

  
Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RED DE COMUNICACIÓN DE  
SENSORES UTILIZANDO TECNOLOGÍA DE RADIOS DE LARGO ALCANCE

A cargo de los Bachilleres:

- ARIAS ARGUETA ERNESTO ALONSO
- OROZCO MEJIA DAVID ISAI

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.7  
( OCHO PUNTO SIETE )

# INDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	12
<i>OBJETIVOS</i> .....	14
<b>GENERALES:</b> .....	14
<b>ESPECÍFICOS:</b> .....	14
<i>ALCANCES</i> .....	15
<i>ANTECEDENTES</i> .....	15
<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i> .....	16
<i>JUSTIFICACIÓN</i> .....	16
<i>CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO.</i> .....	17
<b>INTERNET DE LAS COSAS (IOT)</b> .....	17
<b>ENTORNOS PARA APLICACIONES IOT</b> .....	17
<b>MODELOS DE CONECTIVIDAD</b> .....	18
<b>PLATAFORMAS IOT</b> .....	20
<b>RED DE ÁREA AMPLIA DE BAJA POTENCIA (LPWAN)</b> .....	21
<b>CARACTERÍSTICAS Y BANDAS SIN LICENCIA</b> .....	21
<b>TECNOLOGÍAS EXISTENTES DE LPWAN</b> .....	22
<b>LONG RANGE (LORA)</b> .....	24
HISTORIA .....	24
MODULACIÓN .....	25
REGIONALIZACIÓN .....	26
<b>BANDAS ISM</b> .....	27
ASIGNACIÓN DE BANDAS .....	27
<b>DIFERENCIAS ENTRE LORA Y LORAWAN</b> .....	28
<b>LoRaWAN</b> .....	29
ELEMENTOS EN UNA RED LORAWAN .....	29
CONSIDERACIONES SOBRE LA GATEWAY LoRaWAN .....	30
NETWORK SERVER .....	30
<b>VENTAJAS DE UTILIZAR LoRaWAN</b> .....	31
<b>DESVENTAJAS DE LoRaWAN</b> .....	32
<b>ALGUNOS CAMPOS DE APLICACIÓN PARA DESARROLLO DE REDES LORA</b> .....	33
MEDIDORES DE TEMPERATURA .....	33
DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE .....	34

DETECTORES DE HUMO E INCENDIOS.....	37
<b>EJEMPLOS REALES EN LA INDUSTRIA .....</b>	<b>39</b>
ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	39
RASTREO Y LOCALIZACIÓN DE ACTIVOS .....	40
LECTURA DE CONTADORES .....	40
<b>COMPATIBILIDAD CON OTRAS TECNOLOGÍAS.....</b>	<b>41</b>
CONEXIÓN 5G.....	41
LTE-M .....	41
WIFI.....	42
TECNOLOGÍA SATELITAL .....	42
EJEMPLO DE APLICACIÓN: LINK ONE -LTE-M/NB-IOT/LORAWAN .....	43
<b>LEYES Y NORMATIVA APLICABLES .....</b>	<b>44</b>
NORMAS INTERNACIONALES .....	44
LEYES EN EL SALVADOR .....	50
<b>ESTUDIO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN.....</b>	<b>51</b>
MODELO DE FRISS .....	51
MODELO DE DOS RAYOS.....	52
MODELO OKUMURA.....	52
MODELO OKUMARA HATA.....	52
MODELO COST 231 (WALFISCH-IKEGAMI).....	53
<b><i>CAPÍTULO II - SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS Y DISPOSITIVOS PARA RED</i></b>	
<b><i>LORAWAN .....</i></b>	<b><i>56</i></b>
<b>DISEÑO DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>56</b>
COMPARATIVA ENTRE NODOS LORAWAN .....	56
COMPARATIVA ENTRE GATEWAYS .....	59
SENSORES A UTILIZAR .....	61
COMPONENTES ADICIONALES .....	65
SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS PARA PROTOTIPO .....	65
<b>COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES DE SIMULACIÓN DE COBERTURA .....</b>	<b>65</b>
RADIO MOBILE .....	65
XIRIO .....	66
TOWERCOVERAGE.....	66
CLOUD RF.....	67
PRUEBAS DE USO DE SOFTWARE DE SIMULADORES DE COBERTURA.....	67
SÍNTESIS DE LA PRUEBA DE SIMULADORES.....	97
OPCIONES ADICIONALES DE SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE COBERTURA .....	97
<b>ANALIZADOR DE ESPECTRO RSA306B .....</b>	<b>101</b>
<b>SOFTWARE EMPLEADO PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>103</b>
<b>PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ANTENAS LORA ....</b>	<b>104</b>
ANTENA 1 .....	105
ANTENA 2 .....	108
ANTENA 3 .....	111
ANTENA 4.....	113

DISCUSIÓN DE RESULTADOS: .....	116
<b><i>CAPÍTULO III - ESTUDIO DE PREDICCIÓN DE COBERTURA.</i></b> .....	<b>117</b>
<b>ANÁLISIS DE COBERTURA POR MODELO MATEMÁTICO.</b> .....	<b>117</b>
APLICACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN UIT R P.833-2 .....	119
<b>ANÁLISIS DE COBERTURA POR INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN</b> .....	<b>121</b>
DEFINICIÓN DE LA ZONA DE MEDICIÓN .....	121
PUNTOS DE PRUEBA .....	122
GEOLOCALIZACIÓN .....	123
SELECCIÓN DEL RANGO DE FRECUENCIAS DE MEDICIÓN .....	123
PROCESO DE MEDICIÓN .....	125
<b>ANÁLISIS DE COBERTURA POR SIMULACIÓN DE SOFTWARE.</b> .....	<b>146</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE COBERTURA.</b> .....	<b>149</b>
<b>SÍNTESIS DE LA COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS</b> .....	<b>156</b>
<b><i>CAPITULO IV: PROPUESTA DE DISEÑO DE RED EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR</i></b> .....	<b>158</b>
<b>DEFINICIÓN DE PUNTOS Y COORDENADAS</b> .....	<b>158</b>
COORDENADAS DE GATEWAYS .....	158
GEOLOCALIZACIÓN DE GATEWAYS .....	159
COORDENADAS DE NODOS DETECTORES DE GAS Y HUMO MQ-2 .....	163
GEOLOCALIZACIÓN DE NODOS DETECTORES DE GAS Y HUMO MQ-2 .....	164
COORDENADAS DE NODOS DETECTORES DE CALIDAD DE AIRE MQ-135 .....	169
GEOLOCALIZACIÓN DE NODOS DETECTORES DE CALIDAD DE AIRE MQ-135 .....	169
COORDENADAS DE NODOS DETECTORES DE TEMPERATURA GY906 .....	171
GEOLOCALIZACIÓN DE NODOS DETECTORES DE TEMPERATURA GY906 .....	172
<b>PRESUPUESTO DE RED</b> .....	<b>174</b>
<b><i>CAPÍTULO V - DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE RED.</i></b> .....	<b>175</b>
<b>ARQUITECTURA DEL SISTEMA</b> .....	<b>175</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE NODOS LORA</b> .....	<b>176</b>
<b>CONECTIVIDAD PUNTO A PUNTO LORA</b> .....	<b>178</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE GATEWAY LORA</b> .....	<b>179</b>
<b>DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE API MQTT</b> .....	<b>181</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN Y UBICACIÓN DE LOS NODOS Y GATEWAY</b> .....	<b>184</b>
MEDICIÓN 1 .....	186
MEDICIÓN 2 .....	187
MEDICIÓN 3 .....	188
MEDICIÓN 4 .....	189
MEDICIÓN 5 .....	190
<b><i>CAPITULO VI: CONCLUSIONES.</i></b> .....	<b>193</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>194</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>200</b>
<b>ANEXO A: CÓDIGOS IMPLEMENTADOS.....</b>	<b>200</b>
CÓDIGO DE GEO LOCALIZADOR .....	200
CÓDIGO TRANSMISOR PARA ANÁLISIS DE COBERTURA .....	201
CÓDIGO DE PLACA RECEPTORA PARA ANÁLISIS DE COBERTURA .....	203
CÓDIGO DE RECEPTOR LORA PARA PRUEBA DE PROTOTIPO .....	206
CÓDIGO DEL SENSOR MQ135.....	210
CÓDIGO DEL SENSOR GY906.....	213
<b>ANEXO B: DATASHEETS .....</b>	<b>215</b>
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PLACAS TTGO ESP32 V1.0.....	215
DATASHEET CHIP LORA SX1276 .....	216
DATASHEET SENSOR MQ-135 .....	217
DATASHEET SENSOR MQ-2.....	219
DATASHEET    SENSOR GY906.....	221

## INTRODUCCIÓN

En las redes de internet de las cosas o redes IoT, los organismos normalizadores y empresas del sector han definido diversas bandas de radio frecuencia, protocolos de comunicación, modelos de red y técnicas de optimización de ancho de banda; si bien es cierto, aún no se ha consensuado un modelo de diseño e implementación único, es de prever que la conocida como tecnología LoRa será una de las más importantes dentro de estas aplicaciones. Bajo esta tecnología uno de los componentes importantes que se tiene que considerar, se relaciona con el espectro radioeléctrico, modulaciones, modelado de canal, predicción de cobertura, etc. Un aspecto importante de LoRa se relaciona con el uso libre de diversas bandas de frecuencia, siendo la de 902-928 MHz la que se aplica en América y la misma sirve como un medio de soporte para los diversos sensores IoT que se han desarrollado hasta la fecha; LoRa es una tecnología patentada de propiedad de Semtech Corporation que funciona en bandas de radio reservadas para aplicaciones industriales, científicos y médicos (conocidas como ISM).

Esta tecnología se está expandiendo a un ritmo exponencial, esto se debe a la enorme cantidad de usos y beneficios que aporta y que podría aportar a futuro en la sociedad moderna. Estos usos van desde actividades relacionadas a la agricultura y ganadería, creación de ciudades inteligentes, monitoreo de generación y consumo de energía, hasta actividades enfocadas en salud como el control remoto de signos vitales, etc. Presenta además la ventaja de que implica un costo considerablemente bajo en comparación a otras tecnologías especializadas en la transmisión de datos.

En El Salvador, esta tecnología se encuentra aún en una etapa muy temprana de implementación y ha sido poco explorado, pues su uso se limita casi exclusivamente a pruebas de aplicaciones en la banda ISM (902-928) MHz. A modo de ejemplo de esto, se puede mencionar la instalación de una antena (Gateway) en la colonia San Benito para que las personas que se encuentren dentro de la zona de cobertura puedan hacer pruebas de envío de datos a esta para probar dispositivos. El fin último de este proyecto es motivar a las personas a utilizar esta tecnología. (Ibarra, 2019)

El presente trabajo tiene como finalidad diseñar e implementar un prototipo de red LoRa para la Universidad de El Salvador utilizando hardware de bajo costo y aplicando las consideraciones estipuladas en la normativa correspondiente. La red para proponer será sustentada mediante cálculos teóricos, simulaciones y pruebas de campo con el fin de demostrar la cobertura y funcionalidad de la misma.

El presente estudio busca realizar una evaluación de las condiciones necesarias para poder llevar a cabo la implementación de una red de sensores utilizando tecnología de radios de largo alcance (LoRa) dentro de la Universidad de El Salvador. Para ello, se realiza una

investigación teórica de la terminología asociada al uso de esta tecnología, se realiza un estudio de las recomendaciones y normativas en las que se basa, se indaga acerca de los campos de aplicación en los cuales se han realizado proyectos de este tipo; esto por la parte teórica. Por la parte práctica, se realiza una comparativa entre distintas metodologías posibles para determinar aquella que permita realizar un mejor estudio de cobertura de acuerdo a las características geográficas y el entorno de los espacios dentro de la zona de estudio; para ello, se realizan simulaciones de predicción de cobertura por software, se evalúan los posibles modelos matemáticos y se determina cuál es el más adecuado y finalmente, se realizan mediciones de campo con el analizador de espectro RSA306B de la marca Tektronix.

Posteriormente, con base en la metodología planteada, se determina cuáles son los puntos geográficos adecuados de gateways y nodos para el correcto funcionamiento de la red propuesta y se realiza un presupuesto de construcción de dispositivos.

Finalmente se realiza una muestra del funcionamiento del prototipo a pequeña escala donde se conectan 3 nodos a un gateway central, estos transmiten los datos de sus respectivas mediciones y a través de una página enfocada en proyectos IoT, se muestran los resultados de las mediciones.

## **OBJETIVOS**

### **GENERALES:**

- Aplicar los criterios establecidos en la tecnología LoRa en el diseño de una red de soporte IoT para la Universidad de El Salvador.

### **ESPECÍFICOS:**

- Evaluar las mejores opciones de hardware disponibles en el mercado para la construcción de un prototipo de red de bajo costo.
- Analizar las normativas relacionada a la tecnología LoRa y su aplicación en El Salvador
- Examinar las herramientas de simulación compatibles con LoRa para evaluar el rendimiento del sistema
- Identificar las herramientas matemáticas que se utilizan para el estudio teórico de la tecnología LoRa.
- Evaluar la integración de la tecnología LoRa con otras tecnologías de comunicación inalámbrica.

## ALCANCES

- Seleccionar los puntos de ubicación de los nodos de acceso LoRa, que brinden cobertura a diferentes sensores IoT y con base a estas ubicaciones, elaborar el mapa de cobertura radioeléctrica correspondiente.
- Evaluar el desempeño del prototipo de red propuesto, utilizando herramientas de simulación.
- Comprobar la cobertura real de la predicción teórica mediante mediciones de campo electromagnético obtenidas con analizadores de espectro.
- Implementar un prototipo de red IoT que muestre la viabilidad del diseño propuesto en el presente trabajo.
- Estimar los costos de implementación de una red completa de sensores, para una aplicación en particular al interior de la UES.

## ANTECEDENTES

La tecnología LoRa ha sido propuesta en años recientes, ya que sus inicios se consideran desde 2009 en Francia, cuando Nicolas Sornin y Olivier Sellaer se propusieron desarrollar una tecnología de modulación de baja potencia y largo alcance. En 2010 se une a la investigación François Sforza. Los 3 juntos fundaron la empresa Cycleo. (Bassi, 2019)

Originalmente esta tecnología estaría orientada específicamente a la medición, por ejemplo, agregar capacidades de comunicación inalámbrica para medidores de gas, agua y electricidad.

En mayo de 2010 Semtech adquiere Cycleo y se dedica a mejorar aún más la tecnología y finalizar los chips necesarios para los dispositivos finales y también los gateways que proveen de conectividad a los dispositivos. También se crea el protocolo de red que permite a los dispositivos el acceso al medio (llamado originalmente LoRaMAC), que especificó los formatos de mensaje y las capas de seguridad para las comunicaciones dentro de la red. (Bassi, 2019)

Ya en 2015, 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 a través de la tecnología desarrollada, garantizando la interoperabilidad de los productos y tecnologías. (Zabeu, 2023)

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La implementación de un sistema de sensores IoT requiere de una red que permita la conectividad de cada uno de ellos con un servidor de aplicaciones central, el cual puede tenerse de forma local o virtual (en la nube). Si bien es cierto que en otras regiones del mundo, dichas redes de conexión utilizan infraestructura de proveedores privados o incluso servicios especializados brindados por los operadores de telefonía móvil, en El Salvador, dichas opciones aún no se encuentran disponibles, por lo cual es necesario que dicha red de conexión se implemente por cada usuario adaptándola a sus requerimientos particulares. Es por ello que se hace necesario

## **JUSTIFICACIÓN**

La implementación de un sistema de sensores IoT requiere de una red que permita la conectividad de cada uno de ellos con un servidor de aplicaciones central, el cual puede tenerse de forma local o virtual (en la nube). Si bien es cierto que en otras regiones del mundo, dichas redes de conexión utilizan infraestructura de proveedores privados o incluso servicios especializados brindados por los operadores de telefonía móvil, en El Salvador, dichas opciones aún no se encuentran disponibles, por lo cual es necesario que dicha red de conexión se implemente por cada usuario adaptándola a sus requerimientos particulares. Es por ello que se hace necesario

## **CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO.**

### **INTERNET DE LAS COSAS (IOT)**

La primera vez que se usó el término “Internet de las cosas (IoT)” fue en 1999 por el británico Kevin Ashton el cual utilizó este término para poder describir cómo se conectaba a internet las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) que se utilizaban en las cadenas de suministro para contar y realizar un seguimiento de las mercancías sin necesidad de intervención humana (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015). Hoy en día esa capacidad de conexión a internet se extiende a una variedad de objetos, dispositivos, sensores y artículos de uso diario.

A pesar del crecimiento generado en los últimos años no existe una definición única y universal del internet de las cosas, diferentes grupos como El Consejo de Arquitectura de Internet (IAB), la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Oxford Dictionaries entre otros utilizan diferentes definiciones para describir una visión del significado de IoT y sus atributos más importantes.

Para los propósitos de este trabajo, los términos “internet de las cosas” se refiere a los escenarios en los que la conectividad de red y capacidad de cómputo se extienden a objetos, sensores y artículos de uso diario, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambian y consuman datos con una mínima intervención humana (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015).

### **ENTORNOS PARA APLICACIONES IOT**

Hoy en día son muchas las industrias que consideran el incorporar tecnologías IoT en sus productos, servicios y operaciones, entre ellos se encuentran el sector salud, automotriz, la manufactura, la electrónica de consumo y para el hogar. El informe de McKinsey Global Institute (McKinsey&Company, 2015) reporta una amplia variedad de aplicaciones en donde la IoT creará valor para la industria y también para los usuarios, entre los cuales se encuentra (McKinsey&Company, 2015):

- **Cuerpo humano:** Dispositivos unidos al cuerpo humano o colocados dentro del mismo para monitorear y mantener la salud y el bienestar de las personas.
- **Hogar:** Controladores y sistemas de seguridad para el hogar. Como por ejemplo medición de temperatura, y sensores de movimiento.
- **Puntos de venta:** Tiendas, bancos, restaurantes, estadios, cualquier lugar donde los consumidores consideren y compren; sistemas de auto pago, ofertas en compras presenciales, optimización del inventario.
- **Oficinas:** Gestión de la energía y la seguridad en los edificios de oficinas; mejora de la productividad, incluso para los empleados móviles
- **Fábricas:** Lugares con rutinas de trabajo repetitivas, como hospitales y granjas; eficiencia operativa, optimización del uso de los equipos y el inventario.

- Ciudades: Espacios públicos e infraestructura en entornos urbanos; sistemas de control adaptativo de tráfico, contadores inteligentes, monitoreo ambiental, gestión de recursos.

## MODELOS DE CONECTIVIDAD

La conectividad IoT presenta diferentes modelos de conectividad. La junta de Arquitectura de Internet presenta cuatro modelos de conexión entre los cuales están: Device to Device (dispositivo a dispositivo), Device to Cloud (dispositivo a la nube), Device to gateway (dispositivo a puerta de enlace) y Back End Sharing (intercambio de datos a través del back end) (Telefónica Tech, 2020). Estos se describen a continuación.

**Comunicación Dispositivo a dispositivo:** este modelo es muy utilizado en aplicaciones que manejan pequeños paquetes de datos para la comunicación entre dispositivos, generalmente en aplicaciones del hogar. Este modelo presenta dos o más dispositivos que se conectan y se comunican entre sí, sin un servidor de aplicaciones intermediario, utilizando redes IP o la internet. para establecer comunicación entre los dispositivos se utilizan protocolos como Bluetooth, Z-Wave o ZigBee.



*Figura 1: Ejemplo de comunicación dispositivo a dispositivo Ejemplo de comunicación dispositivo a dispositivo.*

**Comunicación de dispositivo a la nube:** Este modelo de comunicación el dispositivo IoT se conecta a un proveedor de servicios de aplicaciones en la nube por conexión Wi-Fi para intercambiar datos y controlar el tráfico de mensajes. Uno de los dispositivos electrónicos que ocupa este modelo es el caso de un “termostato inteligente” este dispositivo transmite los datos a la nube para ser visualizados en tiempo real y de forma remota realizar modificaciones.

sucede lo mismo con la tecnología SmartTV de Samsung el televisor usa una conexión a internet para transmitir información de su reconocimiento de voz de la televisión.

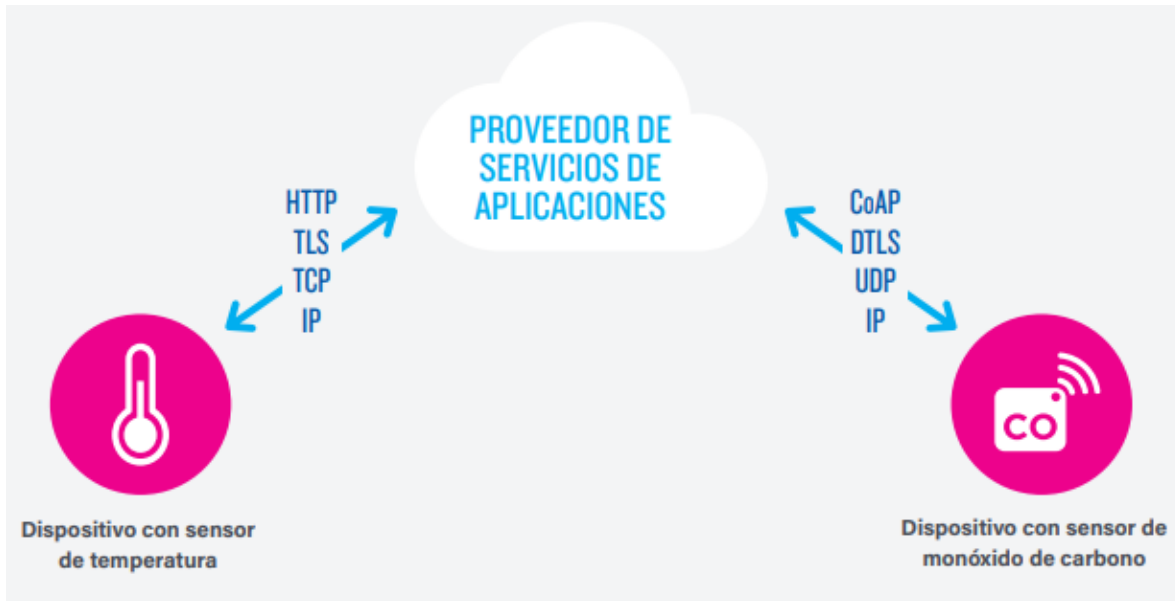


Figura 2: Modelo de comunicación dispositivo a la nube.

**Modelo dispositivo a puerta de enlace:** este modelo necesita una puerta de enlace de capa de aplicación (ALG) como una forma de llegar a un servicio en la nube. Esto significa que hay un software de aplicación en un dispositivo de puerta de enlace local el cual sirve como intermediario entre el dispositivo y el servicio en la nube. En muchas ocasiones la puerta de enlace local es un teléfono móvil con una aplicación que permite comunicarse con un dispositivo externo y transmitir esos datos a un servicio en la nube.

Un claro ejemplo de ello es un dispositivo reloj que permite llevar un registro de la actividad física. Muchos de estos dispositivos no pueden conectarse directamente a un servicio en la nube por lo que muchas veces utilizan una aplicación para teléfono inteligente como puerta de enlace intermediaria.

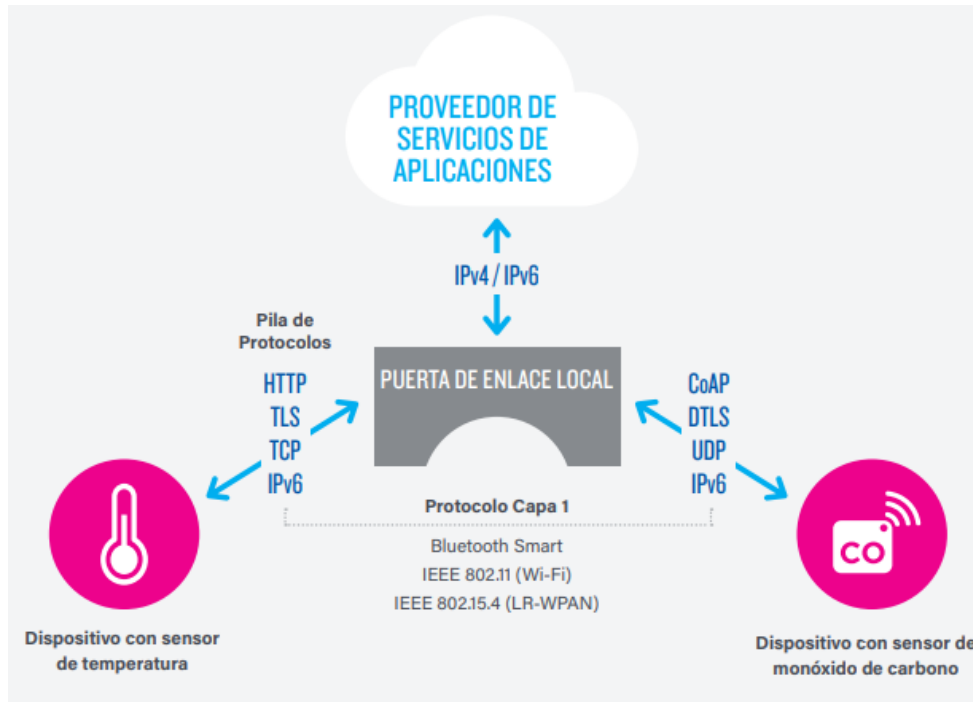


Figura 3: modelo de comunicación de dispositivo a puerta de enlace.

**Modelo de intercambio de datos a través del back-end:** este modelo se refiere a una arquitectura de comunicación que el usuario o los usuarios exporten y puedan analizar datos de objetos inteligentes de un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes. Este modelo permite que terceros accedan a los datos subidos a los sensores del usuario principal.

Un ejemplo de este modelo sería en un complejo de oficinas en el cual un usuario le interesa consolidar y analizar los datos de consumo de energía en las oficinas y otros servicios que miden los diferentes sensores en las oficinas, al usar una arquitectura back-end la empresa puede acceder a los datos en la nube que registra cada uno de los sensores instalados en el edificio.

## PLATAFORMAS IOT

Existen muchas plataformas que permiten la interacción entre dispositivos y el modelo de comunicación que emplee. La plataforma utilizada puede variar desde recibir datos y almacenarlos en una interfaz estándar hasta poder realizar predicciones, aprendizaje, inteligencia de negocios entre muchos más.

La plataforma IOT debe ser capaz de brindar la cobertura de los siguientes servicios (thethingsnetwork, s.f.)

- Conexión fácil y rápida de los recursos de IoT
- Almacenamiento y uso de datos recibidos

- Fácil acceso y uso de los recursos global de IoT y datos detectados

Las plataformas más utilizadas son The Things Network (TTN) y UBIDOTS debido a su gran conectividad con variedad de nodos y su interfaz amigable.

The Things Network (TTN) es una plataforma de código abierto el cual decodifica los datos de los gateway y los transmite a aplicación de terceros. Ofrece la integración de lenguajes HTTP y MQTT y una serie de APIs en distintos lenguajes como: Go, Java, Node-RED y Node.js, con las cuales se puede construir una aplicación end-to-end, mediante el uso de varios nodos, gateway y servidores TTN (thethingsnetwork, s.f.). Esta plataforma es miembro de Lora Alliance por lo cual la hace muy útil al usarla con la tecnología LoRaWan.

La plataforma de UBIDOTS envía datos a la nube desde cualquier dispositivo conectado a internet, se pueden configurar acciones de respuesta y alertas basados en datos en tiempo real a través de herramientas visuales. Ubidots ofrece una API REST que admite HTTP y HTTPS. (thethingsnetwork, s.f.)

## **RED DE ÁREA AMPLIA DE BAJA POTENCIA (LPWAN)**

Las redes LPWAN es una tecnología de comunicación inalámbrica (Becolve Digital, 2020) de muy bajo consumo energético y a distancias largas, permitiendo la transmisión de datos de redes de sensores inalámbricos hacia una estación base/Gateway. Esta tecnología surge de las deficiencias de las tecnologías de comunicación como el Bluetooth que está diseñado sólo para aplicaciones de corto alcance y el Wi-Fi que son demasiado costosas y consumen mucha energía para las grandes redes de sensores IoT que por lo general funcionan con baterías.

Las tecnologías de comunicación inalámbrica se mueven en 3 ejes: el consumo energético, alcance y capacidad de transmisión. No existe una tecnología que cubra en su totalidad los 3 ejes, dependiendo de la necesidad así se escoge la tecnología a usar. La red 4G tiene muy buen alcance de cobertura (Becolve Digital, 2020) y un buen data rate pero consume mucha energía en su transmisión por otro lado el Bluetooth tiene muy poco consumo energético posee un buen data rate pero tiene un alcance muy limitado si se desea usar en redes de sensores no sería muy útil.

La tecnología de transmisión inalámbrica LPWAN tiene un muy buen alcance y un consumo bajo de energía, pero posee un limitado número de datos de transmisión se encuentra en el rango de los kbs o Mbs en cada mensaje.

## **CARACTERÍSTICAS Y BANDAS SIN LICENCIA**

Entre las principales ventajas de la red LPWAN se encuentran (Behrtech Co., s.f.):

- **Baja tasa de datos:** como su nombre lo indica es una red de baja potencia por lo cual tiene un número limitado de datos a transmitir que va desde los 10 a 10.000 bytes a una velocidad de 1 Mbps lo cual lo hace perfecto para transmitir datos de una red de sensores y otras aplicaciones con demanda mínima.
- **Largo alcance:** esta tecnología tiene un largo alcance de comunicación llegando a los 10 Kilómetros en zonas urbanas hasta los 15 Kilómetros en entornos rurales además permite la comunicación en lugares remotos como subterráneos y dentro de edificios.
- **Baja potencia:** los sistemas LPWAN al ser de baja potencia optimizan el consumo de energía, llegando a tener una vida útil en baterías de hasta 10 años reduciendo los costos relacionados al mantenimiento energético de los equipos.
- **Bajo costo:** Estos sistemas reducen la complejidad en el diseño del hardware reduciendo significativamente el costo del equipo a usar. Al ser aplicada en una arquitectura estrella proporciona una reducción de costos de infraestructura.

## ↳ TECNOLOGÍAS EXISTENTES DE LPWAN

Actualmente existen tres grandes tecnologías (Becolve Digital, 2020):

**LoRaWAN:** es un estándar que se desarrolla en la modulación de radio LoRa, una característica única de LoRaWAN es que permite el despliegue de redes propias autogestionadas dando apertura a una gran cantidad de posibilidades de servicios IoT de ámbito local para control de áreas pequeñas o medianas permitiendo montar redes en cualquier lugar a costes de mantenimiento bajos.



*Figura 4: Logotipo de la tecnología basada en LPWAN conocida como LoRaWAN.*

**NB-IoT:** Este tipo de tecnologías es ofrecida por las compañías de telecomunicaciones. Actualmente solo opera por proyectos es decir que, si el proyecto es interesante en cuanto a volumen de equipos, la operadora en cuestión (Movistar, Vodafone, Orange entre otros) montará una red LPWAN dedicada a este proyecto.



*Figura 5: Logotipo de la tecnología basada en LPWAN conocida como NB-IoT.*

**Sigfox:** es un operador que se encarga de desplegar infraestructuras por la región. Cualquier persona puede pagar una suscripción y utilizar la red para transmisión de sus datos. Sigfox envía los datos de los usuarios por medio de los nodos los cuales se acceden via API. Esta tecnología envía pocos mensajes al día máximo 1 cada 10 minutos de uplink y solo 4 diarios de downlink y pocos bytes cada uno.



Figura 6: Logotipo de la tecnología basada en LPWAN conocida como sigfox.

Las ventajas y desventajas generales de estas tres tecnologías existentes para LPWAN pueden resumirse en el siguiente cuadro comparativo.

Tabla 1: Cuadro comparativo entre tecnologías LPWAN [6]

<b>Tecnología</b>	<b>LoRa</b>	<b>Sigfox</b>	<b>NB-IoT</b>
<b>/Parámetros</b>			
<b>Rango</b>	5 km (urbano), 20 km (rural)	10 km (urbano), 40 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
<b>Modulación</b>	CSS	BPSK	QPSK
<b>Cobertura</b>	157 dB	153 dB	164 dB
<b>Max. Velocidad de datos</b>	50 kbps	100 bps	250 kbps
<b>Ancho de banda</b>	250 KHz y 125KHz	100 Hz	200 KHz
<b>Potencia Max. Transmitida</b>	14 dB	20 dB	23 dBm
<b>Max. Longitud de carga útil</b>	243 bytes	12 bytes (subida), 8 bytes (bajada)	1600 bytes
<b>Frecuencia</b>	ISM- no licenciado 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz	ISM- no licenciado 868-869 MHZ, 902-928 MHZ.	Licenciado , banda LTE, banda de guarda

<b>Max. Mensajes/día</b>	Sin límites	140 (subida), 4(bajada)	Sin límites
<b>Inmunidad de interferencia</b>	Muy alta	Muy Alta	Baja
<b>Autenticación y cifrado</b>	AES 128 bits	No soportado	Encriptación LTE

Actualmente, en El Salvador el uso de las redes LPWAN es casi inexistente y no se cuenta con una tecnología fuerte que brinde cobertura o soporte a este tipo de redes.

## **LONG RANGE (LORA)**

Se le conoce así a la técnica de modulación basada 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. (Becolve Digital, 2022)

## **HISTORIA**

Esta tecnología comienza a desarrollarse en Francia en el año 2009, cuando Nicolas Sornin y Olivier Seller se proponen crear una tecnología que permitiera una modulación de largo alcance y de baja potencia (Bassi, 2021). La idea surge como una respuesta a diversos problemas presentes en la industria de la medición, ya que lo que se buscaba era facilitar el proceso de comunicación inalámbrica para medidores de gases, líquido, electricidad, etc.

En 2010 se une al proyecto François Sforza, con quien fundaron la empresa Cycleo, la cual fue adquirida en 2012 por Semtech (actual dueña de la patente de la tecnología), la cual contribuyó para mejorar la tecnología al optimizar los dispositivos finales y los gateways que proveen los recursos para que exista conectividad entre estos.

Posteriormente, fue creado el protocolo de red que posibilita el acceso al medio de los dispositivos que fue conocido originalmente como LoRaMAC, el cual, especificó los formatos de mensaje y las capas de seguridad para las comunicaciones dentro de la red.

Finalmente, en 2015 se cambió el nombre del protocolo a LoRaWAN al mismo tiempo que se fundó la actualmente conocida como LoRa Alliance, la cual busca promover la adopción global de la tecnología LoRa y fomentar la interoperabilidad de los diferentes productos y tecnologías asociadas (Bassi, 2021).

## MODULACIÓN

Como se mencionó anteriormente, la tecnología LoRa se basa en la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), la cual es una técnica de modulación de espectro ensanchado que utiliza pulsos chirp modulados en frecuencia lineal de banda ancha para codificar información; y que posee características similares a la modulación Phase Shift Keying (PSK). La tecnología LoRa busca funcionar con el menor consumo de recursos posibles y a su vez, aumentar el rango de comunicación. La modulación CSS se ha utilizado desde hace algunos años, pero su uso ha sido destinado casi exclusivamente a las comunicaciones militares (ITU-T Y.4480, 2021). LoRa es la primera implementación comercial que se le da a este tipo de modulación.

La técnica de modulación CSS depende de ciertos parámetros (Anónimo, LoRaWAN e Internet de las Cosas, 2022) que pueden modificarse y que determinan las propiedades del enlace, estos parámetros son listados a continuación:

- Frecuencia portadora: Define la frecuencia portadora del medio utilizado para la transmisión y recepción.
- 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 sea 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.

Existe una estrecha relación entre el SF, el tamaño del paquete y el ancho de banda, ya que de acuerdo con estos factores se determina el tiempo en el aire (ToA), que es el tiempo que tarda en enviarse un paquete. A continuación, se presenta un cuadro comparativo (Anónimo, LoRaWAN e Internet de las Cosas, 2022) donde se refleja la relación existente entre estos parámetros a distintos factores de propagación:

*Tabla 2: Propiedades de los enlaces LoRa a distintos valores de factor de propagación.*

<b>Factor de propagación</b>	<b>Tasa de transferencia de datos</b>	<b>Velocidad de bits [bits/s]</b>	<b>Rango [km]</b>	<b>Sensibilidad Rx [dBm]</b>	<b>Carga máxima de paquetes [Bytes]</b>
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

## REGIONALIZACIÓN

Las frecuencias utilizadas por LoRa son frecuencias libres no licenciadas y que en su mayoría se utilizan para procesos industriales, científicos y médicos (ISM); es de destacar que cada país o región cuenta con su propia banda de frecuencia asignada de acuerdo con la recomendación ITU-T Y.4480 cuya asignación se muestra a continuación.

*Tabla 3: Frecuencias asignadas para uso LoRa. (ITU-T Y.4480, 2021)*

<b>País o Región</b>	<b>Frecuencias</b>
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

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.

Además, cada país emplea un esquema de frecuencia de sub-banda que sirve para crear canales de transmisión y cada sub-banda se compone de frecuencias denominadas canales. Cada región determina el tiempo que cada dispositivo puede hacer uso de un canal específico al utilizar restricciones sobre el ciclo de trabajo (duty cycle).

## **BANDAS ISM**

Bandas ISM: son bandas de frecuencia reservadas internacionalmente y que no están libres de licencia. Estas pueden ser utilizadas con fines no comerciales y si bien no es necesario pagar para poder usarlas, poseen normas de uso para que coexistan y funcionen lo más eficientemente posible. (Zarate, 2023)

## **ASIGNACIÓN DE BANDAS**

- Estas bandas son determinadas por la International Telecommunication Union (ITU) y los parámetros correspondientes a estas son los siguientes:
- Frecuencia central.
- Frecuencia mínima y máxima (las cuales definen el ancho de banda)
- Región geográfica de disponibilidad.
- Usos permitidos.
- Máxima potencia ERP (effective radiated power), la cual se refiere a la potencia de salida del transmisor, más la ganancia de la antena, menos la atenuación y las pérdidas que existen entre el transmisor y la antena.
- Máximo tiempo de uso o duty cycle. (Zarate, 2023)

## DIFERENCIAS ENTRE LORA Y LORAWAN

LoRa y LoRaWAN se utilizan para referirse a un mismo sistema de comunicación, pero no son lo mismo y es útil saber la diferencia entre estos dos conceptos. En primer lugar, cabe recalcar que el stack de comunicaciones de este protocolo opera en capas donde la capa física (PHY) es utilizada para la transferencia de datos y que esta luego se conectará a la capa de enlace, estableciéndose así el protocolo de envío de datos a los nodos conectados (Moko LoRa, 2021).

LoRa es la capa física que proporciona las técnicas de modulación y demodulación para que los dispositivos o nodos se puedan comunicar a grandes distancias utilizando un bajo consumo de energía. La Función de LoRaWAN será conectar la señal LoRa a la aplicación de servicio, esta controla tanto el protocolo como la arquitectura esto ayuda a determinar la duración de la batería de los nodos, la calidad del servicio, a seguridad e los datos transmitidos, la capacidad de la red y los tipos y variedad de aplicaciones utilizadas. (Moko LoRa, 2021)

En la siguiente imagen se puede observar de manera gráfica las diferentes capas de comunicación que utiliza el protocolo LoRa.



Figura 7: Capas de comunicación OSI.

Esta alianza entre Lora y LoRaWan hace posible la comunicación bidireccional entre nodos siendo de largo alcance y de bajo consumo para una amplia variedad de aplicaciones. En otras palabras, para tener una diferencia bien marcada la diferencia básica sería que LoRa

es la capa física ósea el chip de modulación y LoRaWAN stack de software que se coloca en el chip para controlar toda la red.

## **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 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, de acuerdo con (Bullian & Urbina, 2018), se aplica la siguiente con la siguiente expresión matemática:

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

donde:

$R_b$ : 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 EN UNA RED LORAWAN**

Los puntos más importantes de una red LoRaWAN y su definición (Becolve Digital, 2022) se explican a continuación:

- **Nodos (Endpoints):** Son los dispositivos finales. Estos envían o reciben información a través de LoRaWAN; ejemplos de estos son: sensores, actuadores, trackers.
- **Gateways:** Es el dispositivo al cual se conectan los nodos por LoRaWAN y permite la comunicación de estos con el Network Server.
- **Network Server:** Es el software utilizado para controlar la red y el que define la lógica de comunicaciones entre los nodos y el Gateway, con esto se previene el duplicado de paquetes y delimita el acceso de los dispositivos. El Network Server a veces está embebido en el mismo Gateway, lo que supone el abaratamiento de la solución total y la desventaja es que limita la escalabilidad.
- **Application Server:** Es el software que tratará los datos que se comunican a través de LoRaWAN, este software es completamente independiente de la red LoRaWAN y dependiendo del Network Server podrá comunicar por ejemplo con MQTT, Modbus TCP, API REST, entre otros.

Es importante mencionar que los dispositivos empleados en una red LoRaWAN pueden clasificarse en 3 diferentes tipos de acuerdo a sus características tanto de consumo energético como en el tipo de enlaces que pueden programarse con estos. De acuerdo con esto, pueden clasificarse en dispositivos A, B y C; los cuales serán explicados en el apartado de normativas asociadas a la comunicación LoRA.

## **CONSIDERACIONES SOBRE LA GATEWAY LoRaWAN**

La cantidad de nodos que puede ser conectada a una Gateway depende de (Becolve Digital, 2022):

- Canales simultáneos con los que pueda trabajar la Gateway.
- El tipo de Gateway. Ya que las Gateway full dúplex o half dúplex no pueden realizar las tareas de transmisión y recepción simultáneamente.
- La magnitud de RSSI (Indicador de intensidad de la señal recibida) y la SNR (relación señal ruido).
- La carga de los recursos del Gateway.
- Determinar si la Gateway incluye el network server o no, ya que esto determina la cantidad de datos que se puedan transferir de los nodos LoRaWAN al application server.

## **NETWORK SERVER**

El network server define la escalabilidad y la facilidad de administración de la red LoRaWAN, este puede presentarse de dos formas: centralizada o descentralizada.

## **NETWORK SERVER COMO SERVIDOR DEDICADO (CENTRALIZADO)**

El network server y los gateways se encuentran en servidores independientes, permitiendo una alta escalabilidad de la red LoRaWAN y facilitando la configuración; sin embargo, esto implica que el precio del proyecto se incrementa. Esta configuración es aconsejable para proyectos grandes.

## **NETWORK SERVER EMBEBIDO EN EL GATEWAY (DESCENTRALIZADA)**

El network server se embebe en el Gateway al realizar la configuración de la red LoRaWAN de ese Gateway específicamente, esto supone que el coste de la red LoRaWAN sea más económico y en este caso, el servidor de aplicaciones podrá trabajar con los datos directamente desde la Gateway.

El servidor de aplicación en LoRa y LoRaWAN es la parte que controla todos los payload, siendo estos el conjunto de datos transmitidos fundamentales, es decir, aquellos datos que se obtienen al excluir cabeceras, metadatos, información de control y otros datos que son enviados para facilitar la entrega del mensaje. Este servidor pertenece a la capa de aplicaciones de los dispositivos finales asociados y provee servicio de nivel de aplicación al usuario final. Además de poseer la función de control, también genera todos los payloads de enlace descendente que van hacia los nodos.

Una característica importante de estos es que pueden coexistir múltiples servidores de aplicación conectados a un servidor de red, y un servidor de aplicación puede estar conectado a varios servidores de red.

Un ejemplo de este tipo de servidor es The Things Network, el cual está asociado como LoRa Alliance y puede utilizarse para pruebas. En El Salvador no existe una frecuencia oficial para TTN, sin embargo, como se menciona anteriormente, existe una banda de frecuencias libres en las cuales se puede trabajar con este servidor de forma gratuita.

## **VENTAJAS DE UTILIZAR LoRaWAN**

- La comunicación entre los diferentes dispositivos es posible aún a grandes distancias (entre 15 y 20 km aproximadamente)
- El consumo de energía es mínimo, esto permite que los dispositivos puedan usarse durante años utilizando una sola batería.
- El coste de los dispositivos LoRaWAN es accesible para una gran variedad de proyectos.
- Es escalable y permite la comunicación de miles de dispositivos a través de uno o varios gateways.
- La curva de aprendizaje es rápida.

- La seguridad entre todos los dispositivos conectados a la red es de muy alto nivel, desde los nodos hasta el servidor de aplicaciones.

## DESVENTAJAS DE LoRaWAN

Más que llamarles “desventajas”, se puede emplear el término limitaciones, pues dependiendo de la aplicación que se busque implementar, la tecnología utilizada podría variar drásticamente repercutiendo en factores como el alcance geográfico, el ancho de banda y el consumo de energía. A continuación, se presentan unos gráficos donde se muestra la tecnología adecuada según la distancia a cubrir.

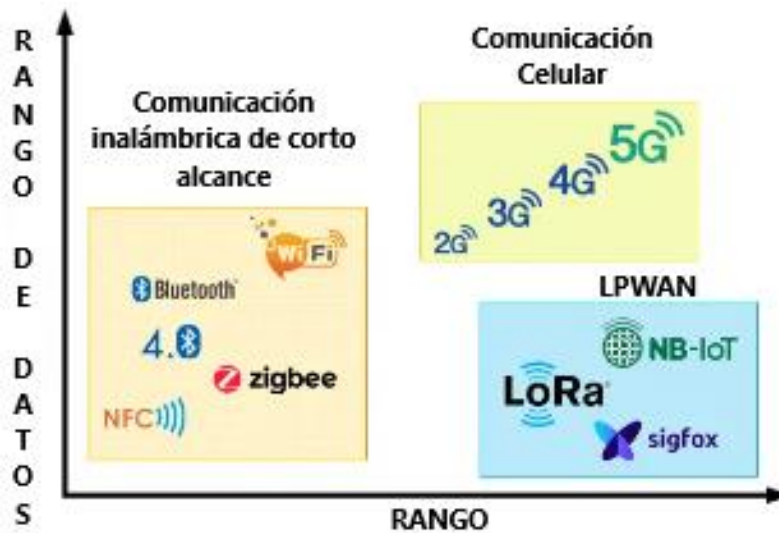


Figura 8: Alcance vs rango de datos de diferentes tecnologías inalámbricas.

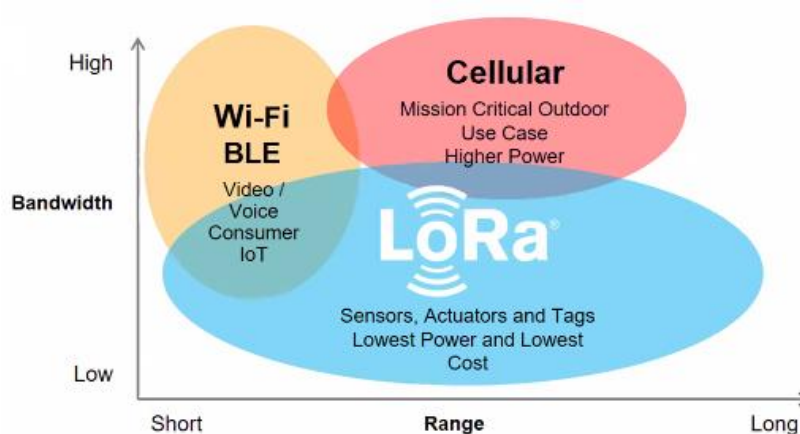


Figura 9: Alcance y ancho de banda de tecnologías inalámbricas.

Así mismo, se puede observar de las gráficas presentadas anteriormente, que algunas aplicaciones o tipos de datos son más fácilmente transmisibles o presentables con un tipo de tecnología que con otra. Por ejemplo, para imágenes, voz o video el Wi-Fi presenta mejores condiciones y en el caso de los sensores es mejor la tecnología LoRa, ya que permite cubrir mayores distancias.

### **ALGUNOS CAMPOS DE APLICACIÓN PARA DESARROLLO DE REDES LORA**

La tecnología LoRa a través del protocolo LoRaWAN poseen una gran cantidad de aplicaciones y usos en la actualidad; esto seguirá creciendo a un ritmo acelerado conforme pase el tiempo dado lo económico y sencillo que resulta su implementación, conforme a lo planteado por (Moko LoRa, s.f.) algunos campos son los siguientes:

#### **MEDIDORES DE TEMPERATURA**

Los sensores de temperatura LoRa son dispositivos inalámbricos que presentan el beneficio de contar con un largo alcance entre sus funcionalidades; estos poseen una tecnología de radiofrecuencia y utilizan una muy baja potencia para poder monitorear y enviar información de lecturas de temperatura a largas distancias. Como se sabe, la tecnología LoRa busca maximizar el alcance reduciendo el consumo de energía, por lo que estos sensores son capaces de transmitir datos a una distancia de 2 km en zonas urbanas y de aproximadamente 10 km en las zonas rurales sin interferencia.

Estos sensores se componen de dos partes: un sensor de temperatura y el transceptor de radio LoRa. El sensor de temperatura es el encargado de hacer las lecturas y envía las mediciones al transceptor, el cual se encarga de convertir los datos en una señal LoRa que se transmite a continuación a una estación de base o Gateway LoRa. El Gateway recibe la

señal, la convierte en paquete de datos, el cual es seguidamente enviado a un servidor o plataforma basada en la nube. Estos datos pueden ser visualizados a través de diferentes dispositivos en tiempo real.



*Figura 10: Arquitectura de la Red.*

Algunos ejemplos en la industria de este tipo de sensores son los siguientes:

- **Agricultura y ganadería:** para monitorear los niveles de humedad en los cultivos, invernaderos y construcciones ganaderas, con esto se minimizan pérdidas de cultivos y se mantienen a los animales en condiciones favorables.
- **Manufactura industrial:** Con los sensores de temperatura se puede controlar las salas de equipos y plantas de fabricación. Así se pueden evitar daños en estos y evitar posibles retrasos debido al tiempo de inactividad por mantenimiento o reparación.
- **Salud y productos farmacéuticos:** Mantienen una temperatura a un nivel estándar de preservación y uso los diferentes medicamentos con el fin de que estos se encuentren en óptimas condiciones para su uso y para garantizar su eficacia.

## **DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE**

El estudio de la calidad del aire es una práctica que está tomando mayor importancia con el paso del tiempo, ya que a través de estos estudios se puede garantizar la mejora en la calidad de vida de las personas, principalmente en los grandes núcleos urbanos, donde es sumamente importante poder predecir condiciones desfavorables para la realización de ciertas actividades. Así se puede cuidar mejor de la salud de las personas y anticiparse a posibles enfermedades debidas a una baja calidad del aire que se respira.

Los estudios de calidad de aire sirven para dar a conocer la composición y concentración de diversos gases presentes en la atmósfera. Si estos elementos no se encuentran en una proporción adecuada y no existe un equilibrio entre estos, se determina que existe contaminación ambiental. Los factores que pueden afectar de manera directa este equilibrio y causar reacciones químicas entre estos elementos pueden ser la temperatura, la humedad,

los vientos, las precipitaciones, la presión atmosférica, la radiación solar e incluso la acción humana; como mejor ejemplo de este último factor, se puede mencionar a las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por determinados procesos industriales.

Los dispositivos LoRa se utilizan en el sistema de monitoreo de calidad del aire interior en muchos edificios comerciales, escuelas, bancos, estaciones de tren y centros comerciales. Estos permiten detectar anomalías en el ambiente y determinar si las concentraciones de algunos materiales podrían ser perjudiciales para la salud de las personas que se encuentran en estos sitios. Los medidores de calidad de aire que utilizan la tecnología LoRa ofrecen muestreos y mediciones continuas de elementos como óxido nítrico, hidrocarburos, polvo, etc. Estos suelen ser de bajo costo, bajo consumo de energía y ofrecen una amplia cobertura, pues existen algunos que pueden establecer una comunicación de hasta 15 km.

La normativa asociada al uso de estos medidores de calidad de aire es la ICCA

### **Índice Centroamericano de Calidad del Aire (ICCA)**

El Índice Centroamericano de Calidad del Aire es una medida que refleja el nivel de contaminación atmosférica en una región específica y sus impactos en la salud humana. Se utiliza una escala del 0 al 500, dividida en 6 segmentos que representan diferentes categorías de calidad del aire y sus efectos en la salud. Va desde una calidad buena que no tiene efectos negativos hasta una calidad peligrosa que afecta la salud de toda la población. La conversión de la concentración de contaminantes a valores del ICCA se realiza mediante fórmulas desarrolladas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, asegurando que el límite de exposición del contaminante esté en el segundo segmento del índice (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo, s.f).

ICA considera varios contaminantes atmosféricos clave, incluyendo partículas PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, entre otros. Cada contaminante tiene su propia escala de valores y niveles de riesgo asociados.

Cálculo del ICA:

El cálculo del ICA se basa en la recopilación de datos de calidad del aire, la ponderación de los diferentes contaminantes y la conversión a una escala comprensible para el público. Este proceso permite obtener un valor único que refleja la calidad general del aire en una región específica.

Los resultados del ICA se presentan en forma de rangos de calidad del aire, que van desde "bueno" hasta "muy poco saludable". Cada nivel está asociado con posibles efectos en la salud, como irritación respiratoria, exacerbación de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, entre otros.

El ICA desempeña un papel crucial en la protección de la salud pública al informar a la población sobre la calidad del aire y promover acciones para reducir la exposición a contaminantes atmosféricos. Además, ayuda a las autoridades a tomar decisiones informadas en materia de políticas ambientales y de salud.

ICCA	CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
0-50	Buena	No se anticipan impactos a la salud cuando la calidad del aire se encuentra en este rango.
51-100	Satisfactoria	Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades, personas sensibles podrían sentir molestias.
101-150	No Satisfactoria	Aumento de molestias menores en personas sensibles
151-200	Dañina por la salud	Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios
201-300	Muy dañina por la salud,	Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población
300-500	peligroso	La población debe de mantenerse en casa. Se debe de tomar medidas inmediatas de contingencia.

*Figura 11; Tabla del ICCA.*

#### Fuentes de Contaminación:

Las principales fuentes de contaminación atmosférica incluyen el tráfico vehicular, las industrias, la quema de combustibles fósiles y otras actividades humanas. Identificar y abordar estas fuentes es fundamental para mejorar la calidad del aire.

Se proponen estrategias y acciones para mejorar la calidad del aire, como políticas de control de emisiones, promoción del transporte sostenible y uso de energías limpias. Estas medidas son esenciales para reducir la contaminación atmosférica y proteger la salud pública.

#### Seguimiento y Comunicación:

Es crucial realizar un seguimiento continuo de la calidad del aire y comunicar regularmente los resultados del ICA a la población. Esto se puede lograr a través de medios de comunicación efectivos y comprensibles, así como mediante la colaboración con organizaciones locales y comunidades.

#### **Informe sobre el índice de medición de Butano**

Según el informe de la ONU:1011 CE:203-448-7 (International Labour Organization, 2018) se muestran los siguientes datos:

<b>INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA</b>	
<p><b>Estado físico; aspecto</b> GAS INODORO INCOLORO COMPRIMIDO LICUADO.</p> <p><b>Peligros físicos</b> El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p><b>Peligros químicos</b></p>	<p>Fórmula: C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> Masa molecular: 58.1 Punto de ebullición: -0.5°C Punto de fusión: -138°C Densidad relativa (agua = 1): 0.6 Solubilidad en agua, g/100ml a 20°C: 0.0061 Presión de vapor, kPa a 21.1°C: 213.7 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.1 Punto de inflamación: -60°C Temperatura de autoignición: 365°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.8-8.4 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.89</p>

Figura 12; Información general acerca de emisiones de Butano.

## Exposición y efectos sobre la salud

Vías de exposición: la sustancia se puede absorber por inhalación.

Efectos de exposición de corta duración: la evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.

Riesgo de inhalación: al producirse pérdidas en zonas confinadas, esta sustancia puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.

## LÍMITES DE EXPOSICIÓN LABORAL

- TLV: 1000 ppm como STEL.
- MAK: 2400 mg/m<sup>3</sup>, 1000 ppm; categoría de limitación de pico: II(4); riesgo para el embarazo: grupo D

<b>INFORMACIÓN ADICIONAL</b>
<p>- Límites de exposición profesional (INSST 2022): VLA-ED (Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4) y sus mezclas, gases): 1000 ppm - N° de índice (clasificación y etiquetado armonizados conforme al Reglamento CLP de la UE): 601-004-00-0 - <b>Clasificación UE</b> Pictograma: F+; R: 12; S: (2)-9-16-33; Nota: C</p>

Figura 13: Cuadro resumen de riesgos laborales asociados al butano.

## DETECTORES DE HUMO E INCENDIOS

Estos detectores son dispositivos pensados para detectar la presencia de un incendio en el interior de un edificio o cualquier espacio cerrado. En el ámbito técnico, son mayormente conocidos como detectores de incendios, puesto que en el caso de una combustión en la que se generen gases únicamente no puede hablarse de humo. Pueden ser analógicos si indican

el nivel de una sustancia o magnitud medida; o digitales si detectan presencia o variación de humo, pero sin poder cuantificar el nivel.

Los detectores de humo pueden clasificarse a su vez por el tipo de detección que utilizan, de este modo pueden mencionarse los siguientes tipos de detectores:

**Detectores de humos iónicos.** Funcionan por un principio de ionización del aire en caso de que entre humo en la cámara de detección; los elementos detectados pueden ser invisibles a simple vista. Se instalan generalmente en la industria química, ya que son más sensibles a fuegos de crecimiento rápido o de humo no visible. Es importante mencionar que no funcionan si el aire tiene una velocidad superior a unos 0,5 m/s.

**Detectores ópticos.** El humo que entra en el equipo hace que se interrumpa la transmisión de un rayo de luz que hay en su interior, lo cual genera una alarma. Son sistemas para detección puntual y existen dos tipos; los detectores ópticos analógicos y los digitales. Estos detectores se colocan en los conductos de extracción de aire (ventilación) del local para que detecten la presencia de humo en grandes estancias o en el edificio en general. Se utilizan, habitualmente, en viviendas, centros comerciales, supermercados, cárceles o bodegas, entre otros.

**Detector térmico.** Realmente no es un detector de humo como tal, sino de incendio, ya que funciona por la fusión de un elemento cuando se alcanza una temperatura elevada. Son de detección tardía (normalmente, se activan alrededor de los 68 °C) y solo pueden instalarse en locales de hasta 7 metros de altura. Generalmente, se usan cuando no puede emplearse un sistema convencional de detección de humos; por ejemplo, en cocinas o garajes.

**Detector de radiación.** Tampoco es un detector de humo, sino un detector de incendios. Detecta, mediante diferentes elementos electrónicos, la presencia de radiación generada por la presencia de un incendio. Se instalan sólo en recintos abiertos o lugares con techos muy elevados, y producen una alarma tardía.

De este modo se puede observar que el tipo de detector a utilizar varía dependiendo de la ubicación donde se requiera su funcionamiento, ya que algunos poseen propiedades para trabajar en mejor en interiores y otros en exteriores.

### **Funcionamiento del detector de humo con la tecnología LoRa**

Los sensores de humo desarrollados para funcionar con la tecnología LoRa están equipados con un transceptor que se encarga de transformar los datos y mediciones recopiladas por el sensor en paquetes de datos que pueden ser posteriormente visualizados a través de alguna aplicación o interfaz. Como se mencionaba anteriormente, existen diferentes tipos de sensores de humo, pero en general pueden clasificarse como sensores para interiores y para exteriores, por tanto, existen algunos que cuentan con geolocalización además de las

características generales como radiodifusión, monitoreo en tiempo real y conectividad. Estos también notifican al usuario al detectar anomalías en la zona de monitoreo.

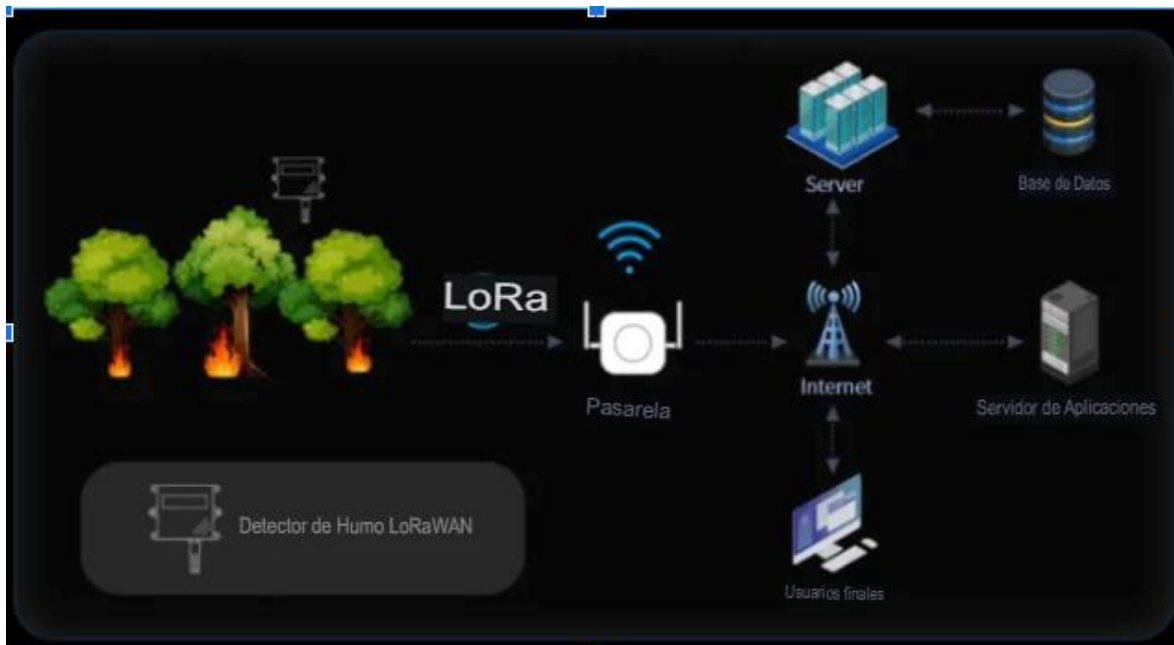


Figura 14: Arquitectura de red de detectores de humo.

## EJEMPLOS REALES EN LA INDUSTRIA

### ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

El primer ejemplo de aplicación pertenece a la empresa Advantech la cual se dedica a ofrecer tecnologías inalámbricas para aplicaciones industriales. Este caso se presentó en abril de 2020 y le pertenece al sector agrícola, su cliente necesita recoger datos de varios invernaderos de gran tamaño, pero el costo de implementar un sistema con cables o con wifi es elevado y también varios invernaderos se encontrarán en lugares remotos sin conexión a un red wifi o telefónica donde se pudieron monitorear los datos en tiempo real. Entre los datos a recopilar se encontrarán la velocidad y dirección del viento, la temperatura, las precipitaciones y la radiación solar.

La empresa utilizó nodos Wizzard LoRaWAN y gateway WISE-6610 LoRaWAN para poder recoger la información proporcionada por los sensores sobre el estado del terreno eliminando así los costos de cableado. Para el diseño de esta red se creó una red LoRaWAN privada que recogiera la información enviada por los nodos Wizzard estos conectados a los sensores. Finalmente, los datos se manejan mediante una conexión celular 4G LTE, la cual permitía acceder al monitoreo de los parámetros en tiempo real.

Dada esta solución el dueño del invernadero pudo mejorar su eficiencia de producción y logística, pudiendo estimar su producción a partir del entorno del invernadero y transmitirla a sus clientes mediante análisis de big data proporcionada por los sensores.

## **RASTREO Y LOCALIZACIÓN DE ACTIVOS**

El siguiente proyecto de implementación de LoRaWAN fue aplicación por la compañía Actility, la cual es una empresa líder en soluciones de conectividad IoT para todo tipo de aplicaciones. La compañía brindó sus servicios a la empresa Volvo, fabricante de automóviles, teniendo fábricas en todo el mundo. El problema se originó en una de sus fábricas de camiones en Francia, aunque tras su éxito se decidió implementar en todas las instalaciones de la compañía.

Esta fábrica genera un total de 72 camiones al día y dentro de sus instalaciones hay entre 5000 y 6000 camiones ensamblados, los cuales pasan por diferentes puntos de la fábrica para pruebas y exámenes de calidad durante los traslados los empleados perdían mucho tiempo localizando el camión en específico.

Actility fue la encargada de aportar la solución la cual consistió en la implementación de dispositivos LoRa. Cada camión al ser fabricado se insertaba un nodo, el cual por medio de la tecnología LoRaWAN podía ser rastreado y localizado en todo momento gracias al modelo Abeeway Industrial Tracker. La información de los localizadores es enviada a los gateway y estos transmitida al Network Server de Actility mediante conexión IP.

## **LECTURA DE CONTADORES**

Este caso de aplicación fue desarrollado por las compañías Logitek y Cefalux para la empresa de Mercedes, concretamente para su departamento de servicios generales, este cliente dispone de centenares de contadores en sus instalaciones. Mercedes requería de monitorizar las lecturas de todos estos contadores ya que este proceso se realizaba de forma manual. Como solución se implementaron los siguientes dispositivos Lora.

- ACW-DINDA: nodo Lora del fabricante Atim con la capacidad de realizar lecturas de entrada analógica y digitales. También dispone de una salida capaz de alimentar un sensor.
- ACW-DINRSM: Nodo LoRa del fabricante Atim con la capacidad de realizar lecturas y escrituras hasta 49 registros.
- Industrial LoRaWAN gateway: gateway de atim para el interior de plantas industriales. cuenta con la capacidad de comunicar aguas abajo mediante LoRa aguas arriba mediante Wifi, TCP/IP y MQTT

Resultando en el siguiente dispositivo capaz de realizar las mediciones en tiempo real.



Figura 15: Contador eléctrico digital con comunicación LoRaWAN.

## COMPATIBILIDAD CON OTRAS TECNOLOGÍAS

### CONEXIÓN 5G

Hoy en día, la tecnología permite alcanzar velocidades altas de conexión celular proporcionando un amplio rango y ancho de banda con un alto consumo de energía, siendo muy útil para aplicaciones de alta capacidad de datos, como vigilancia o backhaul, esta es una puerta de enlace que utiliza una red de área amplia de baja potencia (LPWAN) para comunicarse con sensores/dispositivos y posteriormente usa el Ethernet, Wi-Fi o celular para poder conectarse a la nube para transmitir sus datos (Froehlich, 2020).

Esta conexión se usa en áreas con poblaciones densas, las áreas remotas, los pueblos pequeños y otros lugares no muy desarrollados quedan fuera de los alcances de esta conexión, volviéndose muy compleja y costosa de implementar.

Hoy en día se cuenta con dispositivos como DRAGINO que incorporan esta conexión en alguno de sus Gateway. Ciertamente LoRaWAN y 5G coexistieran en el futuro principalmente en forma de redes híbridas dependiendo del uso que tendrán. mientras el número de dispositivos IoT con el protocolo LoRaWAN vaya en incremento, las redes 5G complementaran las redes LoRaWAN como tecnología de red de acceso para transportar los datos desde puertas de enlace en áreas remotas a la subida en la nube y poder visualizar los datos de forma remota y en tiempo real.

### LTE-M

Esta tecnología está enfocada para el uso por parte de internet de dispositivos que desean conectarse a una red 4G sin pasarela y mientras utilizan baterías. Las tecnologías LTE-M están causando gran interés gracias a sus ventajas, como la capacidad de operar con chips más económicos, ya que poseen un ancho de banda más estrecho y son semidúplex. Con LTE-M, los dispositivos tienen la capacidad de activar un modo de ahorro de energía y "despertar" solo durante conexiones periódicas, utilizando una función conocida como recepción discontinua extendida (eDRX). Además, desde el punto de vista financiero, la

velocidad máxima de datos para los dispositivos LTE-M se limita a 100 kbits/s, lo que implica una menor demanda en las redes 4G. Esto posibilita a los proveedores de servicios ofrecer planes con tarifas considerablemente más bajas, a veces equivalentes a las tarifas antiguas de 2G M2M. Si se menciona la cobertura del LTE-M, esta es una muy buena opción debido a la infraestructura que esta posee, sin embargo, si se aplica esta tecnología en lugares confinados en los cuales la recepción de señal no sea buena, LoRa sería probablemente la opción más sensata (Anónimo, Comunicaciones IoT. LTE-M, NB-IoT y 5G, s.f.). Además, a través de esta tecnología se puede realizar de forma más sencilla la subida de datos recogidos por una red de sensores LoRa a internet, ya que a través de los chips que esta utiliza, proporciona una solución rápida y económica para estos procesos.

## **WIFI**

Las redes de conexión inalámbricas varían en aspectos como su ancho de banda, consumo de energía y alcance de red. Si comparamos la tecnología en términos de ancho de banda, Wi-Fi es superior a LoRaWAN, pero esta no es de largo alcance, además su batería dura poca. A pesar de este inconveniente es común ver placas lora que incluyan conexión Wi-Fi, esto con el fin de tener una red IOT que permita la subida de datos de una red de sensores y que esta pueda ser visualizada en tiempo real.

## **TECNOLOGÍA SATELITAL**

En la actualidad existen variados servicios por satélite en funcionamiento y se plantea la integración de más de estos. Sin embargo, gran parte de estas redes de satélites utilizan tecnologías de carácter privado y de uso propio, esto implica costes adicionales para integrar una población menor de unidades de satélites en la solución global del IoT.

Actualmente, existen escasas aplicaciones por satélite. La mayoría de estas, se benefician de la incorporación de conectividad terrestre de bajo coste, como es el caso de LoRa, tecnología que, al combinarse con el amplio acceso geográfico de los sistemas de satélite, puede ofrecer un sistema de conectividad muy flexible.

La compañía EchoStar Mobile, que es la principal promotora de la integración de estas tecnologías (LoRa y IoT satelital), ha optado desplegar componentes que utilizan la tecnología LoRa, como centro de una red a nivel europeo de IoT por satélite. Además de conectarse a la red de satélites, el transceptor EchoStar Mobile LoRa también funciona en redes terrestres de banda ISM LoR (Echostar Mobile, 2022)a. La capacidad de modo dual permite el desarrollo de soluciones IoT, que pueden valerse de la conectividad terrestre o satelital según sea necesario, sin tener que realizar una costosa integración con el hardware de satélite.

EchoStar Mobile lanzó en noviembre de 2022 un servicio que ofrece conectividad bidireccional a través de un satélite GEO (órbita ecuatorial geostacionaria), fijado sobre

Europa. La única diferencia entre ambos modos (terrestre y satelital), es que el enlace LoRa con el satélite utiliza la banda S (EchoStar Mobile, 2022). EchoStar tiene licencia para utilizar la banda S, que es muy resistente a las condiciones meteorológicas.

### **EJEMPLO DE APLICACIÓN: LINK ONE -LTE-M/NB-IOT/LORAWAN**

El RAKwireless Link ONE es un dispositivo IOT versátil que combina IOT celular (LTE-M) y la tecnología LoRaWAN, lo que lo hace ideal para una amplia gama de aplicaciones IoT. El dispositivo se basa en el SoC Nordic nRF52840, el transceptor LoRa Semtech SX1262 y el módulo LTE Quectel BG77 con GPS integrado, lo que proporciona una plataforma potente y flexible para el desarrollo de IoT.

En general, RAKwireless Link.ONE es un dispositivo IoT potente y flexible que proporciona una variedad de opciones de conectividad, funciones de seguridad y compatibilidad con módulos de sensores modulares. Es un dispositivo ideal para aquellos que buscan desarrollar e implementar rápida y fácilmente aplicaciones de IoT seguras y personalizables.

#### **CARACTERÍSTICAS:**

- Pila de protocolos LoRaWAN 1.0.2 (compatible con Clase A y C)
- Pila de protocolo Bluetooth Low Energy 5.0
- NB-IoT y LTE-M
- Nórdico nRF52840:
  - MCU de consumo ultra bajo
  - CPU ARM® Cortex-M4F de 32 bits
  - Reloj de CPU de 4MHz
  - Memoria flash de 1 MB, RAM de 256 KB
  - Amplia gama de conexiones:
    - I2C, SPI, Entradas analógicas
    - Entradas y salidas digitales
- Semtech SX1262:
  - Baja potencia y alto alcance.
  - transceptor LoRa
- Módulo Quectel BG77
  - Comunicación UART con nRF52840
  - Programable con el conjunto de comandos Quectel AT
  - Conectores IPEX para antenas externas LTE y GPS
  - Opciones Nano SIM y ESIM
  - Soporta LTE CAT M1 y LTE CAT NB2
  - Ubicación GNSS

- Caja Unificar 100x75x38 mm
  - Caja IP65
  - Preparado para acceso USB y una antena LTE externa
  - Antena LTE externa de 3 dBi
  - Coincidencia de conector SMA a IPEX
  - Antena interna LoRaWAN y BLE en la placa de montaje
- Antena GNSS interna



*Figura 16: Imagen del dispositivo LINK ONE -LTE-M/NB-IOT/LORAWAN.*

## **LEYES Y NORMATIVA APLICABLES**

### **NORMAS INTERNACIONALES**

#### **ITU-T Y.4480**

Esta es una recomendación internacional, conocida también como Y.LoRaWAN que describe un protocolo de bajo consumo de energía para redes inalámbricas de área amplia, que está optimizado para dispositivos finales alimentados por baterías que pueden ser móviles o estar montados en una ubicación fija.

Esta recomendación está establecida y es mantenida por ITU-T Study Group 20, quienes se encargan de aspectos relacionados a Infraestructura global de la información, aspectos del protocolo de Internet, redes de próxima generación, Internet de las cosas y ciudades inteligentes.

Este protocolo es un equivalente al protocolo de especificación de capa de enlace LoRaWAN® [b-LoRaWAN TS001-1.0.4].

Las redes de las cuales se habla en esta recomendación están dispuestas en una topología estrella de estrellas en la que las puertas de enlace conocidos también como gateways, concentradores, enrutadores, puntos de acceso o estaciones base; retransmiten transmisiones entre los dispositivos finales y un servidor de red central en el backend. Las puertas de enlace son conectadas a un servidor de red a través de conexiones de protocolo de Internet (IP) estándar, mientras que los dispositivos finales utilizan comunicación por radiofrecuencia (RF) de un solo salto con una o varias puertas de enlace (ITU-T Y.4480, 2021). Las comunicaciones son usualmente bidireccionales, sin embargo, la comunicación de enlace ascendente desde un dispositivo final a un servidor de red es usualmente el tráfico predominante.

Esta recomendación también establece que la comunicación entre los dispositivos de enlace o sensores en el caso de algunos dispositivos y los gateways debe estar distribuida en diferentes canales de frecuencias y velocidad de transmisión de datos. La velocidad de transmisión de datos o *Data rate* en inglés, es un intercambio que se da entre el rango de comunicación y la duración de la transmisión. Además, sugiere que, para maximizar la vida útil de la batería de todos los dispositivos finales conectados a la red y la eficiencia de la misma, la infraestructura de la red puede gestionarse de forma que la velocidad de datos y la frecuencia de radio transmita potencia para cada dispositivo final de forma individual mediante un esquema de velocidad de datos adaptativa.

Se establece que un dispositivo final puede transmitir en cualquier canal disponible, utilizando cualquier velocidad de transmisión de datos mientras se cumplan determinadas reglas (ITU-T Y.4480, 2021), las cuales son:

- El dispositivo final cambia pseudo aleatoriamente de canal para cada transmisión, esto con el fin de diversificar las frecuencias de transmisión, esto causa que el sistema sea más resistente a las interferencias.
- Los dispositivos finales cambian de forma pseudo aleatoria su periodicidad de transmisión, esto para evitar que la sincronización de poblaciones de transmisión entre dispositivos finales.
- Los dispositivos finales a ser utilizados cumplen con todos los requisitos establecidos en una determinada zona o país y que rigen su comportamiento en la banda o sub-bandas en las que opera. Esto incluye entre otras cosas, banda de frecuencia de operación, ciclo de trabajo, duración de la transmisión.

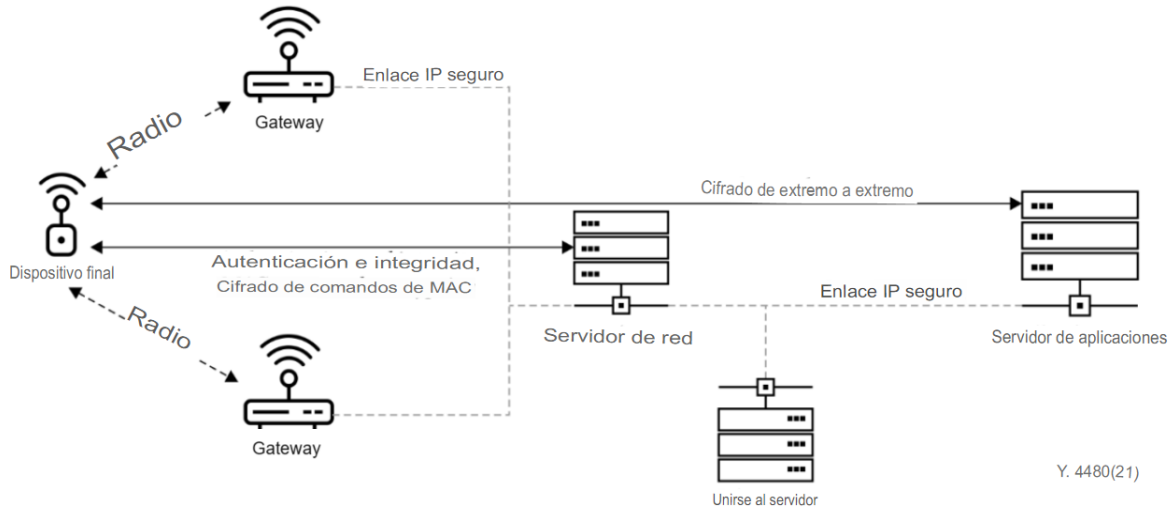


Figura 17: Esquema de comunicación del protocolo LoRaWAN.

Las frecuencias centrales utilizables para esta tecnología son:

- Europa: 868 MHz
- Estados Unidos: 915 MHz
- China: 470 MHz
- Corea: 920 MHz
- India: 865 MHz

Las redes que implementan este protocolo distinguen 3 clases de dispositivos establecidos de acuerdo a 3 protocolos diferentes; dispositivos clase A, clase B y clase C; donde el protocolo principal es llamado clase A y opcionalmente se pueden implementar otros dispositivos de protocolos B y C. Todos los dispositivos implementados deben ser compatibles con la clase A, es decir, deben poder establecer comunicación con estos.

Los dispositivos según su clase se definen de las siguientes maneras (ITU-T Y.4480, 2021):

**Dispositivos finales bidireccionales (Clase A):** Los dispositivos finales de Clase A permiten una comunicación bidireccional a través de la cual la transmisión de enlace ascendente de cada dispositivo final es seguida por dos cortas ventanas de recepción de enlace descendente. La transmisión programada por el dispositivo final se basa en sus propias necesidades de comunicación, con una pequeña variación basada en un tiempo aleatorio. Las operaciones de clase A son el sistema de dispositivos finales de menor potencia para aplicaciones que solo requieren enlace descendente desde el servidor, poco después de que el dispositivo final haya enviado una transmisión de enlace ascendente. Para realizar otra comunicación de enlace descendente desde el servidor en cualquier otro momento, se tendrá que esperar hasta el próximo enlace ascendente que inicie el dispositivo final.

**Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción programadas (Clase B):** los dispositivos finales de capa B permiten más ranuras de recepción. Además de las ventanas de recepción de Clase A, los dispositivos finales de clase B abren ventanas de recepción adicionales en tiempos establecidos. Para que el dispositivo final abra sus ventanas de recepción a un tiempo programado, recibe una baliza sincronizada con el tiempo de la salida. Esto permite que el servidor de red sepa cuándo el dispositivo final está escuchando.

**Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción máximas (Clase C):** Los dispositivos finales Clase C permiten ventanas de recepción abiertas casi continuamente, que se cierra solo cuando se está transmitiendo. Los dispositivos finales habilitados para Clase C utilizan más energía para funcionar que los de Clase A o aquellos habilitados para clase B, pero presentan la latencia más baja para la comunicación entre servidores y dispositivos finales.

#### **DISPOSICIONES ACERCA DE LA BANDA ISM**

La tabla de asignación de frecuencias que se muestra a continuación está extraída del Manual de Reglamentos y Procedimientos para la Administración Federal de Radiofrecuencias, Capítulo 4 – Asignaciones, Asignaciones y Planes. En esta se detallan los usos para los cuales está destinada la banda entre 902 - 928 MHz (United States Department of Commerce, 2007).

Además de esta, las bandas de frecuencias designadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas banda (ISM) son las siguientes:

*Tabla 4: Bandas de frecuencias para aplicaciones industriales, científicas y médicas.*

<b>Bandas utilizables</b>
13553 - 13567 kHz
26957 - 27283 kHz
40.66 - 40.70 MHz
902 - 928 MHz
2400 - 2500 MHz
5725 - 5875 MHz
24 - 24.25 GHz

Dada la libertad que se tiene para utilizar las frecuencias de esta banda, Los servicios de radiocomunicaciones que funcionan en estas deben aceptar interferencias que pueden causar estas aplicaciones. Los equipos ISM que operan en estas bandas están sujetos a las disposiciones del número 15.13 (United States Department of Commerce, 2007), las cuales son las siguientes:

**US218** La banda 902-928 MHz está disponible para los sistemas de Servicio de Localización y Monitoreo (LMS), sujetos a no causar interferencia dañina al funcionamiento de todas las estaciones federales autorizadas en esta banda. Estos sistemas deben tolerar la interferencia del funcionamiento de equipos industriales, científicos y médicos (ISM) y la operación de estaciones federales autorizadas en esta banda.

**US267** En la banda 902-928 MHz, las estaciones de aficionados transmitirán únicamente en las sub-bandas 902-902.4, 902.6-904.3, 904.7-925.3, 925.7-927.3 y 927.7-928 MHz dentro de los Estados de Colorado y Wyoming, delimitada por el área de las latitudes 39° N y 42° N y longitudes 103° O y 108° O.

**US275** La banda 902-928 MHz está atribuida a título secundario al servicio de aficionados sujeto a no causar interferencia dañina a las operaciones de las estaciones federales autorizadas en esta banda o a los sistemas del Servicio de Localización y Seguimiento (LMS). Las Estaciones en el servicio de aficionados deben tolerar cualquier interferencia de las operaciones de los dispositivos industriales, científicos y médicos (ISM), sistemas LMS y las operaciones de emisoras federales autorizadas en esta banda. Además, el servicio de aficionados está prohibido en aquellas porciones de Texas y Nuevo México limitadas al sur por la latitud 31° 41' Norte, en el este por 104° 11' de longitud Oeste, y al norte por 34° 30' de latitud Norte, y en el oeste por la longitud 107° 30' Oeste; el servicio está restringido a un máximo Salida de potencia máxima de la envolvente del transmisor de 50 vatios.

**G11** Los Servicios de radio fijos y móviles federales, incluido el control de radio de baja potencia operaciones, están permitidas en la banda 902-928 MHz a título secundario.

**G59** En las bandas 902-928 MHz, 3100-3300 MHz, 3500-3650 MHz, 5250-5350 MHz, 8500-9000 MHz, 9200-9300 MHz, 13.4-14.0 GHz, 15.7-17.7 GHz y 24.05-24.25 GHz, toda radiolocalización federal no militar será secundaria a la radiolocalización militar, excepto en el equipo de detección de superficie de aeropuerto (ASDE) de la sub-banda 15.7-16.2 GHz, el cual está permitido en una relación de similitud entre el sujeto y la coordinación con los departamentos militares.

## **RELACIÓN CON EL MODELO ISO/IEC 7498-1:1994**

El modelo de interconexión de Sistemas abiertos, también llamado OSI (Open System Interconnection) es el modelo propuesto por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en el año 1977 y fue aprobado hasta el año 1984. Cabe aclarar que este modelo es una referencia para protocolos de red y no es una arquitectura de red. Tampoco especifica ni define los protocolos que se utilizan en la comunicación, eso es algo independiente a este modelo.

El modelo OSI representa las bases de la red moderna ya que es un lenguaje muy bien estructurado sin embargo no se ha escrito una actualización de su modelo desde hace 28

años. La tecnología LoRaWAN hace uso de este modelo, pero solo utiliza 3 capas del modelo como tal (Hernández, 2019) y se muestra en la Figura 15.

En el caso de la tecnología LoRa, la comunicación entre dispositivos implica varios protocolos y capas de comunicación para garantizar la transferencia de datos eficiente y fiable. Los protocolos clave que intervienen en la comunicación entre dispositivos LoRa son los siguientes:

**LoRaWAN (Long Range Wide Area Network):** LoRaWAN es un protocolo de red de acceso múltiple que se utiliza para conectar dispositivos LoRa a una red de área amplia. Proporciona funciones de control de acceso y gestión de red. LoRaWAN define cómo los dispositivos se registran en la red, cómo se gestionan las comunicaciones y cómo se entregan los datos a las aplicaciones.

**LoRa PHY (Physical Layer):** El nivel físico LoRa define cómo los dispositivos transmiten y reciben datos en la capa de radiofrecuencia. LoRa utiliza modulación de espectro ensanchado para alcanzar largos alcances con baja potencia. El protocolo LoRaWAN se construye sobre la capa PHY de LoRa.

**MAC (Media Access Control):** La capa de control de acceso al medio, o MAC, se encuentra en el nivel de enlace de datos y se encarga de la gestión de la comunicación entre dispositivos LoRa y las estaciones base de LoRaWAN. El MAC controla cómo se transmiten y reciben los paquetes de datos, así como la sincronización y la administración de canales.

**CoAP o MQTT (opcional):** Para la comunicación de datos entre dispositivos LoRa y las aplicaciones en la nube o servidores, se pueden utilizar protocolos como Constrained Application Protocol (CoAP) o Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Estos protocolos permiten a los dispositivos enviar datos a servidores o aplicaciones para su procesamiento y visualización.

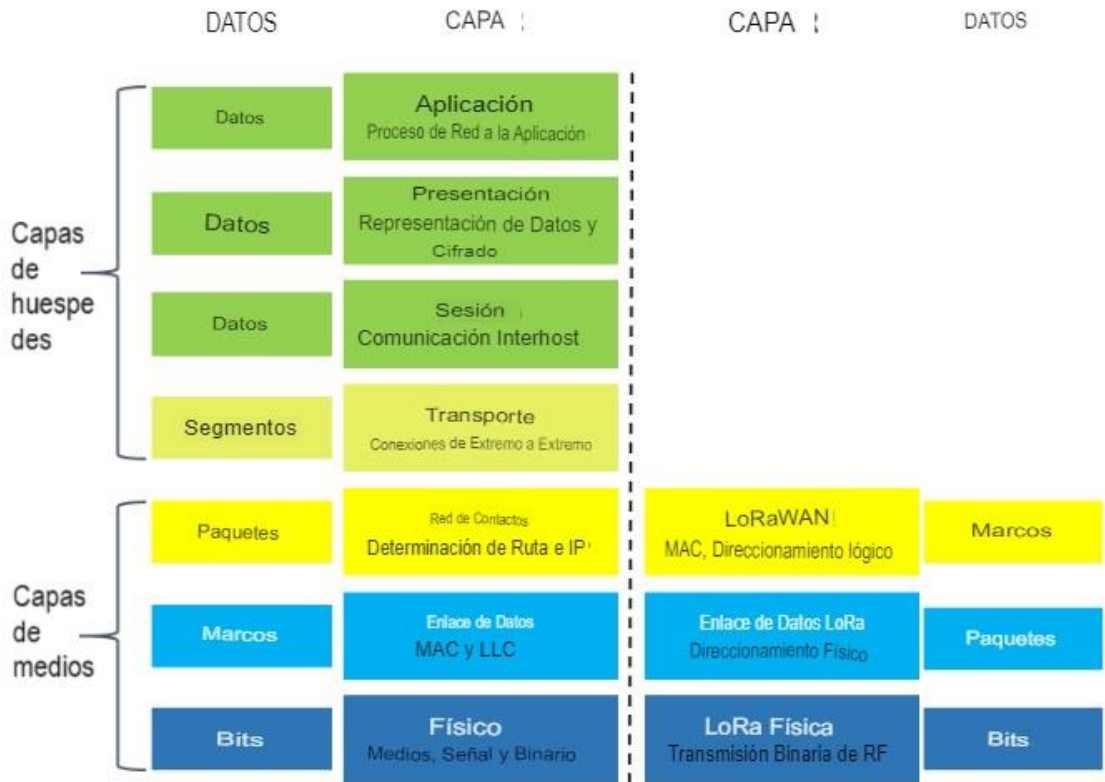


Figura 18: Capa OSI y su uso con la tecnología LoRaWAN.

## LEYES EN EL SALVADOR

En El Salvador, no existe propiamente una regulación o normativa que se enfoque en el uso de la tecnología LoRa o el protocolo LoRaWAN, sin embargo, se puede que mencionar que el ente encargado de regular las telecomunicaciones es la Superintendencia General de Electricidad y telecomunicaciones (SIGET), la cual se encargan de generar las normativas expuestas en el Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias (CNAF) donde se detallan las regulaciones de cada frecuencia para su uso en el país. La tecnología Lora en la región de América utiliza las bandas de frecuencias 915 MHz - 928 MHz.

Según la normativa de la CNAF (SIGET, 2017) para la banda de 915 - 928 MHz se expone la siguiente regulación:

“La banda 915 - 928 MHz puede ser utiliza en servicio Fijo para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM), bajo las siguientes condiciones:  
 A) La potencia efectiva radiada del transmisor no debe exceder 3.98 W  
 B) No se ofrecerá protección contra interferencias perjudiciales, a quienes utilicen esta banda.

refiérase al instructivo para la utilización de bandas del espectro de uso libre.

Además, también estable 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.

Por lo cual, no existe una banda oficial de frecuencias para el uso de tecnología LoRa, pero si existe el uso libre de la banda ISM, siempre que no exceda los 3.98 W. Se espera que, con el incremento en el uso de esta tecnología a nivel regional, el país incorpore con mayor fuerza el uso de la tecnología LoRa y sus diferentes aplicaciones permitiendo así una regulación más detallada del uso de esta banda.

## **ESTUDIO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN**

La trayectoria que la señal recorre desde el transmisor hasta el receptor puede ir desde una simple línea vista sin interferencias hasta un ambiente con edificios, montañas, árboles y muchos más obstáculos que la puedan interferir.

En los sistemas de telecomunicaciones los modelos de propagación brindan la oportunidad de poder cuantificar un estimado de la potencia de la señal electromagnética que se ha perdido al realizar un enlace. Estos modelos son conocidos como modelos de propagación “Large-Scale” y son muy utilizados en áreas de cobertura para sistemas de radio.

Existen distintos tipos de modelos entre ellos están, modelo empírico, modelo Semi-Empírico y Modelo Teóricos (Xirio, s.f.). El estudio de los modelos de propagación dio sus inicios en Japón por la década de los setenta, siendo uno de los primeros en incursionar en este campo el científico Okumura quien basó sus estudios en mediciones experimentales realizadas en su país.

## **MODELO DE FRISS**

Este modelo se deduce de las ecuaciones de Maxwell, las cuales permitieren calcular la potencia que se recibe a una cierta distancia teniendo en cuenta que es para condiciones ideales es decir sin ningún obstáculo.

Donde:

$$L = 32.44 + 20 \log_{10} r + 20 \log_{10} f \quad (2)$$

L: Las pérdidas por trayectoria en dB

f: Frecuencia en MHz

d: Distancia en Kilómetros

### MODELO DE DOS RAYOS

A diferencia del anterior esta toma en cuenta la altura de las antenas receptoras y transmisoras llegando a la siguiente fórmula:

$$L_p(\text{dB}) = 40\log d - (10\log G_t + 10\log G_r + 20\log + 20\log h_r + 20\log h_t) \quad (3)$$

Donde:

**$L_p$  = Pérdidas por trayectoria en dB**

**d: distancia en kilometros**

**$G_r$  = Ganancia de la antena receptora dB**

**$G_t$  = Ganancia de la antena transmisora dB**

**$h_r$  = Altura de la antena receptora en metros**

**$h_t$  = Altura de la antena transmisora en metros**

### MODELO OKUMURA

Este modelo es ideal para ambientes urbanos y se utiliza dentro de las frecuencias que van desde los 150 MHz a 1920 MHz. Las pérdidas por propagación se calculan con la siguiente ecuación:

$$L_p(\text{dB}) = L_f + A_{\text{mu}} - G(h_{\text{te}}) - G(h_{\text{re}}) - G_{\text{area}} \quad (4)$$

**$L_p$  = Pérdidas por trayectorias en decibeles**

**$L_f$ : la atenuacion por el espacio libre**

**$A_{\text{mu}}$ : atenuacion relativa pormedio**

**$G(h_{\text{te}})$ : Ganancia de la altura de la antena TX**

**$G(h_{\text{re}})$ : Ganancia de la altura de la antena RX**

**$G_{\text{area}}$ : Ganancia debida al tiempo ambiente**

### MODELO OKUMARA HATA

Es una fórmula empírica de la pérdida de propagación de los datos formulada por Okumura, y es válida para el rango de frecuencias VHF y UHF que va desde los 150 MHz hasta los 15000 MHz (Xirio, OKUMURA-HATA, s.f.). Esta fórmula presenta las pérdidas dentro de un área urbana como una fórmula estándar:

$$L_{50}(\text{urbano})(\text{dB}) = 69.55 + 26.16\log f_c - 13.82\log h_{\text{te}} - a(h_{\text{re}}) + (44.9 - 6.55\log h_{\text{te}})\log d \quad (5)$$

Para lo cual se tiene las definiciones:

$f_c$ : frecuencia portadora (MHz)

$h_{te}$ : altura de antena transmisora en (m) en rango 30 a 200 metros

$h_{re}$ : altura de antena receptora en (m) en rango 1 a 10 metros

$a(h_{re})$ : factor de corrección para altura efectiva de la antena móvil que es función del tipo de área de servicio.

$d$ : distancia entre transmisor y receptor.

Para usar esta fórmula se debe tener estas consideraciones:

$$150 \text{ MHz} < f_c < 1500 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} < h_{te} < 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_{re} < 10 \text{ m}$$

El factor de corrección de la antena se define según el tamaño de la ciudad. Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7) h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \text{ dB} \quad (6)$$

Para ciudades grandes el factor de corrección se define como

$$a(h_{re}) = 8.29(\log 1.54 h_{re})^2 - 1.1 \text{ dB para } f_c < 300 \text{ MHz} \quad (7)$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log 11.75 h_{re})^2 - 4.97 \text{ dB para } f_c > 300 \text{ MHz} \quad (8)$$

Este modelo se adapta muy bien para el diseño de sistemas de gran escala.

### **MODELO COST 231 (WALFISCH-IKEGAMI)**

Este es un modelo semi-empírico de predicción de las pérdidas en un trayecto que resulta de la combinación de los modelos Wafisch-Bertoni y el modelo Ikegami. Este modelo es utilizado para escenarios urbanos y suburbanos; y que presenta buenos resultados de pérdidas en trayectos de antenas transmisoras que se encuentren por encima de las alturas medias de los tejados. A diferencia de otros modelos precedentes, este modelo posee algunos parámetros extra en el proceso de cálculo que ayudan a obtener resultados más exactos de pérdidas entre transmisor y receptor. Además de esto, el rango de frecuencias en

el cual puede usarse es mucho mayor, ya que este va desde los 800 a los 2000 MHz (Xirio, COST 231, s.f.). los parámetros adicionales que este modelo toma en cuenta son los siguientes: Altura de los edificios, ancho de las calles, separación entre edificios y la orientación de la calle con respecto a la dirección de propagación.

El modelo COST 231 calcula tres tipos de pérdidas, las cuales se suman y de esta suma se obtienen las pérdidas totales. Estas pérdidas son; las pérdidas en el espacio libre, la pérdida por difracción del tejado a la calle y la pérdida provocada en el interior de la calle donde se ubica el receptor, como resultado de la difracción en el tejado adyacente y como parte de esta misma, la pérdida de difracción multipantalla.

Este modelo posee ciertas restricciones en su uso, estas se detallan a continuación:

- $F = 800 - 2000$  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 son los siguientes:

- $h_r$ : altura media de los edificios (m)
- $w$ : anchura de la calle (m)
- $b$ : separación media entre edificios (m)
- $\phi$ : 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)

Las pérdidas en trayectos sin visibilidad directa se modelan con las siguientes ecuaciones:

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (9)$$

$L_{bf}$  = Son las pedidas en condiciones de espacio libre.

$L_{rts}$  = perdida por difraccion terraza-calle entre la terraza de los edificios y el movil

$L_{msd}$  = es una estimacion de la difracción multiobstaculo entre Tx y el edificio próximo al Rx



## **CAPÍTULO II - SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS Y DISPOSITIVOS PARA RED LORAWAN**

### **DISEÑO DEL PROTOTIPO**

La construcción de este prototipo requiere de ciertos componentes que funcionen de manera óptima, que permitan la transmisión y recepción de datos a grandes distancias; que permitan una actualización constante de datos para monitoreo en tiempo real de alguna propiedad física medida a través de los sensores y que, a su vez, permita la visualización de estos datos en una plataforma.

Para lograr esto, se necesitan gateways, nodos LoRaWAN, sensores, entre otros dispositivos. Para una optimización de los recursos es necesario realizar una comparativa de las tecnologías disponibles y escoger la mejor opción disponible en el mercado que se adapte a las necesidades del proyecto y a los objetivos planteados al inicio de este.

### **COMPARATIVA ENTRE NODOS LORAWAN**

#### **MKR WAN 1300**

MKR WAN 1300 es la primera placa que incluye la tecnología LoRa lanzada por Arduino, siendo una solución práctica y de bajo consumo de energía. Esta placa permite la conexión con Arduino IoT Cloud, a una red LoRa mediante Arduino PRO-GATEWAY, conexión con Things Network u otras placas mediante conexión directa (Arduino, s.f.).

Esta placa posee un diseño MKR Zero Board lo cual le permite soportar aplicaciones de 32 bits, incorpora una memoria flash de 256 KB y 32 KB RAM; puede funcionar con dos baterías de 1,5V e integra conectividad a internet.

El MKR WAN 1300 usa el módulo Murata CMWX1ZZABZ Lo-Ra modulo que lleva el transceiver Semtech sx1276 para la comunicación Lora y el procesador Arm Cortex-M0 SAMD21 de 32 bits. El precio de esta placa se encuentra alrededor de los \$55 más gastos de envío a El Salvador. Este producto no se encuentra disponible en comercios dentro del territorio nacional.



*Figura 20: Placa MKR WAN 1300 de la marca Arduino.*

## **DRAGINO SX127X**

El Dragino SX127x permite al usuario enviar datos con distancias largas y velocidades bajas de datos. Proporciona comunicación de espectro ensanchado de rango largo y alta inmunidad a interferencias minimizando el consumo de corriente.

Este Shield utiliza el chip Semtech SX1276/SX1278 para la comunicación LoRa y está enfocado a aplicaciones profesionales de redes IoT que utilicen sensores como por ejemplo en sistemas de riego, medición inteligente de parámetros físicos, ciudades inteligentes, automatización de edificios, entre muchas más.

Al usar la modulación SX127x puede utilizar una sensibilidad de más de -148dBm en la recepción de datos, incluyendo también un amplificador de potencia de +20 dBm haciéndolo ideal para las aplicaciones que requieran rangos largos de distancia de comunicación (Dragino, 2023). Esta placa se puede conseguir por un precio alrededor de los \$60 más los gastos de envío a El Salvador. Este producto puede adquirirse únicamente por importación.



*Figura 21: Placa Dragino sx127x compatible con Lora.*

## **TTGO ESP32 OLED**

La placa OLED TTGO LoRa32 es una placa de desarrollo ESP32 que incluye el chip SX1276 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. Esta placa posee una comunicación mayor a 1 km de distancia entre dispositivos, alta inmunidad a interferencias y bajo consumo de energía y es compatible con las frecuencias sin licencia disponibles en el mundo, frecuencias que se habló en las secciones anteriores.

El chip SX1276 basado en ESP32 posee una alta sensibilidad de hasta -148 dBm, potencia de salida de +20 dBm, circuito de carga con batería de 3.3 a 7V, velocidad de datos de 150 Mbps y sensibilidad del receptor hasta -98 dBm, rango de temperatura de funcionamiento de -40 C° a 90 C° y conexión Wi-Fi lo cual lo hace ideal para aplicaciones amateur y semiprofesionales (LILYGO, 2023). El precio de esta placa se encuentra en el rango de los

\$15, más costos de envío a El Salvador. Tampoco puede obtenerse directamente dentro del país, por lo cual, es necesaria su importación.



Figura 22: Placa TTGO ESP32 a usar en el prototipo.

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los dispositivos estudiados.

Tabla 5: Comparativa de dispositivos para nodos LoRa.

características	Arduino MKR WAN 1300	DRAGINO SX127X	TTGO ESP32 V1.0
<b>Microcontrolador</b>	SAMD1 Cortex -M0 32 bits	Compatible con placa Arduino uno	ESP32
<b>modulo LoRa</b>	Murata CMWX1ZZABZ	Semtech SX 1276/SX1278	SX1276
<b>Voltaje de alimentación</b>	USB/Vin 5V	3.3v a 5v placa Arduino	3.3 - 7 V
<b>memoria flash</b>	256 kB	256 kB	256 kB
<b>Antena</b>	2 dB	2 dB	2 dB
<b>Frecuencia</b>	433/868/915 MHz	915/868/433 MHz	915/868 Mhz
<b>Potencia de transmisión</b>	18.5 dBm	20 dBm	20 dBm
<b>Sensibilidad del receptor</b>	-135 dBm, 125 kHz BW, SF=12	-148 dBm, 125 khz BW, SF=12	-148 dBm, 125 Khz BW, SF=12
<b>Conectividad</b>	Wifi, Bluetooth, Lora	Lora	Wifi, Bluetooth, LoRa
<b>Precio</b>	\$48.80	\$60	\$15
<b>Disponibilidad en el mercado</b>	Por importación	Por importación	Por importación

En el mercado existen varios dispositivos compatibles con la tecnología LoRa, pero se han escogido estos tres dispositivos porque cumplen con las características de precios, conectividad y compatibilidad con los sensores a utilizar, realizando así el siguiente cuadro comparativo entre los dispositivos.

**Síntesis de comparativa:** De los dispositivos estudiados para su uso como nodos de la red LoRaWAN, presentan algunas similitudes, ya que pueden ser programados a través del IDE

de Arduino, poseen una memoria similar, trabajan en los mismos rangos de frecuencias salvo por la placa TTGO ESP32 que no trabaja en la frecuencia de 433 MHz; la potencia de transmisión es similar en prácticamente todas salvo por la placa Arduino MKR WAN 1300 que posee una potencia de 18.5 dBm; la sensibilidad del receptor es mayor en las placas DRAGINO y TTGO, sin embargo, la placa DRAGINO presenta el inconveniente de que su compatibilidad es exclusivamente con la tecnología LoRA a comparación de las otras dos, las cuales, también presentan compatibilidad con Wi-Fi y bluetooth.

Todas estas placas son obtenibles solamente por importación, lo cual aumenta el precio final y ya que el objetivo es implementar una red con el menor costo posible, la opción ideal es la placa TTGO LoRa32, pues como se observa, presenta características similares a las otras placas y posee un costo más accesible. Además, presenta un circuito de carga integrado que posibilita su acople con una fuente de energía, por ejemplo, una batería o un panel para su alimentación. En cuestión de tamaño, es la más compacta por lo que su transporte resulta mucho más práctico.

## COMPARATIVA ENTRE GATEWAYS

### LG308N LoRaWAN Gateway

Este gateway permite conectarse a una red inalámbrica LoRa a una red IP a través de WIFI, Ethernet, red celular 3G o 4G, permitiendo el envío de datos en distancias extremadamente largas a velocidades de datos bajas ideal para funciones con aplicaciones IoT. El LG308N tiene bandas de frecuencias LoRaWAN preconfiguradas para ser usadas en diferentes países y tiene la opción de poder personalizar a la banda de frecuencia usada en su propia red LoRa.

Entre sus características están que trabaja con sistema Linux, 10 rutas de modulación paralelas programables, sensibilidad de hasta -142,5 dBm y entre sus aplicaciones se ubica en edificios inteligentes, agricultura inteligente, fábrica inteligente, medición inteligente (Dragino, 2023). Se puede encontrar en el mercado por un precio de \$218.70 más gastos de envío al país. Este producto no se encuentra disponible en el territorio nacional.



Figura 23: Gateway Lora LG308N.

### **LG01-N Single Channel LoRa IoT Gateway**

Es una puerta de enlace LoRa de un solo canal de código abierto. Se puede conectar a una red inalámbrica LoRa a una red IP a través de WiFi, Ethernet o celular 3G/4G a través del módulo LTE. El dispositivo trae un módulo LoRa SX1276/SX 128 para la comunicación LoRa, soporta hasta 300 nodos y las bandas disponibles a usar son 433/868/915/920 MHz permitiendo así un alcance máximo de 5-10 Km.

El LG01-N permite la conexión 4G LTE sus especificaciones (Dragino, 2023) son:

- Módulo Quectel EC25 LTE
- Ranura micro SIM
- Antena 4G interna + Antena Adhesiva 4G externa.
- velocidad de bajada hasta 100 Mbps y subida de 50 Mbps
- Cobertura LTE, UMTS/HSPA+ y GSM/ GPRS/EDGE
- tecnología MIMO

Se puede encontrar en el mercado por un precio de \$277.5 más gastos de envío al país. Este producto solo puede adquirirse por importación.



*Figura 24: LG01-N Single Channel LoRa IoT Gateway.*

### **TTGO ESP32 OLED**

La placa TTGO LoRa32 V1.0 es compatible con arduino y combina el módulo Wifi ESP32 junto con una pantalla OLED permitiendo que pueda conectarse a internet y ser utilizado en aplicaciones IoT. Dispone también de un módulo LoRa que permite la transmisión de datos de forma bidireccional a grandes distancias. Las características de esta placa ya se comentaron en el literal anterior, pero se incluyen algunas que son importantes mencionarlás.

- Chip Wifi ESP32 @80 MHz - 802.11 b/g/n
- Módulo LoRa 915 MHz
- compatible con Arduino
- Pantalla OLED 128x64 pixeles (SSD1306 dirección I2C 0x3C)
- Conexión Micro USB (Alimentación y Programación)
- Antena de 2dBi con rosca SMA

El precio de la placa es de \$14 más costo de envío al país, siendo una opción accesible al bolsillo.

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de los dispositivos estudiados

Tabla 6: Comparativa entre gateways.

Características	LG308N LoRaWAN Gateway	LG01-N Single Channel LoRa IoT Gateway	TTGO ESP32 OLED V.1
Microcontrolador	Atmel AVR (Arduino)	Atmel AVR (Arduino)	ESP32
Módulo LoRa	1 modulo SX1302 y 2 módulos 1250 LoRa Transceiver	SX1276/SX1278	SX1276
Alimentación	12 V DC, 2 A	12V DC	3.3 - 7V
Memoria Flash	16 MB	16 MB	256 kB
Frecuencias de uso	2.4 ~ 2.462 GHz (Wi-Fi), 433/868/915 MHz (LoRa)	433/869/915 MHz	868/915 MHz
Potencia de transmisión	27 dBm	20 dBm	20 dBm
Sensibilidad del receptor	-142.5 dBm	-148 dBm	-148 dBm
Conectividad	Wi-Fi, LoRa, 4G LTE	Wi-Fi, LoRa, 4G LTE	Wi-Fi, Bluetooth, Lora
Rango de uso	5-10 km	5-10 km	5-10 km
Precio	\$219	\$277.50	\$15.00
Disponibilidad	Por Importación	Por Importación	Por Importación

**Síntesis de comparativa:** Para el caso de los gateways, se observa que existen opciones en el mercado especializadas para poder establecer una red IoT a través de la tecnología LoRa, en este caso, todos los productos cuentan con módulos especializados para este fin y todos son programables a través del Arduino IDE.

Al ser los primeros los primeros dos un poco más sofisticados, poseen demandas energéticas mayores, pero a su vez una mayor capacidad de memoria, pues están pensados para ser utilizados en aplicaciones profesionales y con una mayor cantidad de usuarios, sin embargo, presentan el inconveniente de ser adquiribles por un precio elevado a comparación de la placa de desarrollo TTGO, la cual posee excelentes características de emisión y recepción a las frecuencias utilizables en el país y con una mayor portabilidad y menor demanda de recursos. Al poder utilizarse tanto de transmisor como receptor, es la opción más viable.

## SENSORES A UTILIZAR

El diseño involucra la utilización de sensores los cuales medirán parámetros físicos como temperatura, calidad de aire y sensor de gas para luego ser enviados por protocolo Lora al

Gateway y este realizar la subida a internet. Existen una infinidad de sensores que pueden ser utilizados para distintas aplicaciones de trabajo, pero para esta investigación, se hace uso de los siguientes sensores, los cuales están disponibles en el mercado nacional, se encuentran a un precio accesible y su nivel de precisión es aceptable.

### **SENSOR DE TEMPERATURA INFRARROJO GY-906 MLX90614**



*Figura 25: Sensor de temperatura GY906.*

Es un sensor de temperatura infrarrojo MLX90614, permite medir temperatura de un objeto a distancia (sin contacto), el cual está diseñado para ser sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto a distancia, puede obtener lecturas desde los  $-70^{\circ}\text{C}$  hasta  $380^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $0.5^{\circ}\text{C}$ . La salida del sensor es lineal y se compensa de acuerdo con las variaciones de la temperatura ambiente (Unit Electronics, s.f.).

El MLX90614 sirve para obtener mediciones de temperatura sin contacto de alta precisión y es aplicado en sistemas de control de aire acondicionado móvil, control de temperatura en piezas industriales o en electrodomésticos o control de temperatura mediante múltiples sensores.

### **SENSOR MQ-135 GAS PARA CALIDAD DE AIRE**



*Figura 26: Sensor de calidad de aire MQ135.*

Sensor de calidad de aire cuyo funcionamiento se basa en la medición de conductividad del  $\text{SnO}_2$ .

Este sensor tiene como función principal el monitoreo y control del índice de contaminación presente en el medio ambiente, es usualmente implementado en circuitos de control en lugares como casa, sitios donde sea indispensable que se manejen niveles bajos de contaminación como industrias de compuestos químicos que puedan ser perjudiciales para la salud, etc.

Este sensor se encarga de la detección de concentración de gas en diversos porcentajes, los gases que detecta son: Amoníaco (NH<sub>3</sub>), Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), Alcohol, Sulfuros, Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), Monóxido de carbono (CO) y humo.. La señal de salida que proporciona el MQ-135 es dual, de carácter analógico y digital. Respecto a la señal analógica proporcionada, esta viene a ser directamente proporcional al incremento de voltaje. La señal digital, esta presenta niveles TTL por lo que esta señal puede ser procesada por un microcontrolador. (Naylamp Mechatronics, s.f.)

Este sensor mide diferentes tipos de gases en el ambiente y cuantifica las partes por millón presentes en cada muestra que toma, los niveles aceptables de estos son:

- 10 – 300 ppm Amoníaco (NH<sub>3</sub>) y Alcohol.
- 10 – 1000 ppm Benceno.

### **SENSOR MQ-2 DETECTOR DE GAS Y HUMO**

Este es un Módulo detector de humo y gases inflamables. Posee salida analógica y digital.



*Figura 27: Sensor MQ2 para detectar gas y humo.*

Es un sensor utilizado para medir concentraciones de gas GLP y GNV en el aire a través del humo. tiene un rango de detección de concentraciones que va desde 300 hasta 10000 ppm.

El módulo posee una salida analógica que proviene del divisor de voltaje que forma el sensor y una resistencia de carga. También tiene una salida digital que se calibra con un potenciómetro, esta salida tiene un LED indicador (Nayland Mechatronics, s.f.).

La resistencia del sensor cambia de acuerdo con la concentración del gas en el aire.

El MQ-2 es sensible a GLP, i-butano, propano, metano, alcohol, hidrógeno y humo.

Estos sensores presentan aplicaciones en diferentes campos de trabajo como por ejemplo en la seguridad al detectar gas, el confort, al detectar temperatura y en la salud al medir la calidad de aire que se respira; es por ello que se utilizan en el desarrollo del prototipo ya que abarcan muchas áreas de aplicación y su disponibilidad en el mercado es inmediata.

El listado de sensores a ser utilizados junto con sus especificaciones es el siguiente:

Tabla 7: sensores a usar en el prototipo.

<b>Sensor de temperatura GY-906</b>	<b>Detector de calidad de aire MQ-135</b>	<b>Sensor de gas y humo MQ-2</b>
Tipo: Sensor de temperatura sin contacto	Voltaje de operación: 5V DC	Voltaje de Operación: 5V DC
Módulo: GY-906	Corriente de operación: 150mA	Respuesta rápida y alta sensibilidad
Sensor: MLX90614ESF-BAA	Potencia de consumo: 800mW	Rango de detección: 300 a 10000 ppm
Voltaje de Operación: 3.3V – 5V DC	Tiempo de precalentamiento: 20 segundos	Gas característico: 1000ppm, Isobutano
Rango de temperatura ambiente de trabajo: -40°C hasta +170°C	Resistencia de carga: Potenciómetro (Ajustable)	Resistencia de censado: 1KΩ 50ppm Tolueno a 20KΩ in
Rango de temperatura de objeto: -70°C hasta +380°C	Detección de partes por millón: 10ppm~1000ppm	Tiempo de Respuesta: ≤ 10s
Precisión: ±0.5°C	Concentración detectable: Amoniaco, sulfuro, benceno, humo	Tiempo de recuperación: ≤ 30s
Ángulo de visión: 90° (FOV)	Concentración de oxígeno: 2%~21%	Temperatura de trabajo: -20 °C ~ +55 °C
Distancia para temperatura de objeto: Min. 2cm y Max. 3cm	Humedad de operación: <95%RH	Humedad: ≤ 95% RH
ADC incorporado de 17 bits	Temperatura de operación: -20°C~70°C	Contenido de oxígeno ambiental: 21%
Salida de PWM: 10 bits	Precio \$ 5.60	Consume menos de 150mA a 5V.
Protocolo de comunicación SMBUS (I2C)	Está disponible en el país	Precio: \$ 4.25
No necesita componentes adicionales		Está disponible en el país
Precio: \$16		
Está disponible en el país		

## COMPONENTES ADICIONALES

### BATERIA DE ALIMENTACION

Para que el dispositivo sea alimentado en cualquier ubicación se opta por ocupar una batería que cumpla con las características especificadas en los datos de placa del TTGO ESP32 tanto de voltaje como de corriente. La batería por usar es de 850 mA reales a 3.3 V de litio cada una alimentado así de forma correcta la placa. Esta batería cuenta con un precio en el mercado de \$4 y está disponible en el país.

### SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS PARA PROTOTIPO

En la selección de los dispositivos a usar en el prototipo se han evaluado parámetros como disponibilidad en el mercado, rango de precios de acuerdo con el presupuesto y funcionalidad y calidad de los dispositivos, asegurando tener resultados confiables y de buena calidad a un bajo costo. resultando así en la elección de los siguientes dispositivos.

*Tabla 8: Elección de dispositivos.*

<b>GATEWAY</b>	<b>NODOS LORAWAN</b>	<b>SENSORES</b>	<b>BATERIA</b>
Placa TTGO ESP32 V1.0	Placa TTGO ESP32 V1.0	Temperatura GY-906 Calidad de aire MQ 135 sensor de gas MQ2	8800 mAh a 4.2 V

### COMPARATIVA ENTRE SOFTWARES DE SIMULACIÓN DE COBERTURA

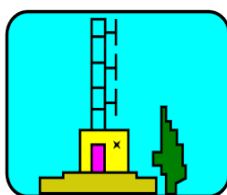
Para poder establecer una comparativa entre los diferentes métodos posibles de análisis de cobertura es fundamental contar con un simulador, pues este permite realizar un análisis en una zona definida de forma más rápida y automatizada, por tanto, se realiza una exploración de diferentes opciones existentes 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.

### RADIO MOBILE

Radio Mobile es una herramienta de simulación libre con la cual se puede verificar la factibilidad de la transmisión de los sistemas de comunicación y poder así diseñar enlaces reales previamente simulados en el software. Radio mobile incluye mapas satelitales

tridimensionales de la zona en la cual se realizará el estadio de enlace tomando en cuenta parámetros como altura de cerros y su análisis de la superficie terrestre, operando en el rango de los 20 MHz a 20 GHz basado en un modelo de propagación ITS (Irregular Terrain Model).

Radio Mobile permite ingresar la elevación real del terreno usando los datos SRTM obtenidos desde Space Shuttle Radar Terrain Mapping Mission, permitiendo también la posibilidad de agregar mapas de rutas y autopistas que se encuentren en el contorno del enlace a simular junto con las curvas de nivel. Las Especificaciones de cada unidad transmisora o receptora puede ser agregada mediante parámetros de potencia, sensibilidad, ganancia, antena, etc. Radio Mobile se encuentra destinado para uso humanitario o amateur.



*Figura 28: Software Radio Mobile*

## **XIRIO**

Es una herramienta libre que facilita la planeación y planificación de redes móviles celulares, posee diferentes características y componentes que permiten el cálculo, simulación, diseño y planeación de redes con resultados muy eficientes respecto a otras herramientas; facilita el hallazgo e implementación de diversos métodos de propagación aplicados principalmente en entornos urbanos y rurales, permitiendo además cartografía de alta resolución, configuración de parámetros radioeléctricos, entre otras características asociadas.



*Figura 29: Software XIRIO online.*

## **TOWERCOVERAGE**

Es una herramienta de creación de mapas de cobertura de radio para cualquier sitio alrededor del mundo, Los mapas generados se basan en datos reales de propagación de RF, topografía y cobertura del suelo. Se pueden crear mapas para frecuencias que oscilan entre 1 MHz y 88 MHz, así como entre 108 MHz y 80 GHz.



*Figura 30: Software Tower Coverage.*

## **CLOUD RF**

Este programa permite modelar la propagación de radio con una gran precisión, ya que posee la opción de dibujar o modelar elementos específicos del terreno que no necesariamente se encuentren en los mapas utilizados por la aplicación, estos elementos pueden ser edificaciones, zonas de vegetación, obstáculos hechos de metal, etc. mejorando esto la calidad de la simulación y permitiendo obtener datos más exactos de recepción para diferentes condiciones geográficas. Además de lo ya mencionado, otras características importantes que posee este programa son la posibilidad de trabajar con frecuencias entre los 2 y los 90000 MHz y también que es compatible con otras tecnologías además de la tecnología LoRa como lo son la tecnología LTE, 4G, 5G; y la capacidad de implementar diferentes modelos de propagación al hacer cálculos.

A continuación, se realiza una prueba para cada uno de estos simuladores con el fin de determinar cuál es el que presenta mejores resultados para posteriormente ser comparados con otros métodos de predicción de cobertura.



*Figura 31: Software Cloud RF.*

## **PRUEBAS DE USO DE SOFTWARE DE SIMULADORES DE COBERTURA**

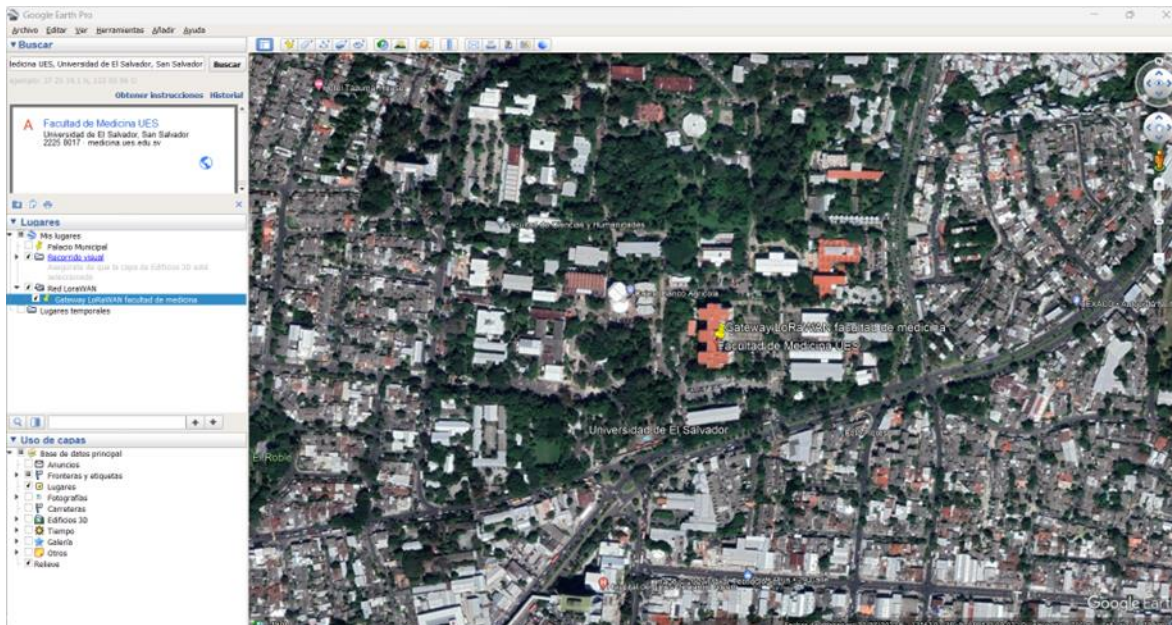
Para poder probar su funcionamiento se realiza una prueba tomando como punto de referencia el edificio de la facultad medicina, en el cual, se coloca un Gateway teórico y se realiza la simulación. Para ello, se delimitan algunos parámetros, los cuales son:

- 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 metros sobre el nivel del suelo, mientras que la receptora se coloca a 1.5 metros.
- La antena es de tipo omnidireccional.
- La ganancia de la antena es de 2dB.

Estos parámetros son delimitados de acuerdo con las especificaciones de funcionamiento del chip SX1276, el cual es el chip que utiliza la placa TTGO LoRa 32 V1 para llevar a cabo las transmisiones de este tipo.

## **SIMULACIÓN REALIZADA EN RADIO MOBILE**

Primeramente, se obtienen las coordenadas del punto donde se desea colocar la antena emisora, para ella se hace uso de Google Earth.



*Figura 32: Coordenadas de antena emisora en radio Mobile.*

Al ingresar estas coordenadas en Radio Mobile, se pueden ver de la siguiente forma:

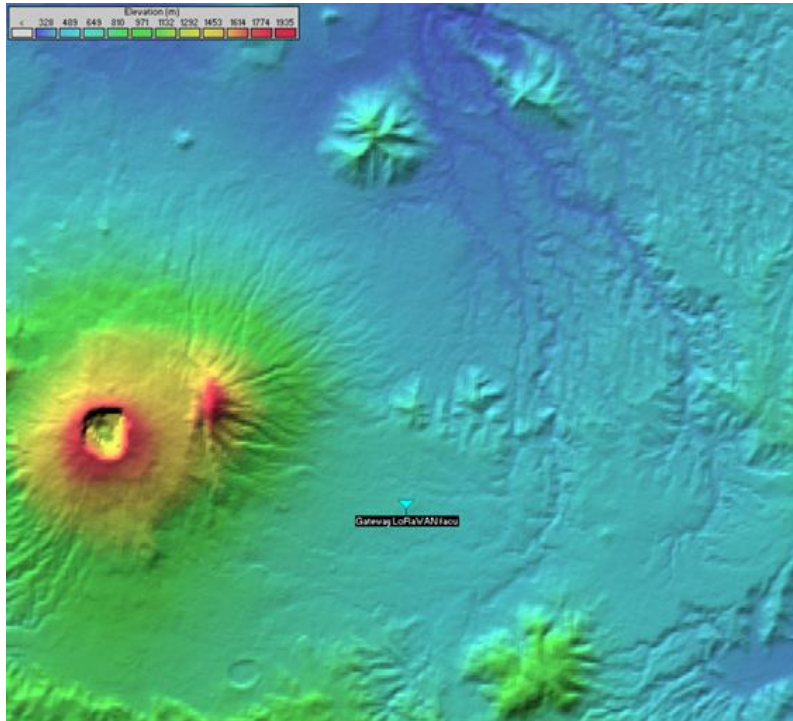


Figura 33: Visualización de coordenadas en Radio Mobile.

Ahora se procede a colocar algunos nodos de prueba para poder examinar la cobertura presente en diferentes puntos de la universidad, por tanto, se tomarán tres facultades como referencia para poder hacer el estudio, estas son la facultad de ingeniería y arquitectura, la facultad de ciencias económicas y facultad de ciencias naturales y matemáticas.

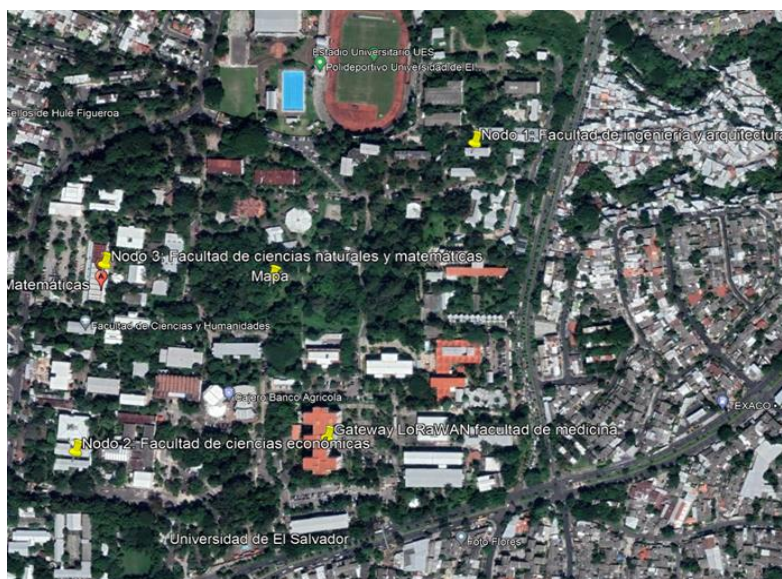


Figura 34: Ubicación de nodos de prueba en mapa de Universidad de El Salvador.

En Radio Mobile se pueden observar de la siguiente manera

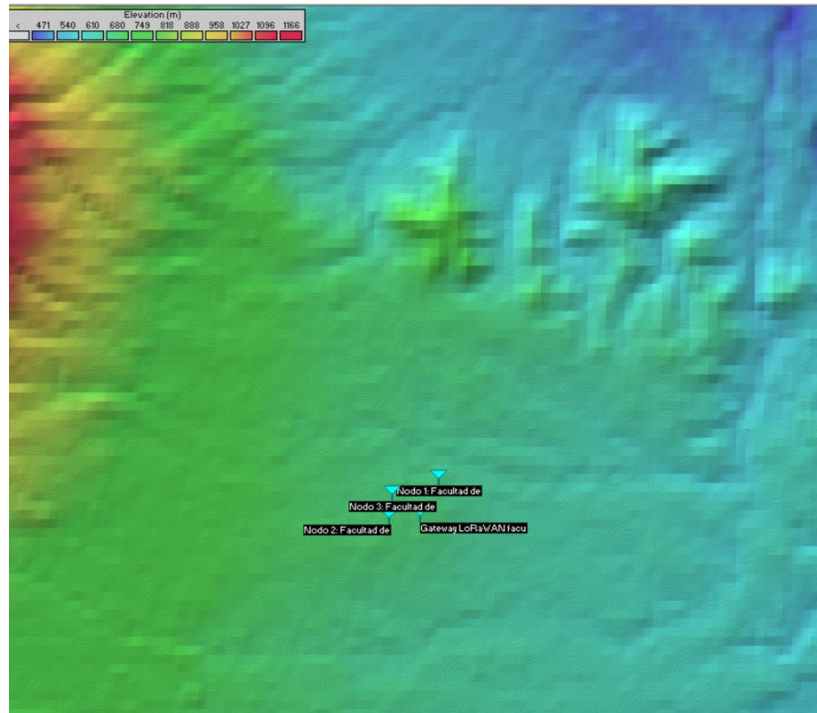


Figura 35: Visualización de nodos de prueba en Radio Mobile.

Al analizar los perfiles de elevación en Google Earth se observan los siguientes resultados:

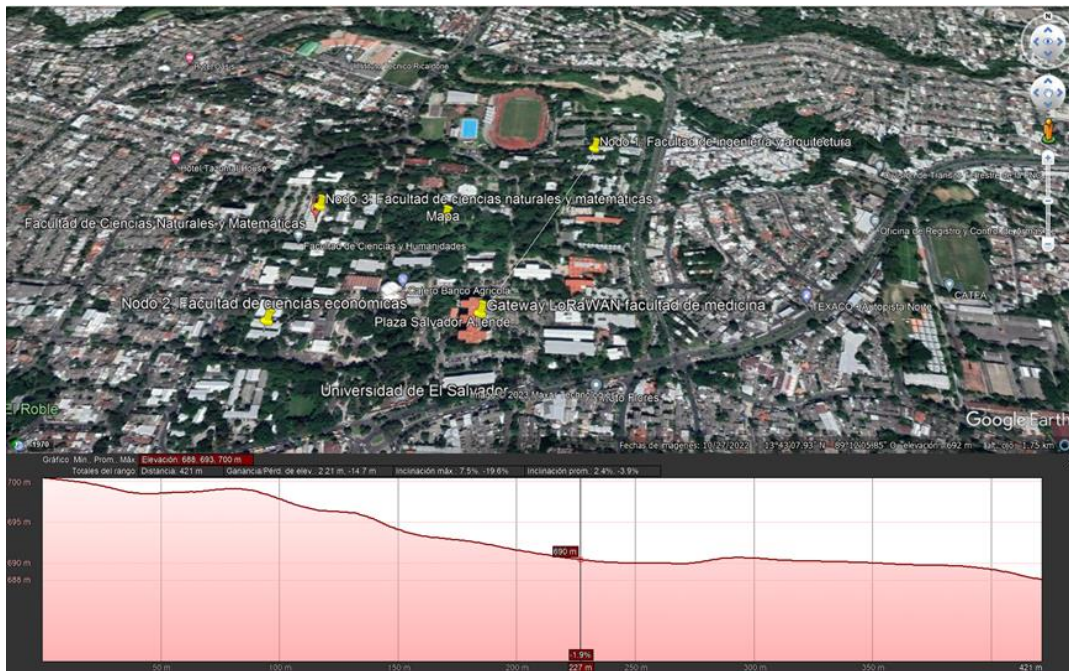


Figura 36: Perfil de elevación del Gateway al nodo 1 situado en la facultad de ingeniería y arquitectura.

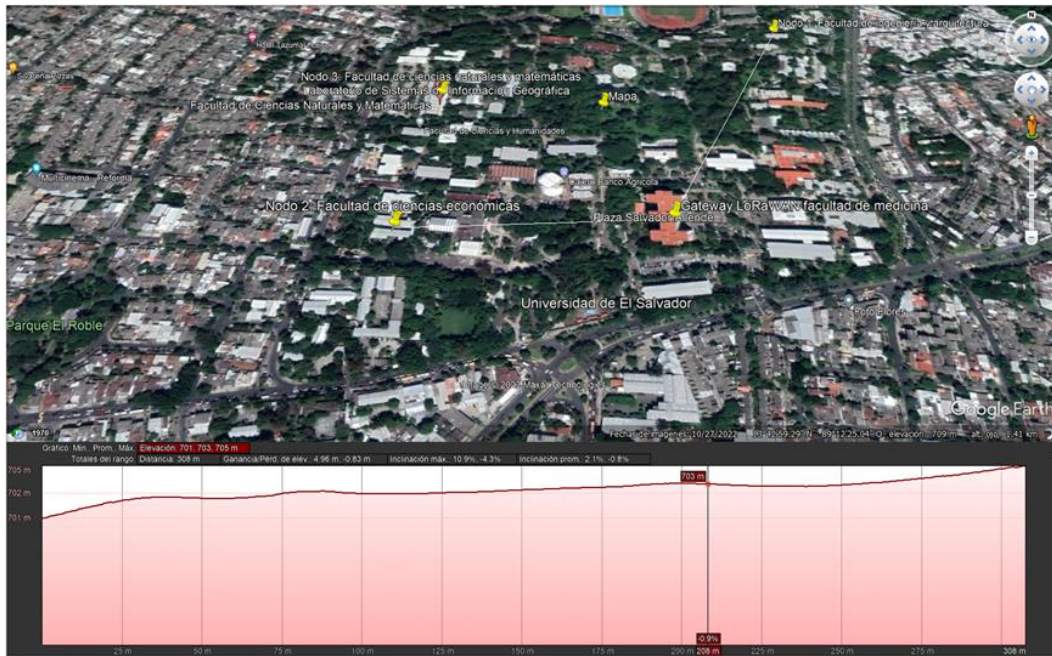


Figura 37: Perfil de elevación del Gateway al nodo 2 situado en la facultad de ciencias económicas.

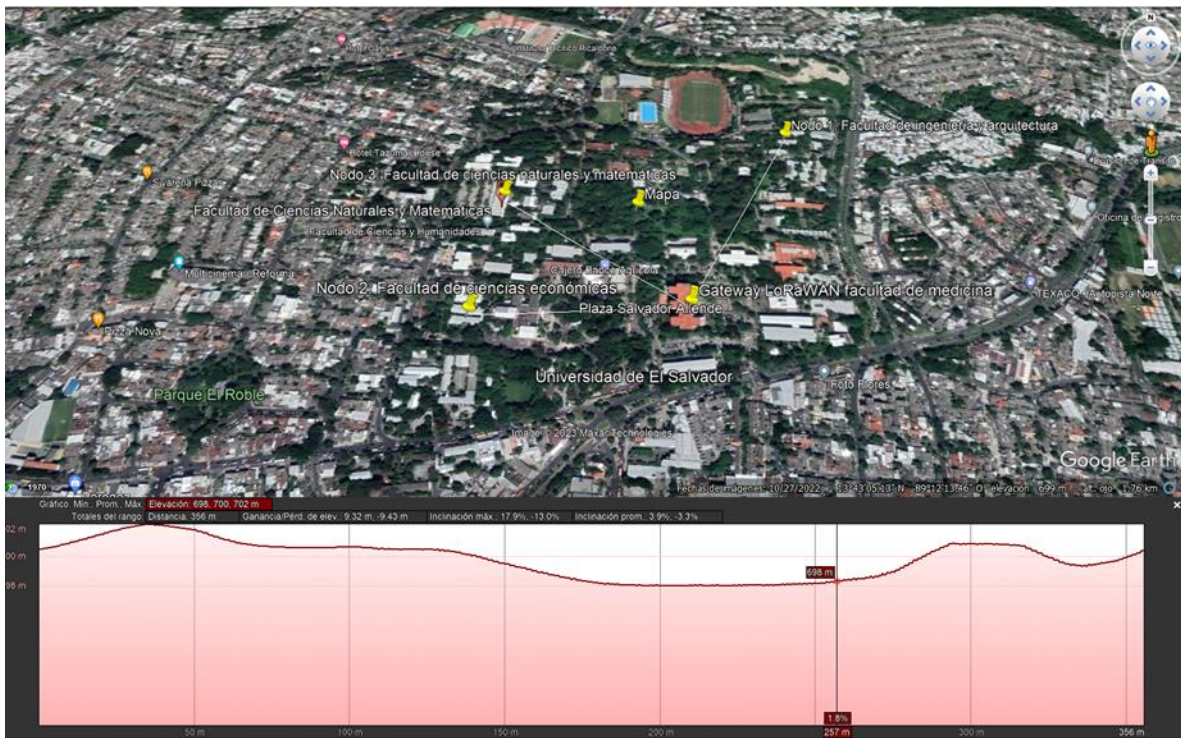


Figura 38: Perfil de elevación del Gateway al nodo 3 situado en la facultad de ciencias naturales y matemáticas.

A continuación, se crea la red y se le indican al programa las diversas características que esta posee, siendo así:

Primeramente, se indican las frecuencias entre las cuales puede trabajar la red, donde de acuerdo con la normativa de El Salvador, en resolución emitida por la superintendencia general de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), clasificada con el número No. T-446-2002, estas aplicaciones pueden realizarse en la banda de los 914-928 MHz. Luego se indica el tipo de polarización de la antena, que en este caso es vertical y el tipo de clima de la región analizada, que en este caso es un clima templado.

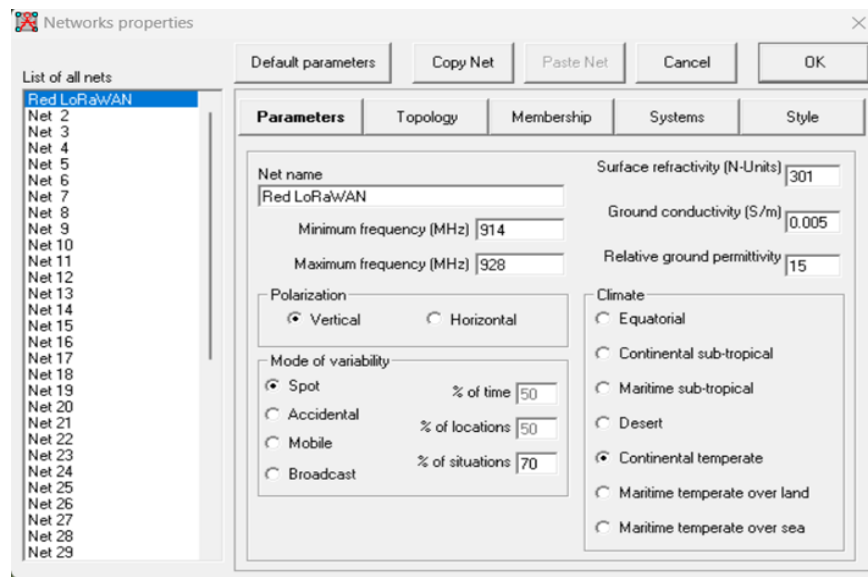


Figura 39: Configuración de parámetros a usar en simulación.

Seguidamente se indica la topología a utilizar, que en este caso será la topología tipo esclavo maestro (estrella).

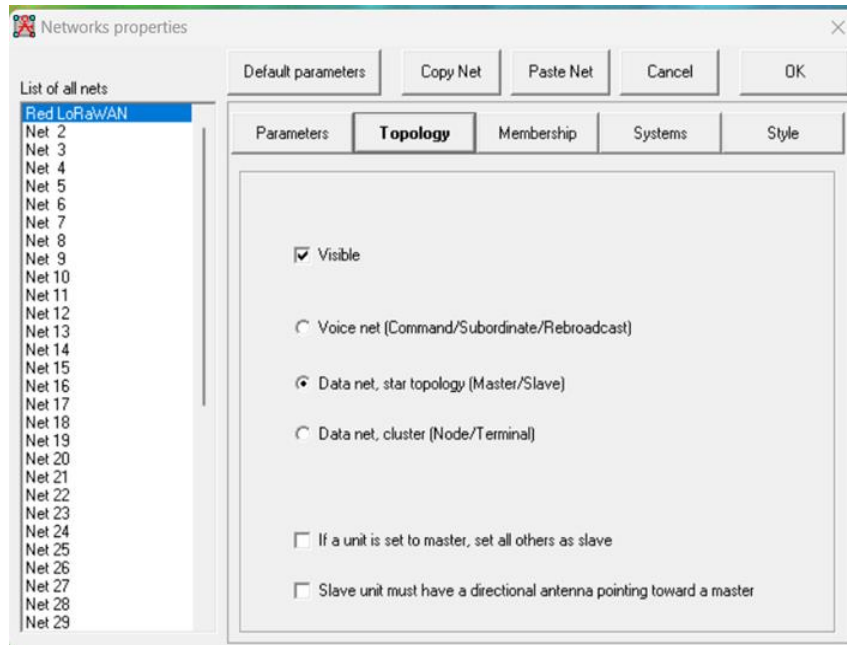


Figura 40: Configuración de topología a usar en simulación.

A continuación, se ingresan las propiedades de transmisión de la antena teniendo en cuenta datos como el umbral de recepción, la potencia de transmisión, pérdidas, ganancia y altura de la antena.

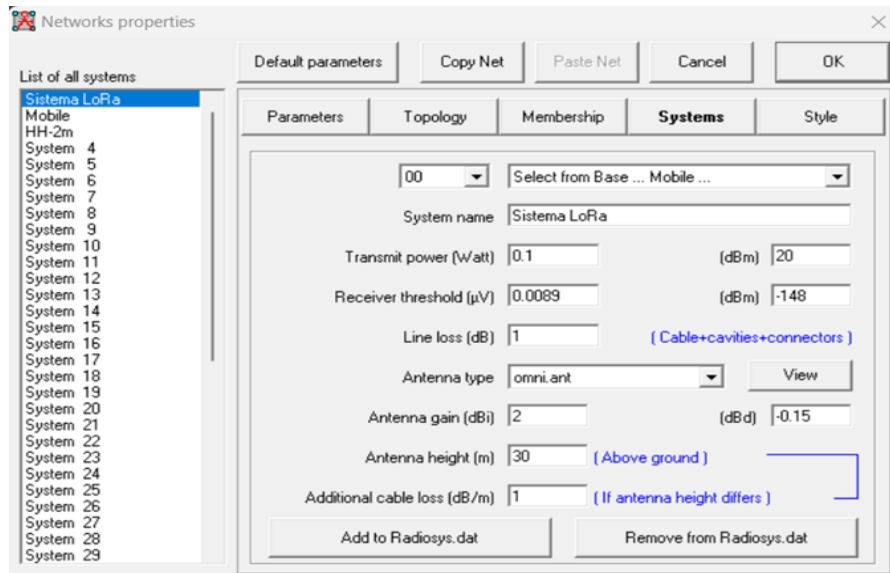


Figura 41: Configuración del sistema a usar en la simulación.

Por último, se determina el rol de cada punto en la red y la altura a la que se encuentra cada uno.

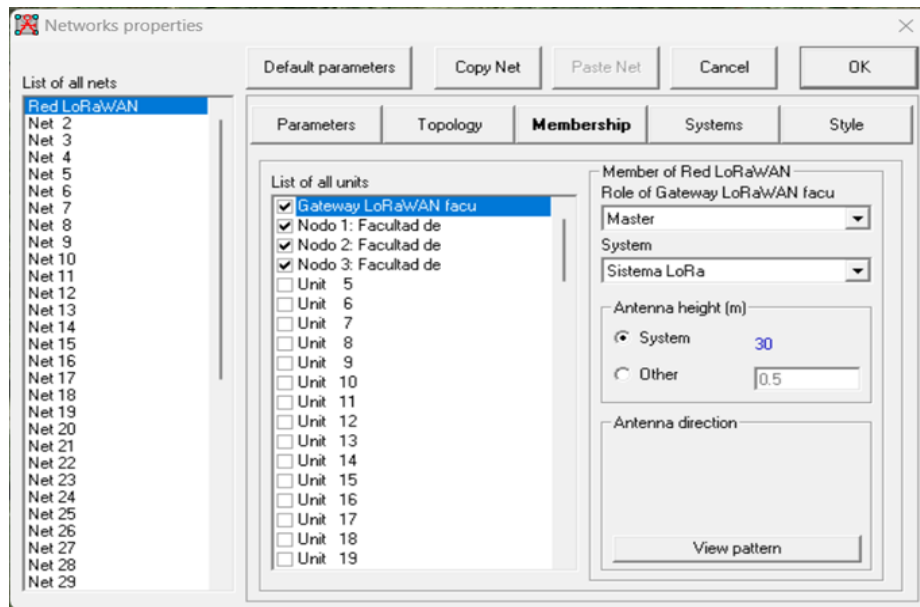


Figura 42: Configuración de altura y rol de puntos en la red.

Al hacer el análisis del enlace de radio entre los diferentes puntos, se pueden ver los siguientes resultados entre el Gateway y los diferentes nodos:



Figura 43: Enlace entre gateway y nodo 1.

Si se establece una altura del nodo 1 a 10 metros, para simular que este se encuentra ubicado en un aula en un piso superior de un edificio, se puede observar el cambio que existe en la recepción y las pérdidas por el factor urbano, en este caso el índice de pérdidas corresponde a 93.9 dB.

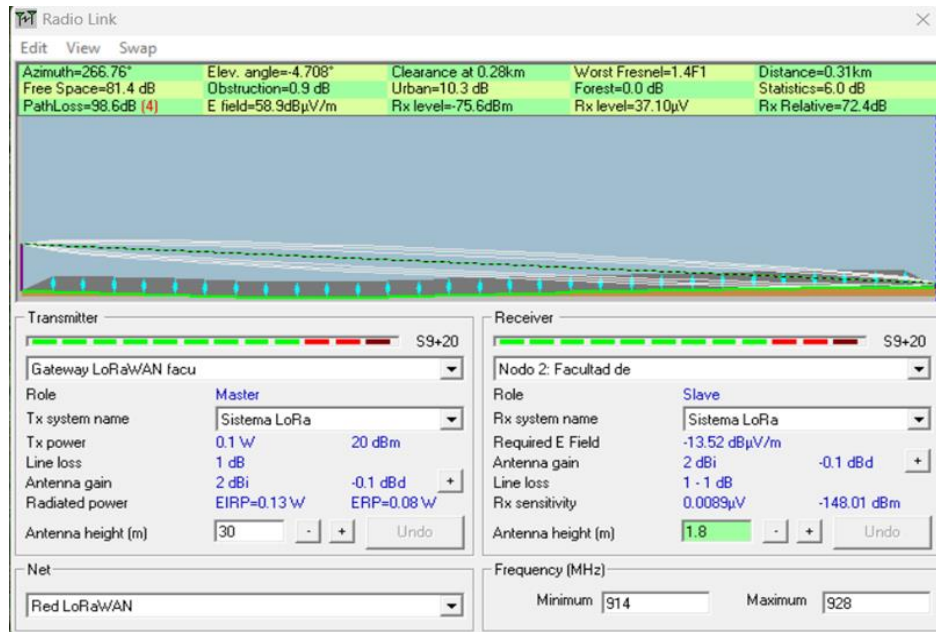


Figura 44: Resultados de simulación 1.

En la segunda simulación la altura corresponde a la de una estación cercana al suelo y aquí se observa que las pérdidas son mayores debidas a que el nivel de interferencia debido a edificios es mayor, el nivel de recepción decrece en relación con el anterior al presentar un valor de 72.4 dB.



Figura 45: Enlace entre gateway y nodo 2.



Figura 46: Enlace entre gateway y nodo 3.

La última prueba corresponde a la altura promedio de una persona y de esta medición puede observarse que, si bien existe interferencia debida a edificaciones, la cobertura es buena.

Luego de hacer el análisis, se procede a realizar el mapa de cobertura tomando como punto central el Gateway y los nodos como estaciones móviles, el mapa queda de la siguiente forma considerando un rango máximo de 2 km.

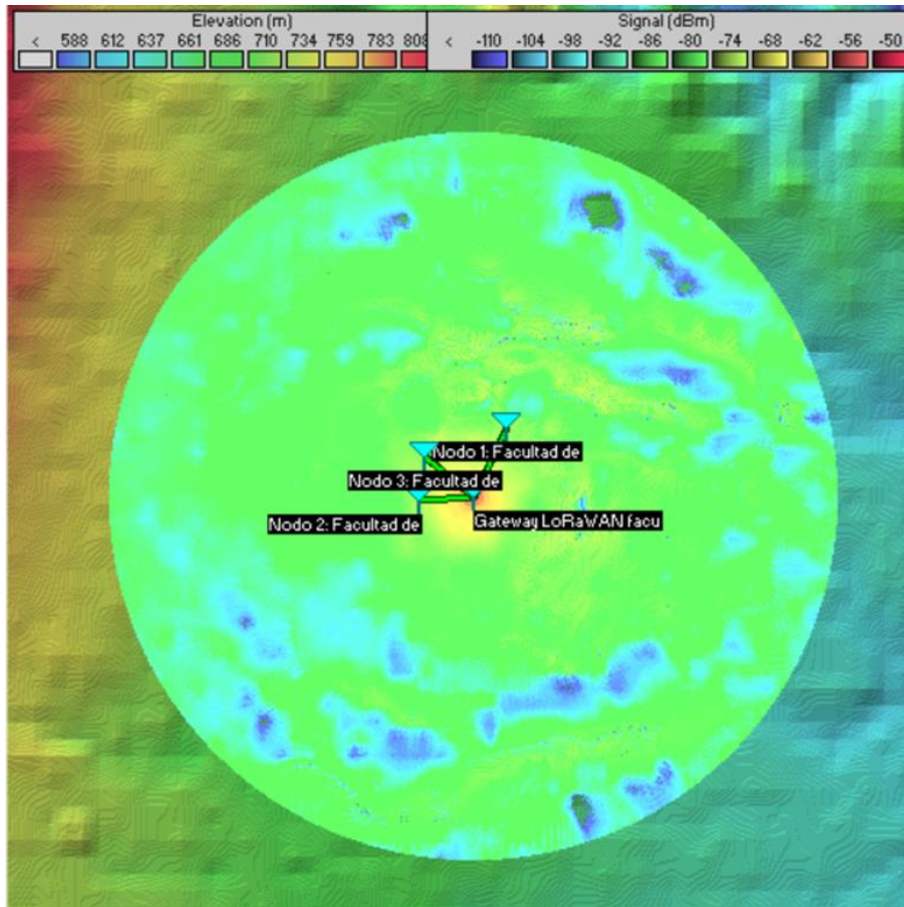


Figura 47: Visualización entre gateway y nodos en el software Radio Mobile.

Este mapa de cobertura puede ser visualizado también en Google Earth para tener una mejor perspectiva de los resultados obtenidos donde se puede observar que la cobertura obtenida para los 3 nodos de prueba es óptima, ya que presenta una señal inferior a los -108 dMb, mientras que se observa que la única región donde la señal no es tan fuerte es en las cercanías del Gateway.

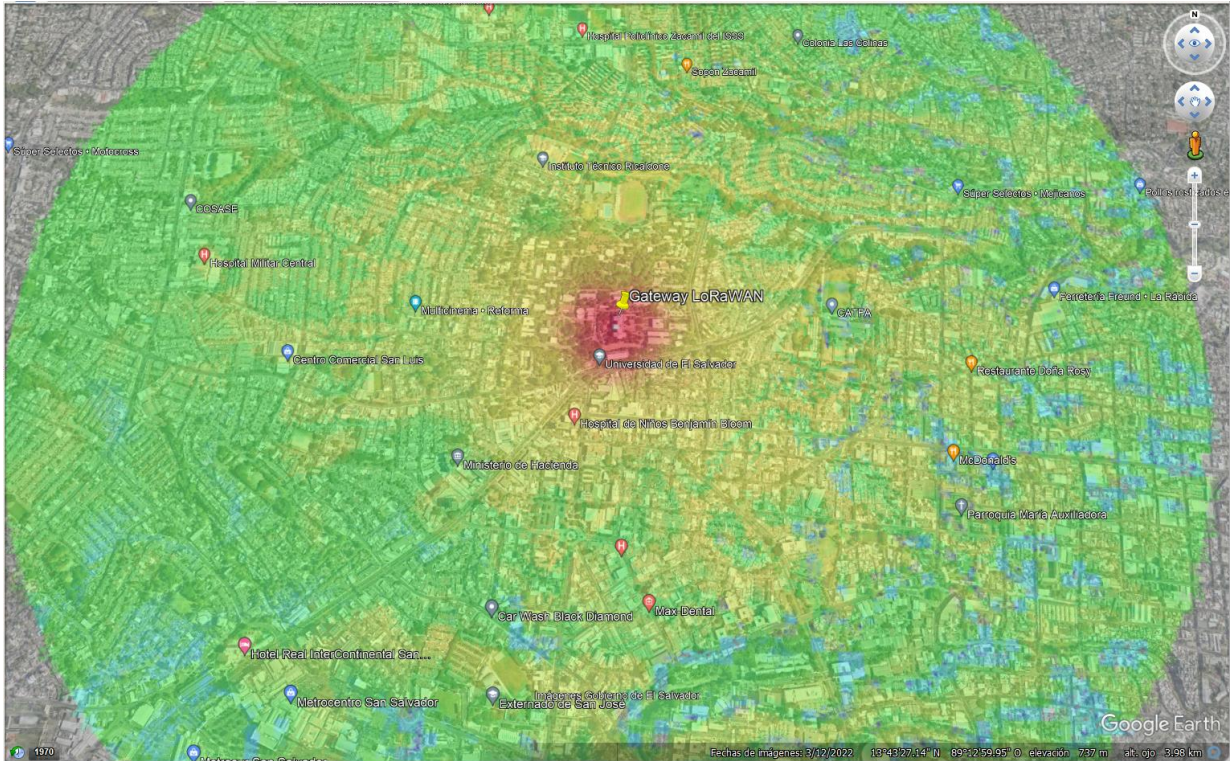


Figura 48: Visualización de cobertura simulada en Radio Mobile y exportada en Google Heart.

También Radio Mobile permite visualizar la cobertura visual desde la estación base, esta permite demostrar de una forma más real la cobertura del dispositivo en el lugar situado, esta puede verse a continuación:

**Visual coverage** ✕

<p><b>Observer</b></p> <p>Gateway LoRaWAN facu</p> <p>Sensor height above ground (m) 30</p>	<p><b>Plot</b></p> <p><input type="checkbox"/> Contour line <span style="margin-left: 20px;">Color</span></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Fill area <span style="margin-left: 20px;">Color</span></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Solid</p>										
<p><b>Azimuth range</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Minimum (°)</th> <th>Maximum (°)</th> <th>Step (°)</th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>360</td> <td>0.1</td> </tr> </table>	Minimum (°)	Maximum (°)	Step (°)	0	360	0.1	<p><b>Elevation angle range</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Minimum (°)</th> <th>Maximum (°)</th> </tr> <tr> <td>-10</td> <td>5</td> </tr> </table>	Minimum (°)	Maximum (°)	-10	5
Minimum (°)	Maximum (°)	Step (°)									
0	360	0.1									
Minimum (°)	Maximum (°)										
-10	5										
<p><b>Target</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Nap-of-the-earth <input type="radio"/> Fixed altitude</p> <p>Target height above ground (m) 1.6</p>	<p><b>Radial range</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Min. (km)</th> <th>Max. (km)</th> </tr> <tr> <td>0.001</td> <td>2</td> </tr> </table>	Min. (km)	Max. (km)	0.001	2						
Min. (km)	Max. (km)										
0.001	2										

Draw Cancel

Figura 49: Cobertura de gateway.

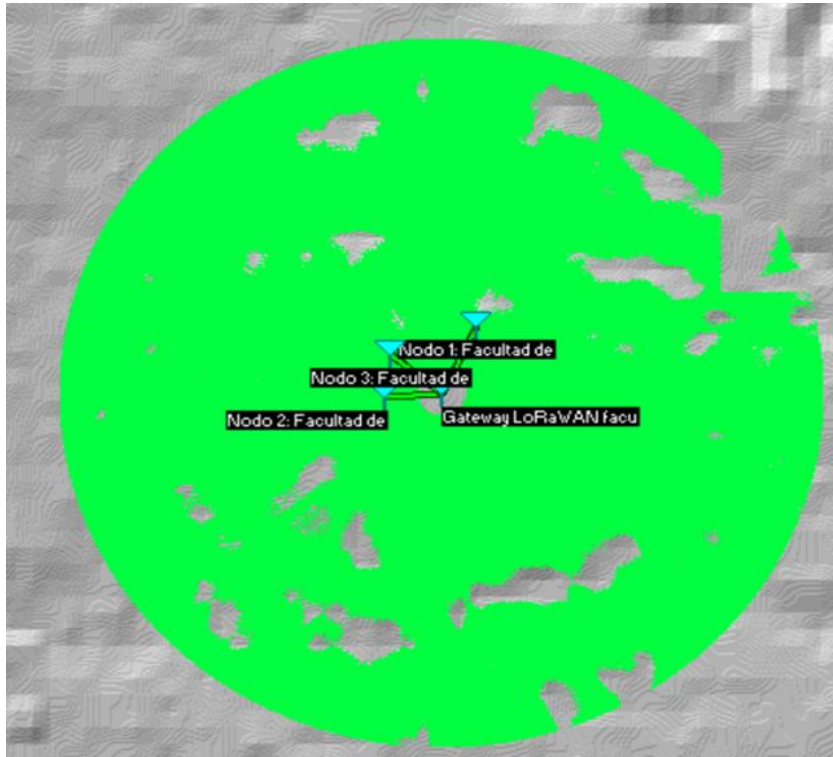


Figura 50: Visualización en Radio Mobile.

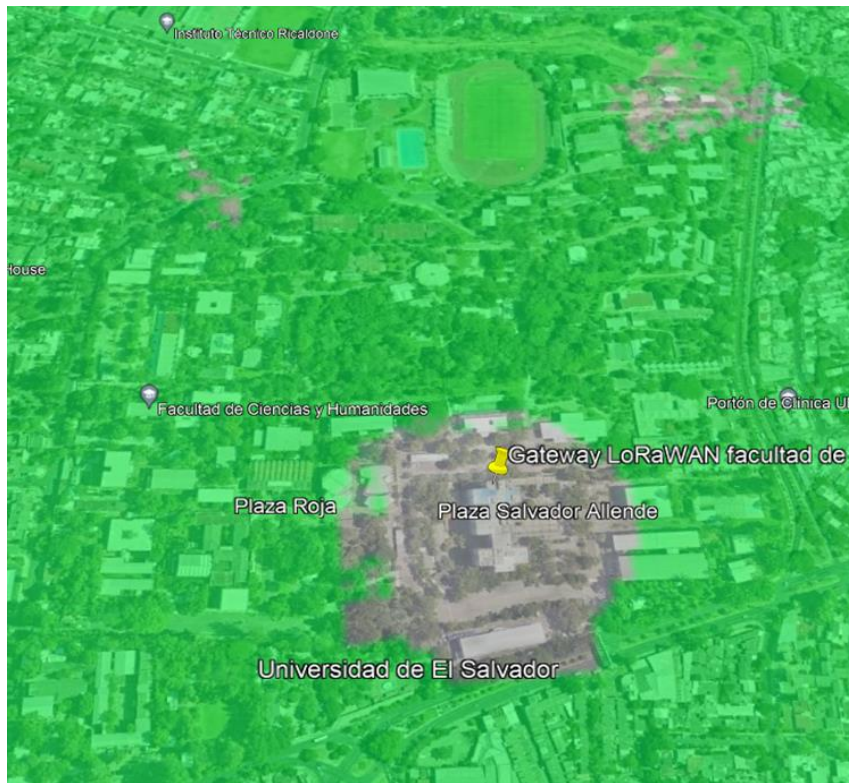


Figura 51: Cobertura del gateway vista desde Google Earth.

La figura 48 demuestra que la cobertura visual dentro de la zona de estudio no es muy buena, por la cantidad de obstáculos existentes en la línea de visión entre la estación base y las estaciones móviles, además de la altura propia de la antena que imposibilita un buen enlace con las zonas más cercanas a la antena. Sin embargo, es importante mencionar que esta modalidad de mapa no brinda datos de la potencia exacta de recepción o de pérdidas en las zonas de cobertura.

Una aspecto importante a resaltar es que si bien Radio Mobile permite realizar este tipo de estudios y que también tienen compatibilidad con Google Earth, posee la desventaja que estos estudios no contemplan las pérdidas debidas a edificios o zonas boscosas, solamente toman en consideración la elevación del terreno, por lo que la señal recibida en una prueba real no es tan fuerte como la obtenida en esta simulación, esto para el caso de las zonas urbanas como la que se ha tomado como caso de estudio.

En aquellos casos donde se desee implementar este tipo de red en zonas con prácticamente nula interferencia, este estudio realizado es muchísimo más exacto.

## SIMULACION REALIZADA EN XIRIO

Xirio online es una herramienta que permite realizar diferentes tipos de estudio tanto en entornos rurales y urbanos y posee una cartografía precisa en comparación a otros instrumentos. En este caso se realizará una comparativa entre los resultados obtenidos en esta plataforma y los resultados obtenidos en RadioMobile.

A continuación, se muestra la interfaz del programa, en el que se muestra un mapa bastante detallado y con diferentes modalidades del mismo, aquí es donde se inicia el estudio de cobertura.

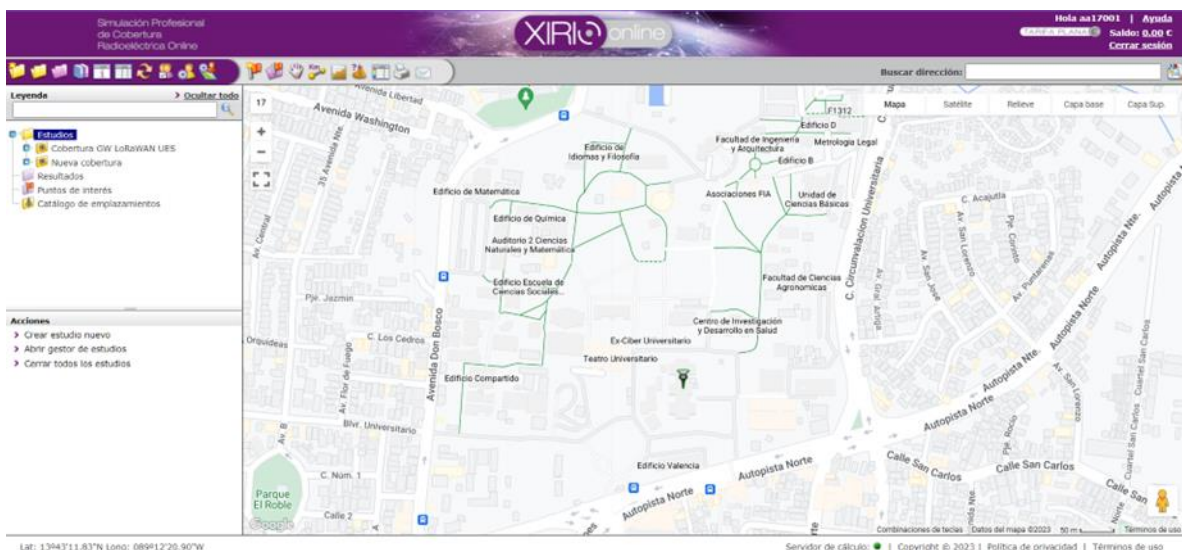


Figura 52: Pantalla de trabajo de Software XIRIO.

Al iniciar un nuevo estudio, XIRio solicita algunos datos generales acerca del análisis a realizar

Crear nuevo estudio - Google Chrome  
xirio-online.com/web/CreateNewStudy.aspx?&wizard=true

Simulación Profesional de Cobertura Radioeléctrica Online

Crear nuevo estudio

### Crear nuevo estudio

Seleccione un tipo de estudio

- Enlace
- Cobertura
- Cobertura de interior
- Cobertura multitransmisor
- Red de transporte

**Estudio de cobertura:**  
Este estudio representa valores de la señal impuesta por un transmisor, en términos de campo eléctrico o potencia, en todos los puntos dentro del área seleccionada por el usuario.  
[Leer más](#)

Seleccione un servicio o tecnología

Categoría: Internet de las cosas

Subcategoría: Internet de las cosas

Servicio: LORA WAN

Modo asistente | Aceptar

Utilizando el modo asistente podrá crear de forma sencilla estudios de cobertura. También le permitirá crear múltiples sectores en un mismo emplazamiento.

Figura 53: Creación de proyecto en simulador.

## Nombre y descripción

**Estudio**

**Nombre:** Cobertura GateWay LoRaWAN UES

Identifica el estudio en el gestor de estudios de XIRIO ONLINE.

**Servicio:** LORA WAN

XIRIO Online configura automáticamente parámetros por defecto para todos los elementos del estudio de acuerdo al servicio radioeléctrico seleccionado. Aun así, será necesario que Ud. personalice algunos de ellos.

**Descripción:**  
Prueba de cobertura para estación base ubicada en el edificio de la facultad de medicina UES.

Esta información adicional aparecerá vinculada al estudio y a los resultados del mismo cuando sean publicados.

**Banda:**

Banda del estudio que permite crear las diferentes canalizaciones y frecuencias


> [Siguiente](#) > [Cancelar](#)

Figura 54: Nombre y descripción del proyecto en simulador.

Se ingresa el nombre del transmisor y las coordenadas en las cuales se desea colocar, que en este caso se utiliza como prueba el edificio de Medicina, ya que se considera que su altura y ubicación son las óptimas para poder tener una cobertura óptima en la Universidad.

**Transmisor**

**Nombre:**


 Identifica el transmisor en XIRIO ONLINE.






---

**Coordenadas**

**Latitud:**

**Longitud:**

 Ubicación geográfica del transmisor. Introduzca directamente las coordenadas geográficas (longitud y latitud). También puede introducir coordenadas UTM (datum WGS84) mediante la calculadora de coordenadas o ubicar el transmisor pinchando directamente sobre el visor con el icono correspondiente.

-  Obtener ubicación de emplazamiento del catálogo
-  Pinchar ubicación directamente en el visor
-  Calculadora de coordenadas
-  Actualizar posición sobre el visor
-  Optimizar cota (busca una posición cercana con la cota superior)

[< Anterior](#)   [> Siguiente](#)   [> Cancelar](#)

Figura 55: Nombre y ubicación del transmisor.

Luego se ajustan los valores de la antena de acuerdo con las necesidades del usuario, así se utiliza una antena de ganancia de 2dBi, a una altura de 30 metros que corresponden a la altura del edificio de medicina, la frecuencia de funcionamiento, la polarización, pérdidas, potencia, etc.

**Parámetros de transmisión** Ayuda ?

**i** Los parámetros de radio del transmisor se han configurado automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio. Es conveniente que revise y personalice los mismos.

**Antena:**  [icon] [icon] [icon] [icon]

**Altura antena:**  m

**Orientación:**  °

**Inclinación mecánica:**  °

**Inclinación eléctrica:**  °

---

**Referencia de alturas de antenas**

**Alturas respecto a:**  ▾

**Usar altura de edificio:**  ▾

**Altura edificio:**  m

---

**Frecuencias de transmisión** +

Frecuencias
915.000 MHz <span style="float: right;">[icon]</span>

**Polarización:**  ▾

---

**Feeder:**  + ?

**Longitud del feeder:**  m

**Pérdidas del feeder:**  dB [icon]

**Pérdidas pasivos:**  dB

---

**Potencia:**  dBm ▾

[← Anterior](#)  
 [→ Siguiente](#)  
 [→ Cancelar](#)

Figura 56: Configuración de parámetros de transmisión.

Luego se colocan los valores para la antena receptora

**Parámetros de recepción** Ayuda ?

**i** Los parámetros de recepción se han configurado automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio. Es conveniente que revise y personalice los mismos.

**Antena:**  [icon] [icon] [icon] [icon]

**Altura antena:**  m

---

**Polarización:**  ▼

---

**Feeder:**  [icon] [icon]

**Longitud del feeder:**  m

**Pérdidas del feeder:**  dB [icon]

**Pérdidas pasivos:**  dB

**Factor de ruido:**  dB

---

**Umbral recepción:**  Campo  Potencia

dBm ▼

[< Anterior](#)   [> Siguiente](#)   [> Cancelar](#)


Figura 57: Configuración de parámetros de recepción.

Luego se especifica el método de cálculo de cobertura a utilizar, que en este caso se utiliza el método COST231, también conocido como Walfish-Ikegami, que es un modelo de propagación de radio, dentro del rango de frecuencia de 800 MHz a 2000 MHz y a distancias entre 0.02 a 5km, que proporciona los valores de pérdidas, para este caso entre estación base y un dispositivo móvil. Este método da una predicción bastante acertada de pérdidas teniendo en cuenta varios factores como lo son los edificios, bosques, el enlace transmisor-receptor, la altura de las antenas, etc.

**Método de cálculo**

**Nombre:**

**Método de propagación:**

 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 (MDE).

**Resolución:**  m/pixel


**Limitar la distancia máxima del cálculo**

**Límite:**  m

---

**Parámetros básicos**

**Cálculo automático de factor K**

**Factor K:**  

**Usar margen de desvanecimiento desde clutter**

**Margen de desvanecimiento:**  dB

---

**Propiedades de COST 231 Walfish-Ikegami**

**Tipo de terreno**

Ciudades de tamaño medio y entornos suburbanos con densidad moderada de vegetación

Centros metropolitanos

Figura 58: Propiedades del método de cálculo.

**Penetración en edificios**

No aplicar

No calcular en edificios

Calcular sólo en azoteas

Pérdidas fijas en edificios

Receptor ubicado en el interior del edificio

---

**Pérdidas fijas:**  dB

**Tipo de cálculo:**

**Pérdidas horizontales:**  dB/m

**Pérdidas verticales:**  dB/piso

**Metros por piso:**  m

**Receptor ubicado en el piso:**


 Si la altura del receptor es mayor que la del edificio se considerará que el receptor está ubicado en la azotea.

Figura 59: Configuración de penetración en edificios.

También se selecciona la cartografía a utilizar, donde se han seleccionado un que representa la altimetría mundial.

**Parámetros de cálculo**

Los parámetros 4G engloban un conjunto de variables que intervienen en el cálculo de las pérdidas de propagación. XIRIO ONLINE configura automáticamente estos parámetros por defecto en función del servicio radioeléctrico seleccionado. Aun así, será necesario que Ud. personalice algunos de ellos.

El método de cálculo se basa en normativa internacional y recomendaciones de organismos oficiales como la ITU y modela la propagación de la señal radioeléctrica. Es seleccionado automáticamente en función del servicio del estudio para su empleo en un entorno rural, por ello conviene revisarlo y personalizarlo teniendo en cuenta la cartografía que desea utilizar.

Nuevo  
**Método de cálculo:** Walfish-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 (MDE).

**Capas de cartografía:**

Tipo	Nombre	Año	Res. (m)
MDT	Altimetría mundial	2006	100

Seleccione las capas de cartografía digital con las que realizará los cálculos de cobertura, dispone de un amplio catálogo de cartografía desde modelos de extensión mundial a precisos modelos de elevación de edificios en ciudades.

< Anterior > Siguiente > Cancelar

Figura 60: Selección de cartografía del estudio y método de cálculo.

Se delimita la zona de estudio

**Área de cálculo**

El área de cálculo define los puntos donde se va a realizar el cálculo de señal recibida. Puede introducir manualmente las coordenadas de este área o dibujarla directamente sobre el visor.

Dibujar sobre el visor el área de cálculo

Actualizar posición del área sobre el visor

Esquina NorOeste	Latitud 13°43'27.28"N	Longitud 089°12'23.75"W
Esquina SurEste	13°42'53.04"N	089°11'55.82"W

< Anterior > Siguiente > Cancelar

Figura 61: Configuración de área de cálculo.

Finalmente, se han establecido los rangos de sensibilidad de recepción en 6 colores, los cuales van desde el color azul al rojo, siendo de color rojo las señales de menor nivel y las

azules las que presentan una mejor recepción. Teniendo en cuenta que entre más cercana a 0 es la medida de recepción, es mejor.

**Rangos de resultado**

El resultado del estudio de cobertura es una mancha de transparencia formada por múltiples colores los cuales representan el nivel de señal disponible en cada punto. Modifique los colores y los niveles de señal asociados para obtener un resultado personalizado

**Rango de señal**

Color	Rango	Descripción
Red	[-145.00 , -130.00) dBm	
Orange	[-130.00 , -115.00) dBm	
Yellow	[-115.00 , -100.00) dBm	
Green	[-100.00 , -85.00) dBm	
Blue	[-85.00 , -70.00) dBm	
Pink	[-70.00 , Infinity) dBm	

Visualizar ambos

Si ha realizado cambios en parámetros que afecten a la sensibilidad o al tipo de trayecto, debe refrescar los rangos de señal para que los valores por defecto de estos se recalculen automáticamente.

Anterior    Siguiete    Cancelar

Figura 62: Configuración de los rangos de señal.

EL resultado final del estudio de cobertura es el siguiente:

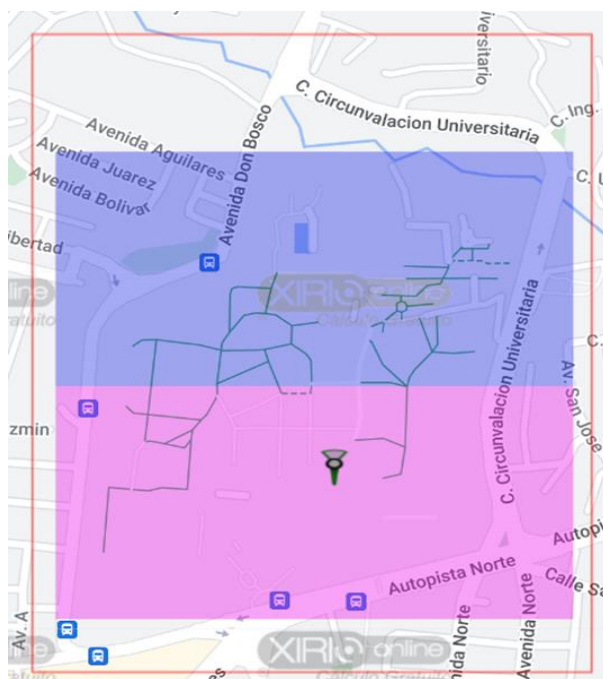


Figura 63: Resultado de estudio de cobertura.



*Figura 64: Resultados visualizados en Google Earth.*

Donde se puede observar que presenta un análisis más específico que el anterior, ya que muestra los niveles de cobertura dentro de la zona de estudio de forma más real. Sin embargo, la resolución que ofrece el programa no permite visualizar de forma óptima aquellos puntos donde la señal presenta pérdidas significativas debido a la presencia de edificaciones, vegetación, entre otros obstáculos. El programa ofrece opciones adicionales para la resolución de los mapas, sin embargo, esto implica un costo adicional y solo permite realizar el estudio una vez, por tanto, si se quisieran hacer correcciones, el costo seguiría ascendiendo.

### **SIMULACION REALIZADA EN TOWER COVERAGE**

Primeramente, se realiza un cálculo en condiciones completamente ideales, teniendo en cuenta condiciones óptimas para la radiación del transmisor, esto quiere decir, con toda la potencia del dispositivo a utilizar (TTGO LoRa 32 V1), sin pérdidas por edificios ni bosques, con el umbral de recepción considerado en toda su potencia también. A continuación, se muestran los parámetros utilizados.

Primeramente, se define el lugar donde estará ubicado el Gateway



Figura 65: Ubicación del gateway.

Después se definen los parámetros de transmisión y recepción de los dispositivos teóricos, los cuales son los siguientes:

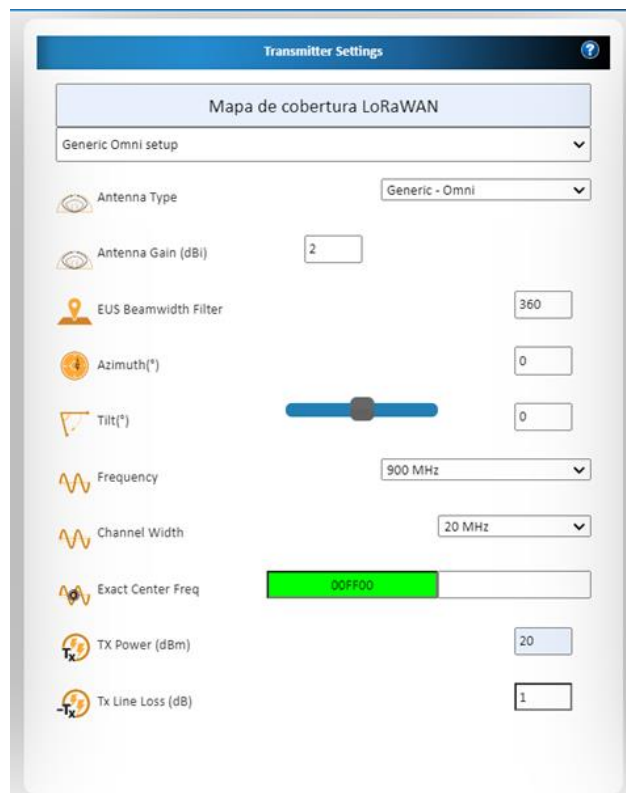


Figura 66: Configuración de los parámetros de transmisión y recepción.

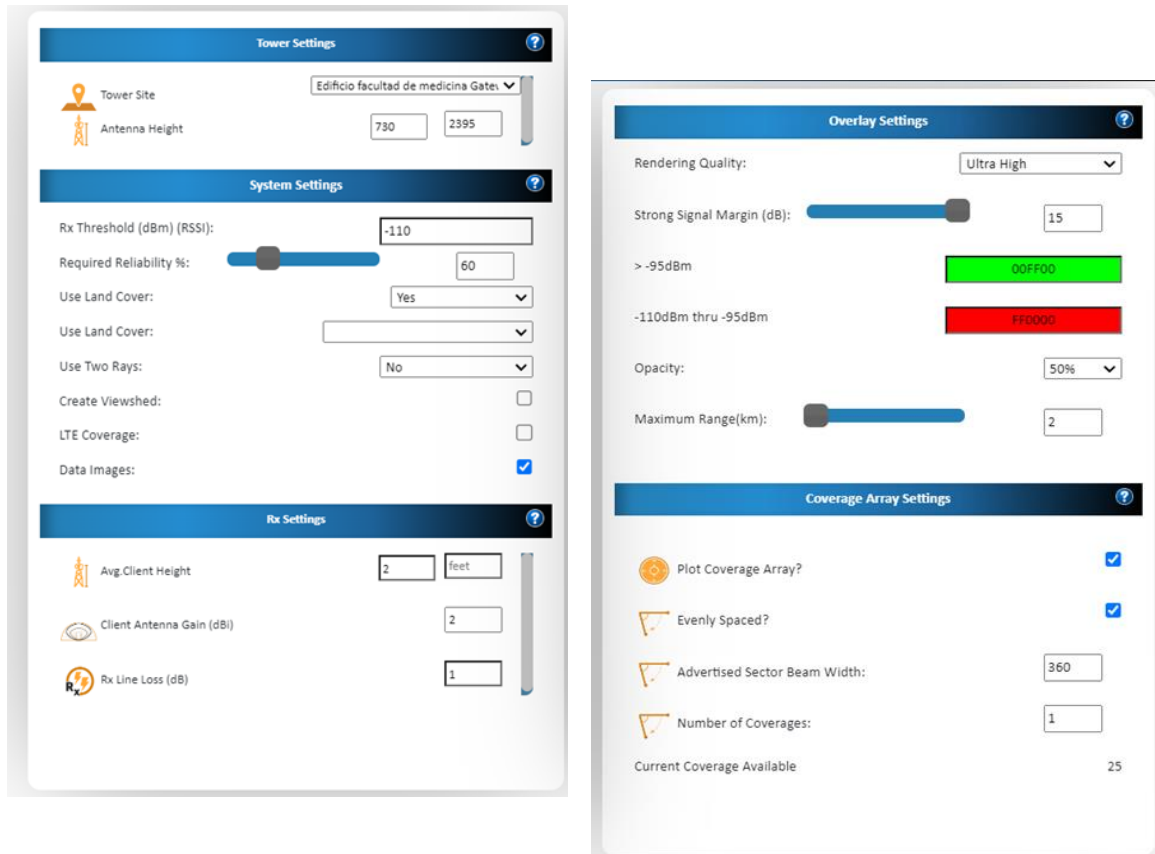


Figura 67: Configuración de parámetros de visualización de resultados.

El resultado es el siguiente:

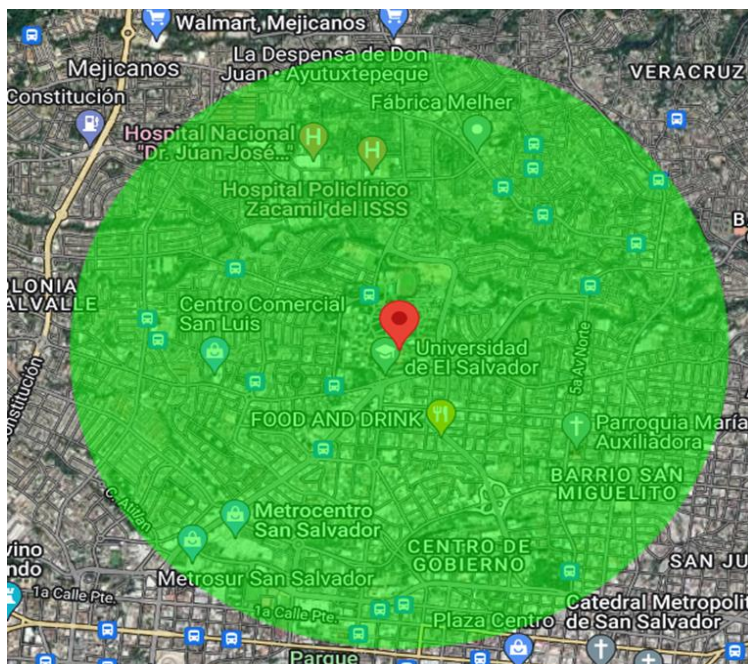


Figura 68: Resultados de simulación.

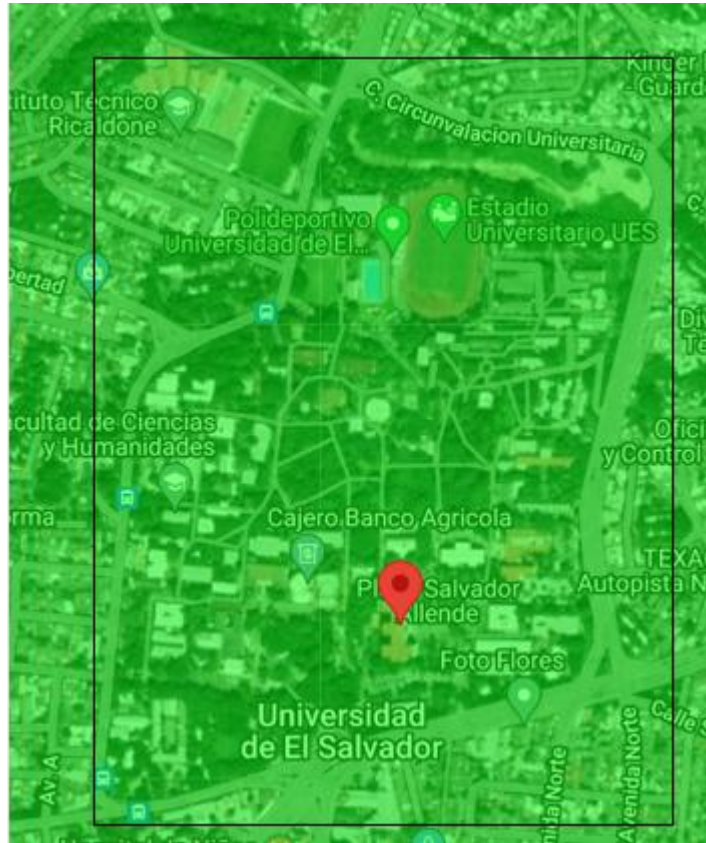


Figura 69: Cobertura en Universidad de El Salvador.

Es importante hacer énfasis en que en esta configuración no se tomó en cuenta las pérdidas por interferencias urbanas o por bosques, ya que lo que se pretende es solo mostrar la cobertura en un caso completamente ideal.

El programa permite la opción de considerar todos los puntos del mapa donde no es posible establecer una relación línea vista y con esto se puede observar el cambio drástico que existe entre un análisis y el otro.

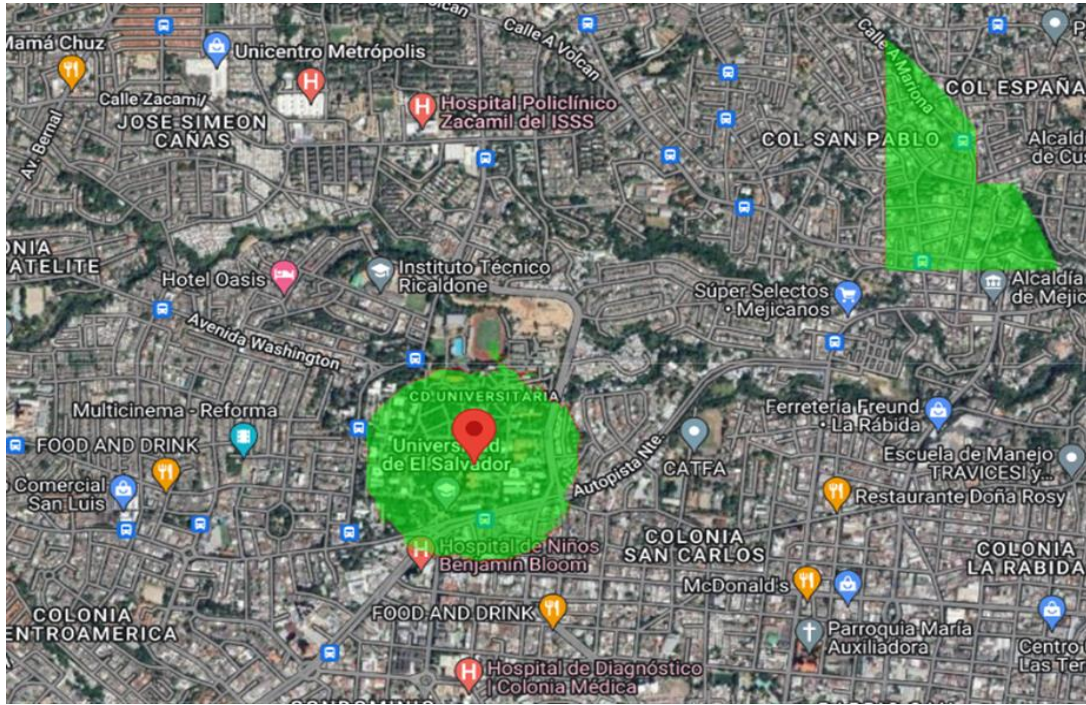


Figura 70: Mapa de cobertura de puntos accesibles solo con línea de visión.

Ya que el punto de interés es la universidad de El Salvador, se realiza un acercamiento para observar el mapa de cobertura específico de la zona, lo que muestra los siguientes resultados:

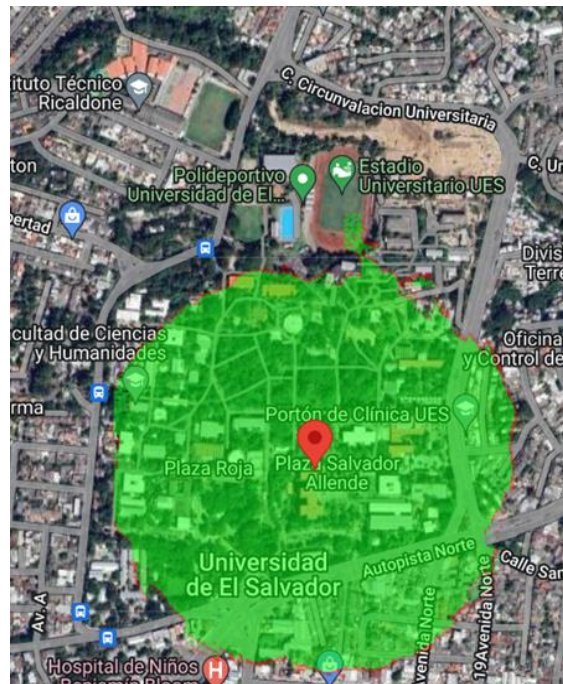


Figura 71: Cobertura en Universidad de El Salvador, segundo análisis.

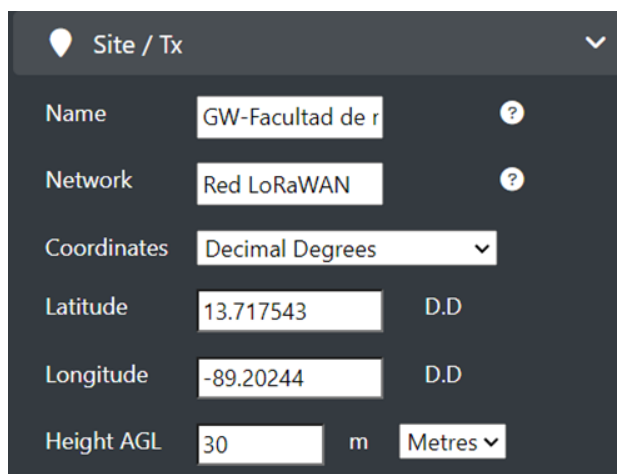
El resultado presentado por este programa se aproxima mucho a una cobertura real y permite tener un mejor panorama de los elementos necesarios para realizar el diseño de la red. En la segunda imagen se puede apreciar que el análisis de cobertura hecho para un solo Gateway situado en el edificio de medicina no es suficiente para cubrir toda la universidad, por lo que sería necesario colocar de uno a dos Gateways más para poder establecer una conexión adecuada.

De la simulación realizada se puede observar que, si bien la simulación presenta mejores resultados que en los casos anteriores, ya que considera las pérdidas por obstáculos, aún muestra una zona de cobertura demasiado amplia y que, posiblemente, la cantidad de elementos necesarios para poder establecer una red según los resultados no sería la adecuada, ya que se consideraría muy pocos elementos. Además de esto, la intensidad de la señal recibida no está bien descrita en el mapa realizado.

### **SIMULACION REALIZADA EN CLOUD RF**

Este programa presenta la ventaja con respecto al resto que tiene un mapa mucho más exacto de la geografía del país, así como de las edificaciones principales existentes en determinadas zonas, por tanto, los resultados del análisis hecho son mucho más concluyentes; además, permite ver en diferentes puntos la señal recibida o las pérdidas percibidas de acuerdo con el modelo seleccionado, que en este caso es el modelo Walfish-Ikegami.

A continuación, se definen los parámetros a utilizar



Site / Tx		
Name	GW-Facultad de r	?
Network	Red LoRaWAN	?
Coordinates	Decimal Degrees	▼
Latitude	13.717543	D.D
Longitude	-89.20244	D.D
Height AGL	30	m Metres ▼

*Figura 72: Ubicación de gateway.*

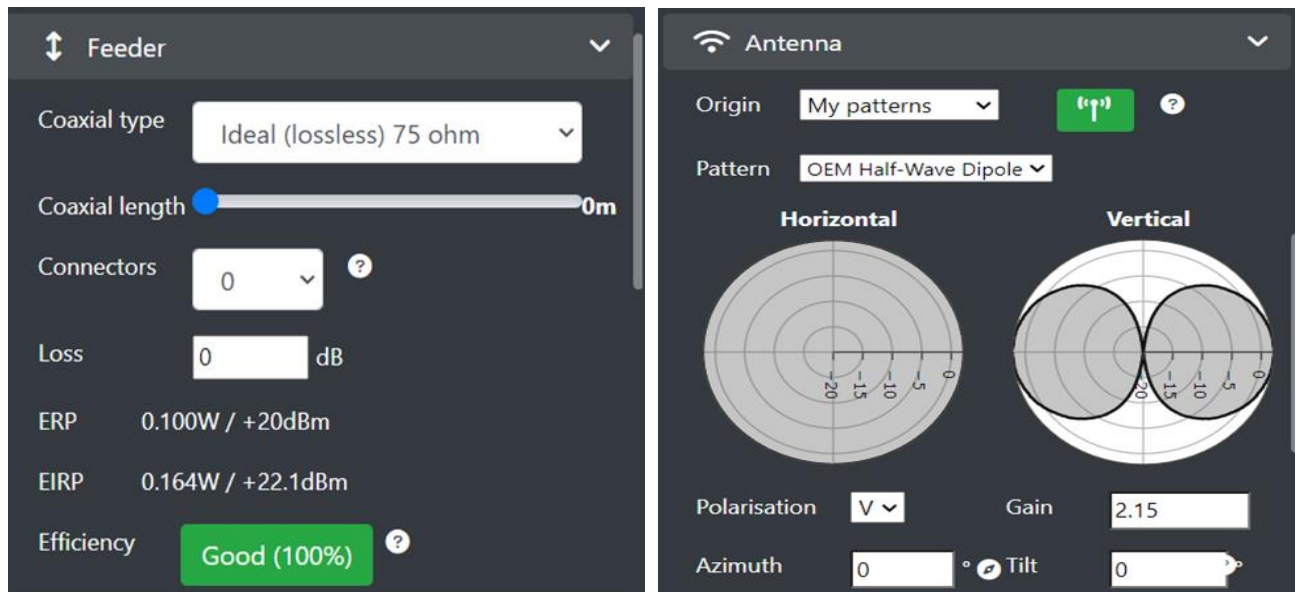


Figura 73: Parámetros de antena de gateway, cables y conectores.

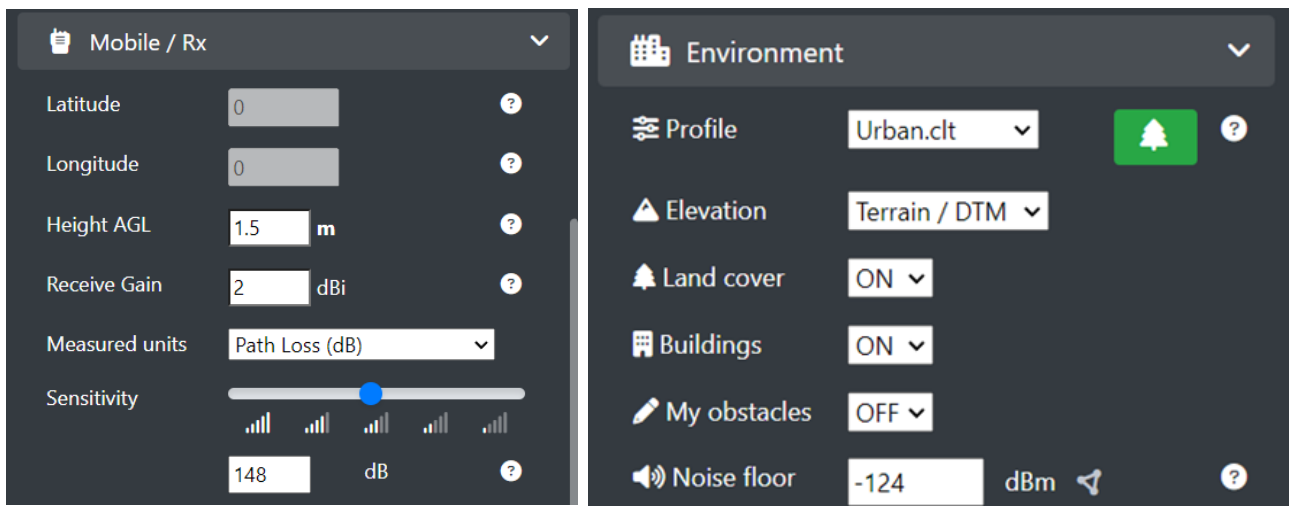


Figura 74: Configuración de nodos y obstáculos.

The image shows two configuration panels from a software application. The top panel, titled 'Model', contains four settings: 'Model' set to 'COST231-Hata (0.15-2GHz)', 'Reliability' set to '70% / -4dB', 'Context' set to 'Conservative / Urban', and 'Diffraction' set to 'Knife edge'. The bottom panel, titled 'Signal', contains three settings: 'Frequency' set to '915 MHz', 'RF power' set to '0.1 W', and 'Bandwidth' set to '0.1 MHz'. Each setting has a dropdown arrow and a help icon (a question mark in a circle).

Figura 75: Parámetros de señal y modelo de propagación a usar.

The image shows a configuration panel titled 'Output'. It contains four settings: 'Resolution' set to '2m / 6ft', 'Colour schema' set to 'LORA', 'Radius' set to '2 Km', and 'Engine' set to 'CPU'. The 'Colour schema' setting has a green button with a palette icon next to it. Each setting has a dropdown arrow and a help icon (a question mark in a circle).

Figura 76: Parámetros de resolución de resultados.

y el resultado obtenido es el siguiente:

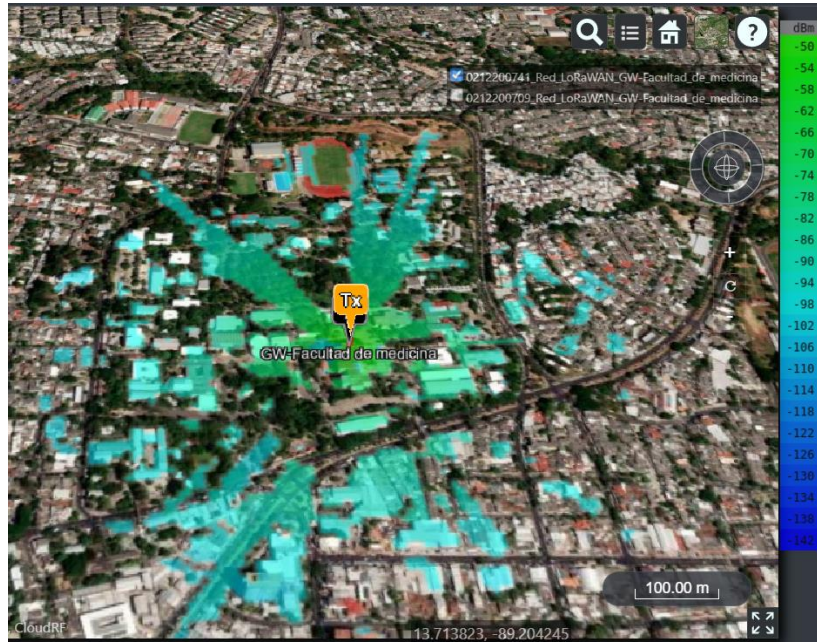


Figura 77: Mapa de potencia de señal recibida.

De este mapa se puede observar que el área efectiva de transmisión se ve bastante reducida debido a las edificaciones próximas a la ubicación de la antena y que, en su mayoría, los puntos donde existe comunicación presentan una potencia que va desde los -80 dB o inferior.

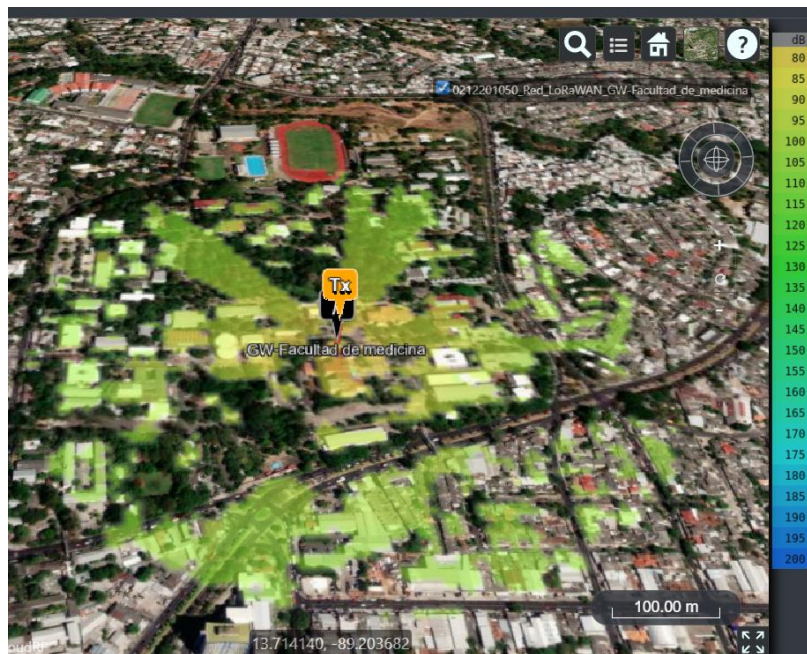


Figura 78: Mapa de pérdidas.

El mapa presentado anteriormente muestra las pérdidas percibidas desde el Gateway a los puntos alrededor de este, esta toma en cuenta la altura de los edificios, así como las características de elevación del terreno para determinar las pérdidas existentes, donde se puede ver que en determinadas secciones alrededor del edificio de medicina, no existe señal.

De las pruebas hechas con el programa, se puede concluir que Cloud RF presenta más niveles de sensibilidad y permite establecer una mejor comparativa con otros métodos de cálculo que los simuladores utilizados con anterioridad, adicionalmente, cuenta con el modelo de propagación propuesto para el estudio de cobertura de interés y permite definir el perfil geográfico de la zona de estudio.

### **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, 2012).

### **OPCIONES ADICIONALES DE SOFTWARE DE PREDICCIÓN DE COBERTURA**

Además de los programas vistos anteriormente, los cuales eran de distribución libre, o contaban con una versión de prueba gratuita, también existen en la actualidad algunos programas más especializados para la predicción de cobertura radial y que además de presentar mapas con mejor resolución para el cálculo de cobertura, también presentan herramientas adicionales para el modelado de redes y brindan información adicional. Sin embargo, el inconveniente que presentan estos programas es el elevado costo que pueden llegar a presentar, ya que, a la tecnología LoRa algo relativamente reciente, los programas especializados en su estudio son escasos y se distribuyen en su mayoría para propósitos más enfocados en el desarrollo industrial o grandes redes de comunicación. Se muestran en este apartado algunos de estos, los cuales varían en cuanto a precios y funcionalidades ofrecidas.

## **PATHLOSS**

Este software es una herramienta para los enlaces radiofónicos que operan en la gama de frecuencias de 30 MHz a 100 GHz. Pathloss cuenta con 6 versiones con enfoques diferentes.

- **PL6B** - programa básico: El programa básico consiste en la visualización de la red y las características de diseño y enlace automatizado para enlaces de radio punto a punto. Esto incluye los módulos de diseño para datos del terreno, alturas de antena, difracción, análisis de transmisión y reflexiones: análisis multitrayecto. Estas características son comunes a todas las opciones del programa.
- **PL6C** –La opción de diseño punto a multipunto agrega estaciones base multiselectoriales a la visualización de la red. Se utilizan para las funciones de diseño y vinculación automática de PTMP. Además, se pueden realizar estudios de cobertura local desde una estación base utilizando la intensidad de la señal, el margen de desvanecimiento o la visibilidad como criterios de visualización.
- **PL6I** –Permite realizar un análisis de interferencia entre grupos de enlaces en la visualización de red o entre un grupo de visualización de red y la base de datos del sitio Pathloss para todos los tipos de radio. Para cada receptor se calcula el nivel de interferencia agregado de todos los transmisores. La degradación del umbral del receptor y el consiguiente aumento de la probabilidad de interrupción se determinan teniendo en cuenta la correlación del desvanecimiento por lluvia y desvanecimientos por trayectos múltiples. Las interferencias producidas por repetidores pasivos se incluyen en el cálculo. La compatibilidad con datos FCC ULS se incluye con la opción de interferencia.
- **PL6T** – Interferencia, diseño punto a multipunto y estudios locales. Esta opción combina punto a multipunto: estudios locales y opciones de interferencia. (La operación del estudio de área estará disponible próximamente). En un estudio local, cada estación base tiene su propia cobertura centrada en la estación base. En un estudio de área (próximamente), las señales de varias estaciones base se calculan en un área común. Además de los niveles de señal de recepción, un estudio de área mostrará el servidor, el portador a la interferencia y el retraso de transmisión simultánea más probable.

Cada una con un precio de licencia de usuario único.

- **PL6B** \$2509.92 dólares.
- **PL6C** \$3395.77 dólares.
- **PL6I** \$3986.34 dólares.
- **PL6T** \$4872.20 dólares.

Información tomada de (Pathloss, 2022)

## **CLOUD RF**

Este programa es un software de polinización de radio frecuencia diseñado para operadores e ingenieros y está diseñado para admitir la mayoría de las tecnologías de radio, desde HF hasta EHF. Con una interfaz gráfica amigable con el usuario y admitida en computadoras de bajos recursos. Cuenta con una versión de paga con un monto anual de 1820 dólares estadounidenses. Entre los beneficios del pago de esta suscripción se encuentran:

- Límite de frecuencia: 90 GHz
- Límite de radio: 500 Km
- Resolución de salida: 16 megapíxeles
- Llamadas API/mes: 25.000
- Datos globales del terreno.
- Interfaz de Google Hearth
- Acceso a más de 26.000 patrones de antena
- Herramienta de obstáculos
- Exportar datos como KMZ/ KML/ GeoTIFF/ SHP/ URL/ HTML
- Mapa web en 3d con cartografía global.
- Entre muchas más.

Este software es muy completo con una gran variedad de herramientas para realizar un estudio de cobertura real y con resultados concluyentes.

Información tomada de (Cloud RF, 2021)

## **RF CENOS**

Este programa es una buena opción para ingenieros y empresas que realicen estudios de diseño y colocación de antenas. Entre sus ventajas se encuentran:

- Patrones de radiación en coordenadas polares y cartesianas.
- Parámetros S, VSWR, impedancia, reactancia, resistencia, potencia.
- Farfield y campo eléctrico 3D
- Mallado automático y manual.
- Base de datos de materiales personalizable.
- Múltiples instancias de simulación al mismo tiempo.
- Simulación de elementos agrupados
- Simulación de multipuerto con excitación secuencial y simultánea.
- Entre muchas más.

Este producto puede ser adquirido en dos planes, uno de 3 meses por \$4,800 y otro anual por \$9,000.

Información tomada de (CENOS, s.f)

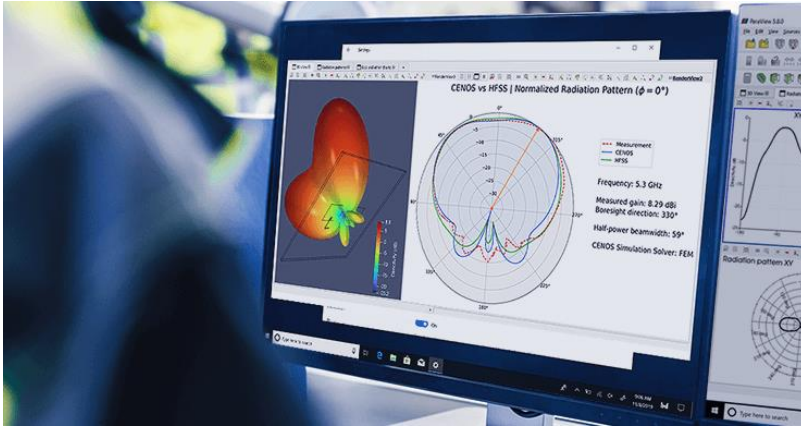


Figura 79: Imagen de muestra del programa RF CENOS.

## HTZ COMMUNICATIONS

Esta es una herramienta de las más completas que ofrece el mercado, pues no se enfoca solamente en el análisis de redes LoRa, sino que en cualquier tipo de red. Este programa brinda soporte para el análisis de distintas tecnologías en el rango de 8 kHz hasta 1 THz. Algunas de estas son:

- IoT (LoRa, Sigfox, NB-IoT, LPWA, etc.)
- 5G (Carrier aggregation, Modelación MIMO, mmWave, etc.)
- Redes móviles (GSM, LTE, UMTS, etc.)
- Sistemas troncalizados
- Seguridad pública
- Enlaces microondas
- Radiodifusión
- Móvil aeronáutico y marítimo & UAS
- Sistemas satelitales
- Espectro dinámico

Presenta también algunas facilidades cómo:

- La capacidad de descarga y generación de información cartográfica en alta resolución de cualquier parte del mundo.
- HTZ tiene la capacidad de poder realizar una planeación prospectiva automática en redes punto-multipunto, considerando los parámetros técnicos de las estaciones deseadas y las restricciones de despliegue, el programa analiza las condiciones geográficas, simula los resultados de varios puntos radiantes y elige las mejores ubicaciones de los nodos.
- Realiza simulaciones de redes 5G.

- Capacidad de habilitar el modelamiento multi tecnologías de forma simultánea, ya sea 2G/3G/4G/5G/IoT o TVD/4G en un mismo proyecto, sin necesidad de módulos o componentes adicionales.
- Posee funciones que permiten el análisis de la exposición a campos electromagnéticos en estaciones individuales o entornos.
- Entre otras opciones.

Información tomada de (TES AMERICA, 2023)

El software HTZ Communications es distribuido a nivel latinoamericano a través de la empresa TES AMERICA. Según la consulta realizada a la empresa, el programa es adquirible a través de suscripciones anuales que tienen un costo que ronda los \$1,600 y una licencia perpetua cotizada en \$15,700. Se otorgan 5 licencias para cada plan y también se pueden solicitar capacitaciones en su uso por un precio adicional.

### **ANALIZADOR DE ESPECTRO RSA306B**

Finalmente, para el estudio de cobertura a ser realizado previo a la implementación del prototipo diseñado, se deben realizar mediciones de campo, para ello, se hace uso del analizador de espectro RSA306B de la marca Tektronix, Este dispositivo 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 (Tektronix, Tektronix RSA306/USB Spectrum Analyzer). 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.



Figura 80: Analizador de espectro RSA306B.

Entre sus características (Tektronix, Tektronix RSA306/USB Spectrum Analyzer) fundamentales 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.
- 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  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $55^{\circ}\text{C}$ .
- 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

Ya que, según el modelo seleccionado, no se pueden tomar en cuenta distancias menores a los 20 metros, este aparato es ideal tanto para esas zonas no comprendidas en el rango de distancia del modelo COST231, como para realizar una comparativa con aquellas zonas más lejanas dentro de la zona de estudio.

Este equipo es propiedad de la universidad, por tanto, se encuentra disponible para la realización de estos estudios.

## SOFTWARE EMPLEADO PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO

### ARDUINO IDE

Arduino proporciona un software integrado IDE (Integrated Development Environment), este programa consiste en un editor de código, un compilador, depurador y constructor de interfaz gráfica (GUI) permitiendo así programar el programa compilado en la memoria flash del hardware. Desde la versión 1.6.2 incorpora librerías que permiten gestión de diferentes pacas y dispositivos.

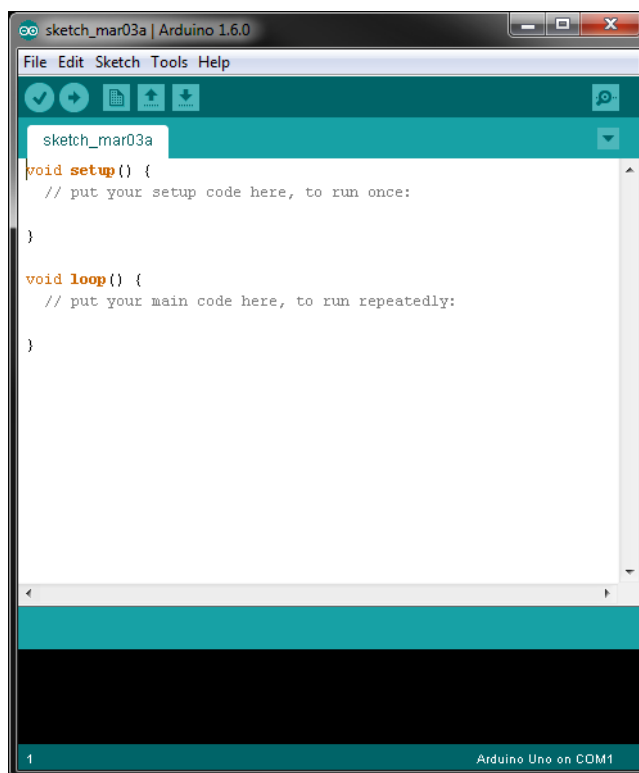


Figura 81: Entorno de trabajo de software Arduino.

En sus inicios Arduino solo proporcionaba soporte a sus placas y clones de estas que tienen los mismos controladores de Arduino. Desde la versión 1.6.2 del IDE de arduino.cc se puede dar soporte y uso a otros microcontroladores y placas al IDE de Arduino. En su página oficial arduino.org está desarrollando un nuevo IDE denominado Arduino Studio, este aún se encuentra en una versión de prueba, además de este existen otros IDEs alternativos como Atmel Studio.

La ventaja que presenta Arduino es que ofrece soporte para la tecnología y una gran cantidad de librerías asociadas a los diferentes usos que puede dársele a esta, ya que no solamente permite la recepción de datos de sensores, sino que también permite la subida de datos a redes IoT, codificación para pruebas de cobertura entre dispositivos, etc.

## **PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ANTENAS LORA**

Los dispositivos seleccionados para la implementación de un prototipo de red LoRa son las placas TTGO Lora 32, estas vienen integradas con una antena de 2 dBi de ganancia y son las que se utilizan tanto para la recepción como la transmisión de datos. Es importante determinar el estado de estas antenas para poder garantizar un óptimo rendimiento del sistema y por ello se debe realizar un estudio de caracterización e identificación de las propiedades de estas, para ello se hace uso del aparato llamado miniVNA tiny, el cual funciona entre las frecuencias de 1 MHz y 3 GHz. Para la implementación del prototipo se hará uso de 4 dispositivos LoRa y por ende, de 4 antenas, las cuales serán examinadas a continuación.



*Figura 82: MiniVNA Tiny para caracterización de antenas.*

Como se busca obtener las propiedades receptivas de las antenas, estas son conectadas en el puerto DUT, cuyas siglas significan “Device Under Test” o dispositivo bajo prueba en español (Morales, 2023), el análisis se efectúa en modo de reflexión.

Como se puede observar a continuación, el dispositivo está conectado de forma que la antena quede de forma vertical, para que la cantidad de pérdidas percibidas en el espacio sean mínimas.

Las mediciones son presentadas a través del software vna/J versión 3.4.8 (Morales, 2023), que es propio del dispositivo y lo que se busca es obtener algunos parámetros que definan a las antenas, por ejemplo: la frecuencia de funcionamiento, la ROE y las pérdidas debido en el espacio.

El análisis de cada una de las antenas consta de 4 imágenes, siendo las primeras 3 un barrido con diferentes valores de ancho de banda, que muestran las diferentes frecuencias de funcionamiento que tiene la antena y una cuarta que muestra las pérdidas en esos puntos. Estas pruebas muestran los siguientes resultados:

### **ANTENA 1**



Figura 83: Caracterización de antena 1 con miniVNA Tiny

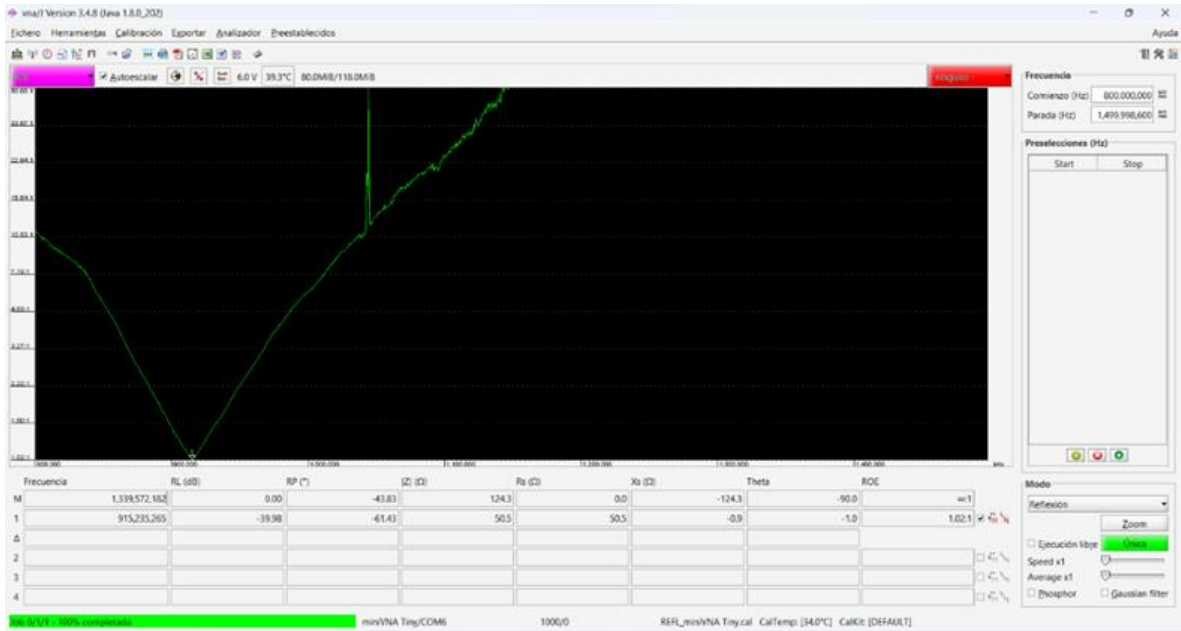


Figura 84: Resultados de antena 1

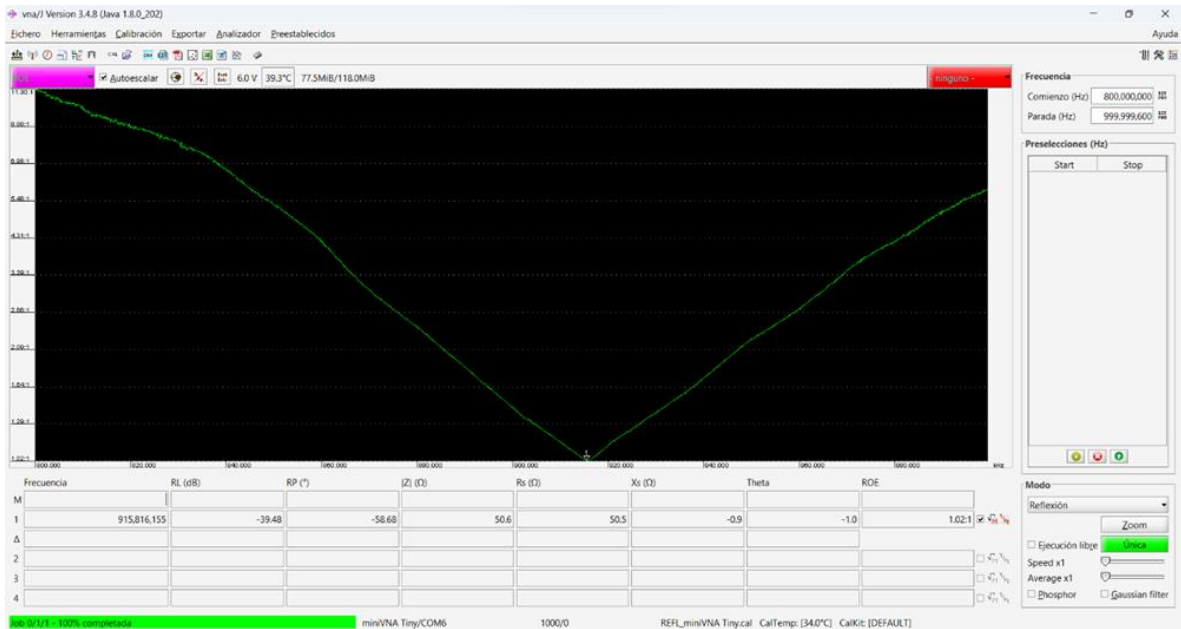


Figura 85: Resultados de antena 1.

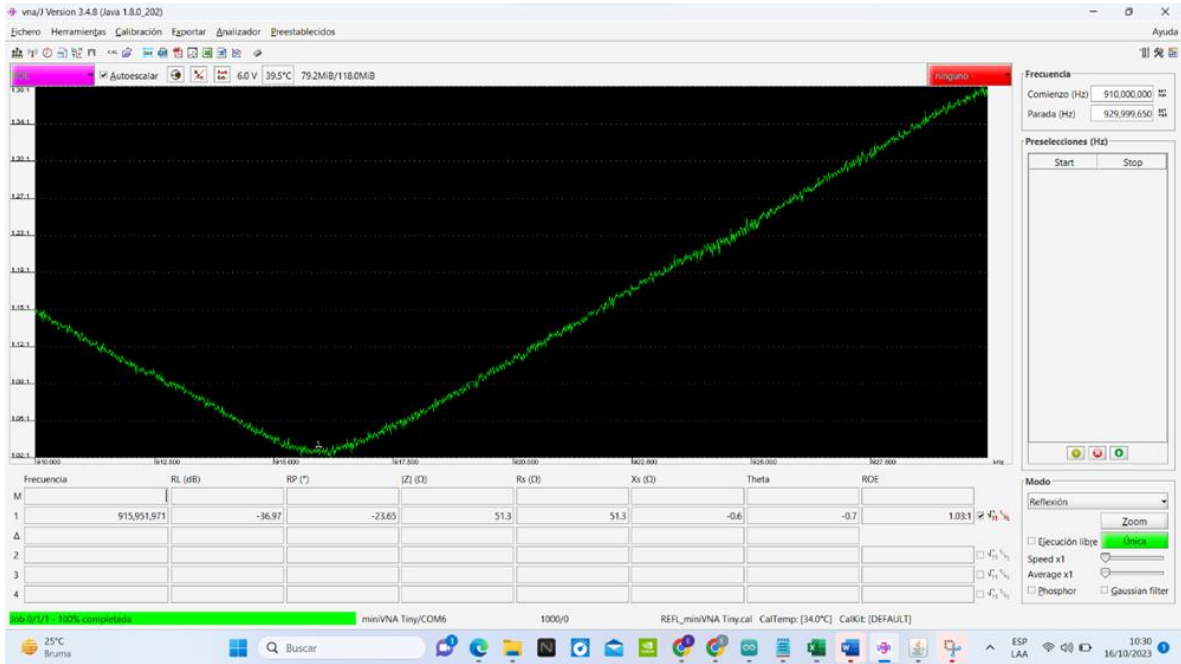


Figura 86: Resultado de antena 1.

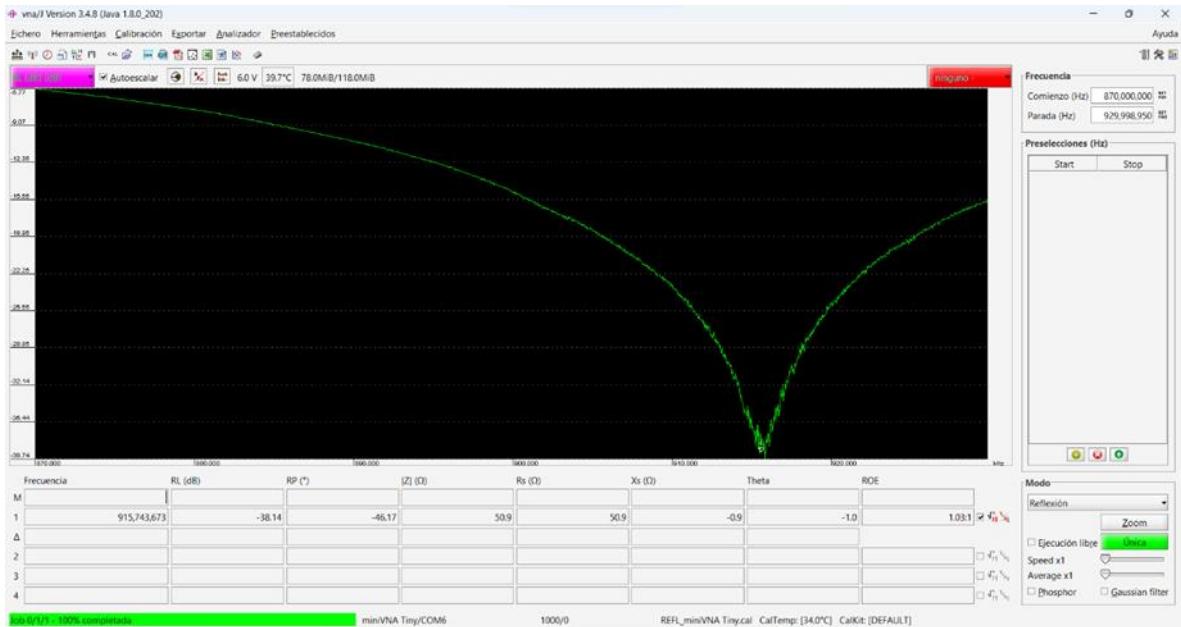


Figura 87: Resultados de antena 1.

Las pérdidas reflejadas en la imagen anterior corresponden a diversos factores entre los cuales se tienen las interferencias percibidas del espacio y también aquellas propias de la antena que pueden ser debidas a su construcción. Para las demás antenas también se muestra su respectiva gráfica de pérdidas además de mostrar su frecuencia de funcionamiento óptimo.

Frecuencia de funcionamiento: 915 MHz

ROE= 1.03 → Potencia reflejada= 0.212%

Pérdidas: -38.74 dB

## ANTENA 2



*Figura 88: Caracterización de antena 2 con miniVNA Tiny.*

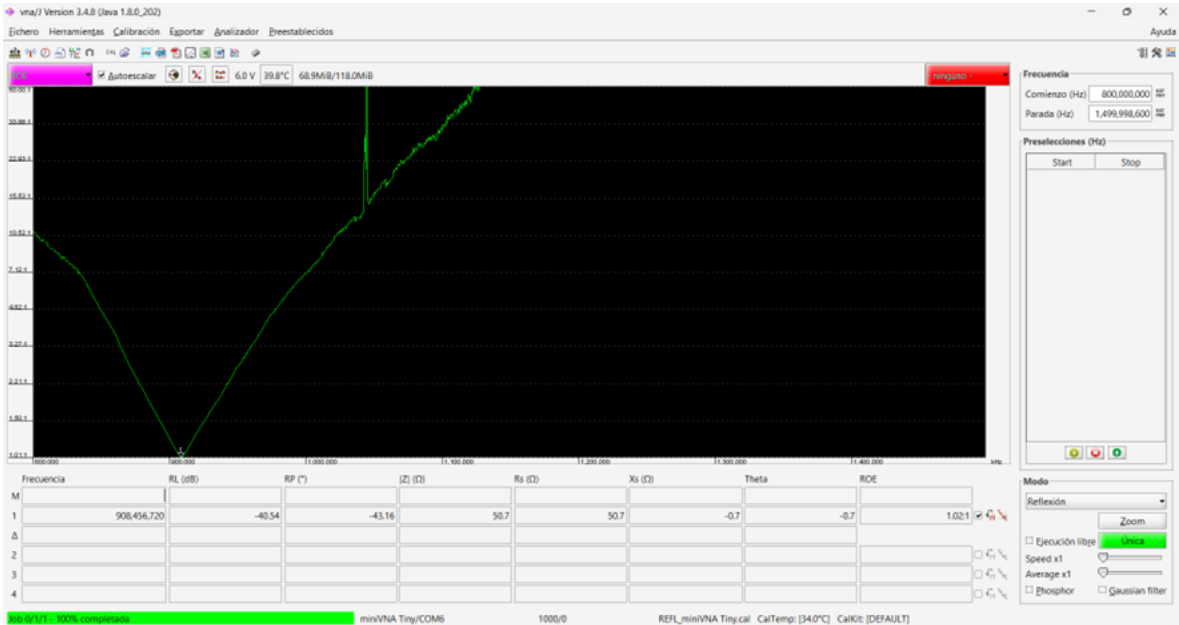


Figura 89: Resultados de antena 2.

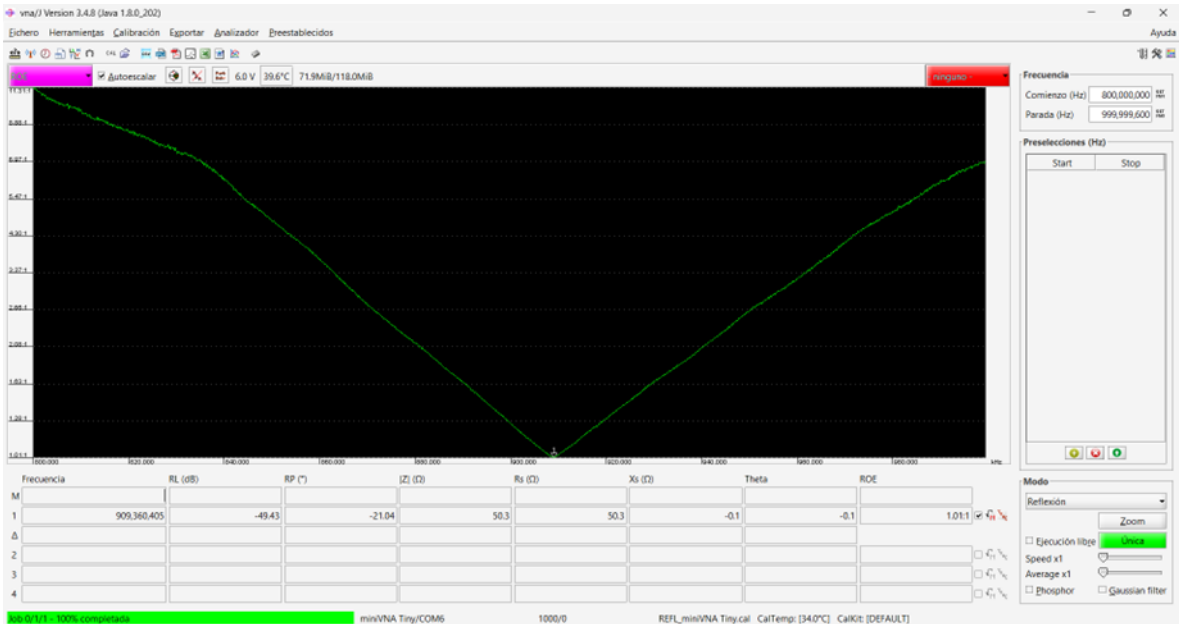


Figura 90: Resultados de antena 2.

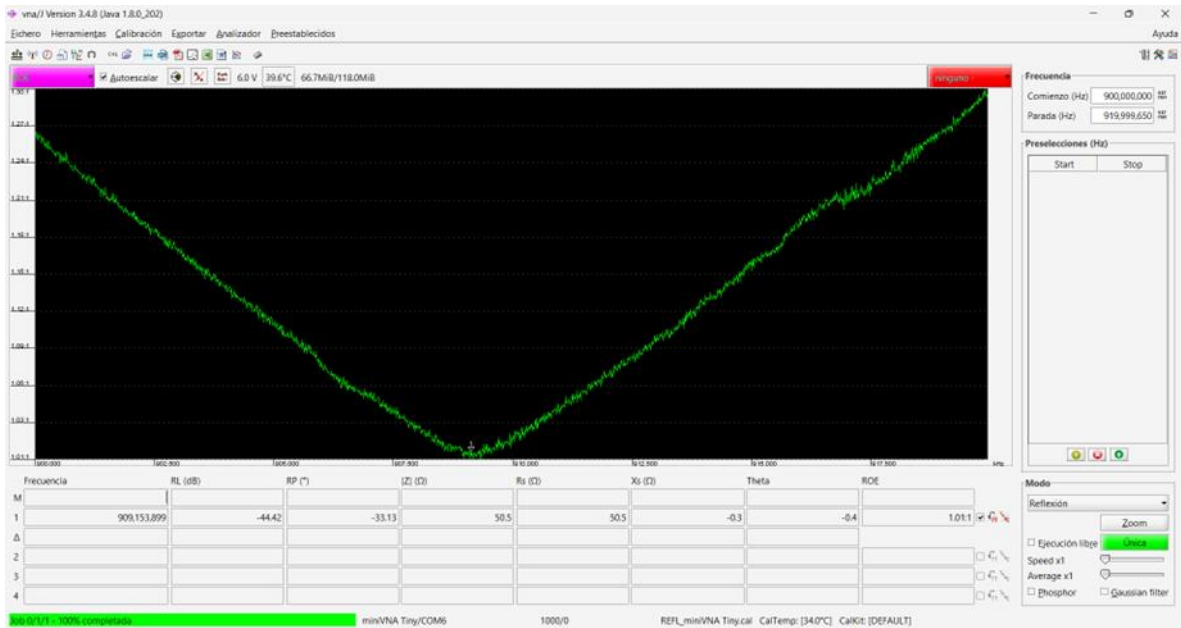


Figura 91: Resultados de antena 2.

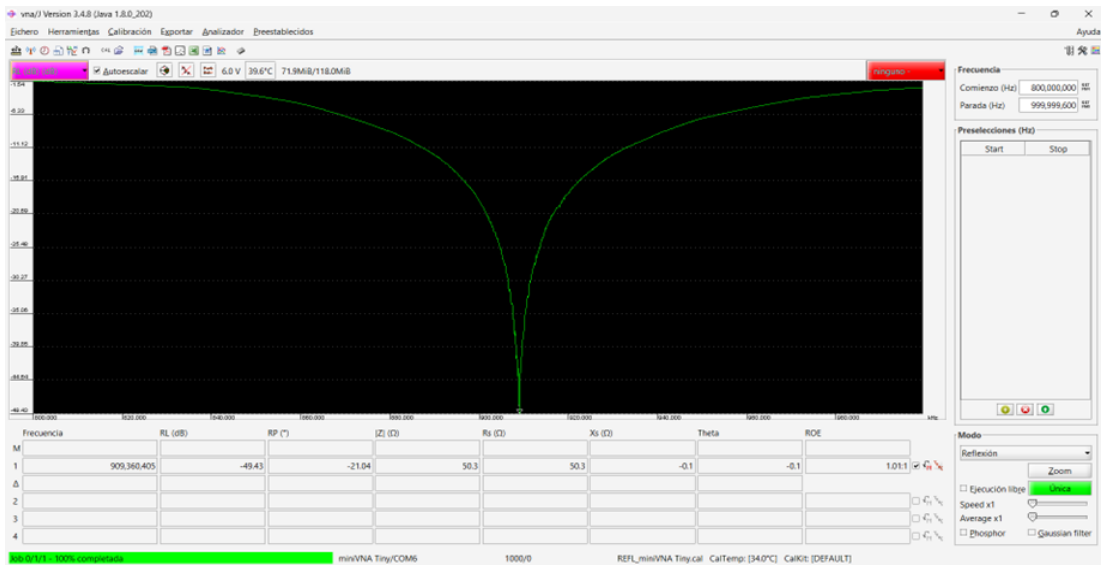


Figura 92: Resultados de antena 2.

Frecuencia de funcionamiento: 909 MHz

ROE= 1.01 → Potencia reflejada= 0.208%

Pérdidas: -49.43 dB

## ANTENA 3



Figura 93: Caracterización de antena 3 con miniVNA Tiny.

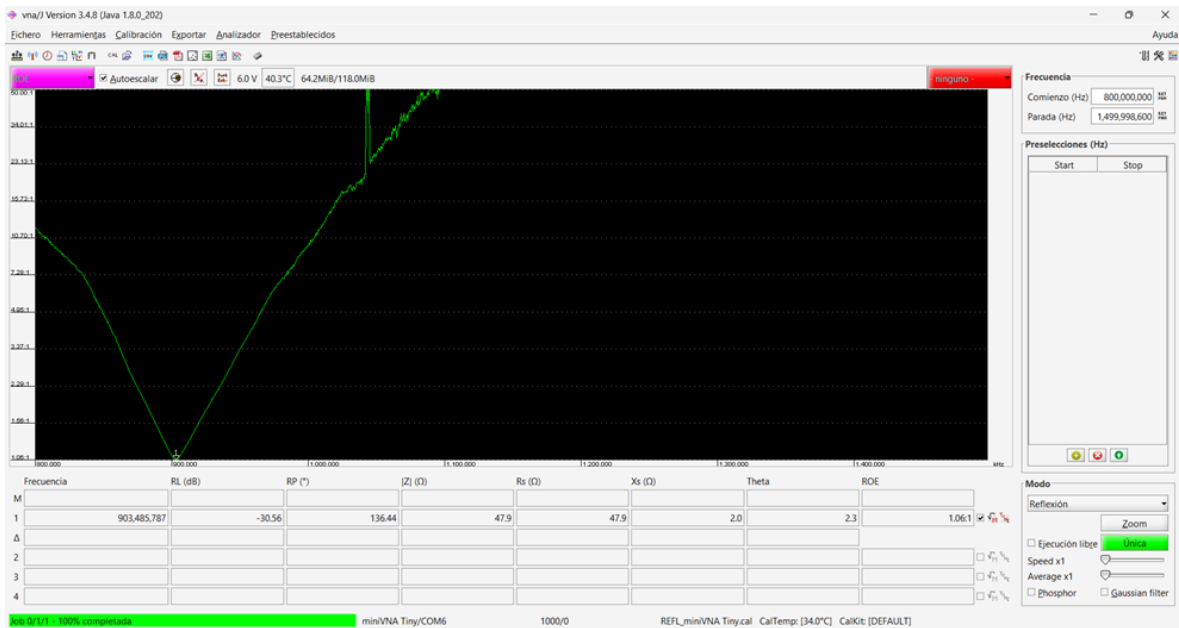


Figura 94: Resultados de antena 3.

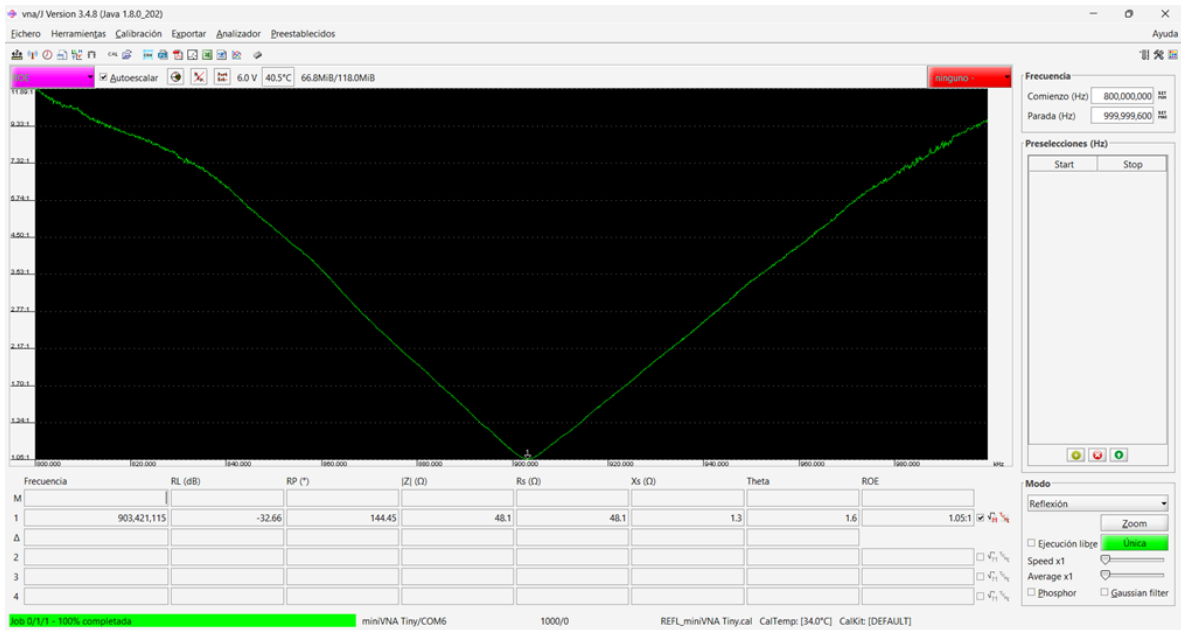


Figura 95: Resultados de antena 3.

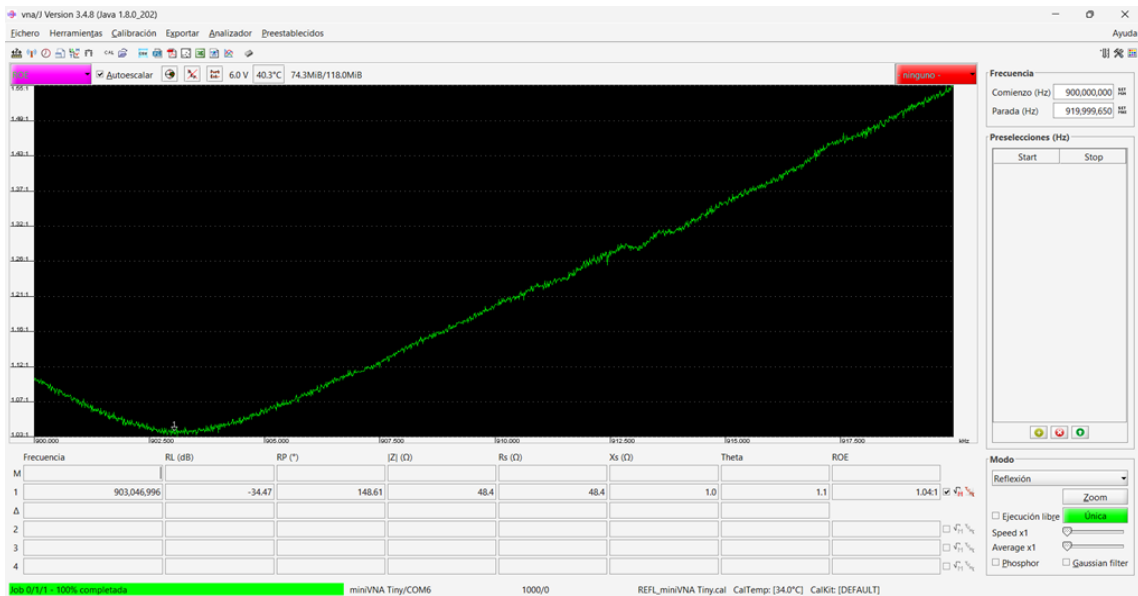


Figura 96: Resultados de antena 3.

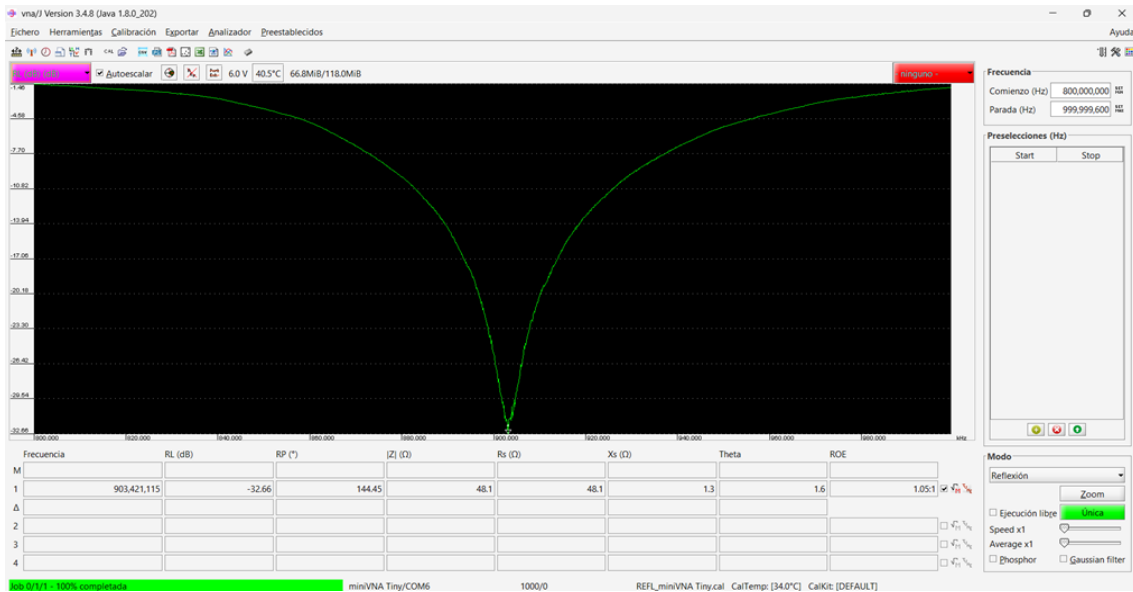


Figura 97: Resultados de antena 3.

Frecuencia de funcionamiento: 903 MHz

ROE= 1.05 → Potencia reflejada= 0.217%

Pérdidas: -32.66 dB

### ANTENA 4



Figura 98: Caracterización de antena 4 con miniVNA Tiny.

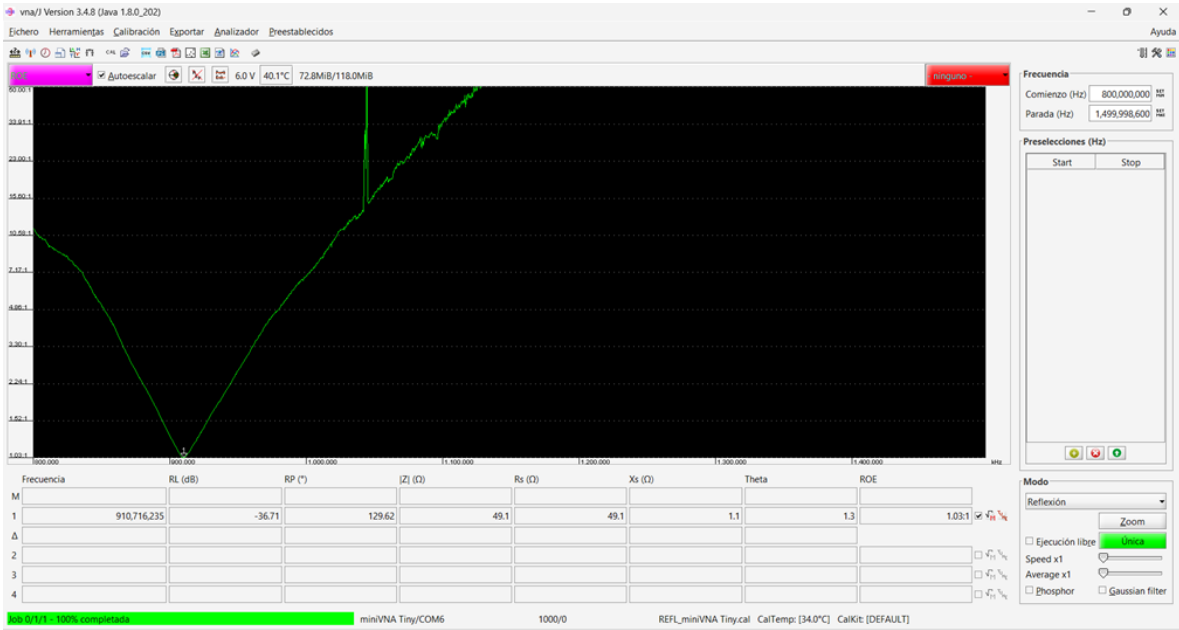


Figura 99: Resultados de antena 4.

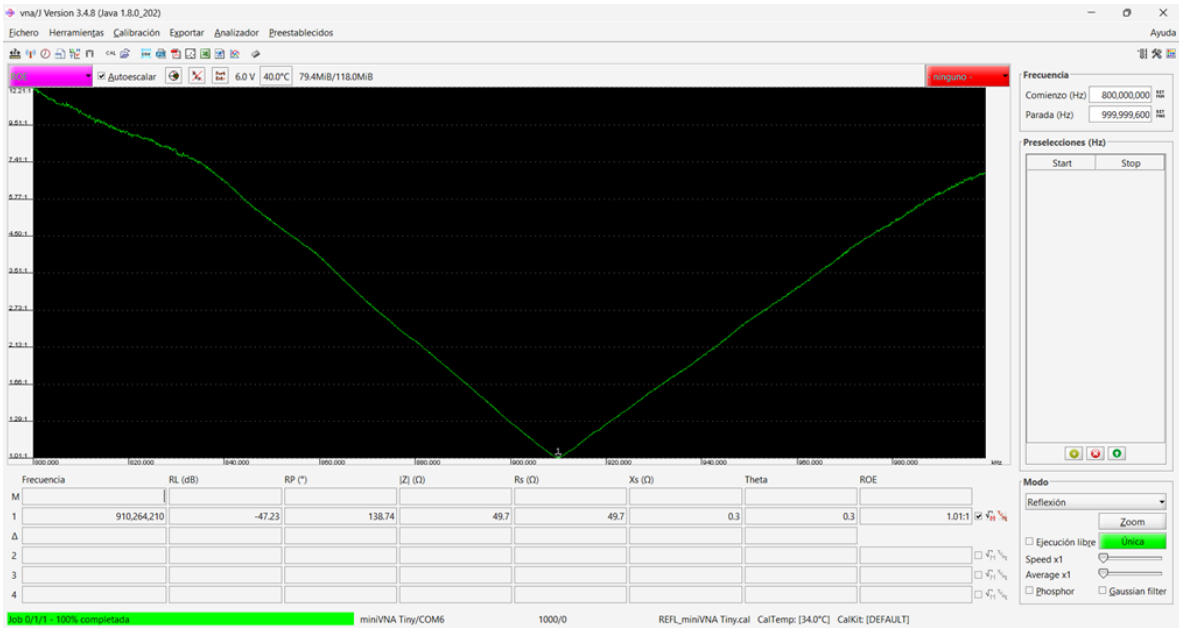


Figura 100: Resultados de antena 4.

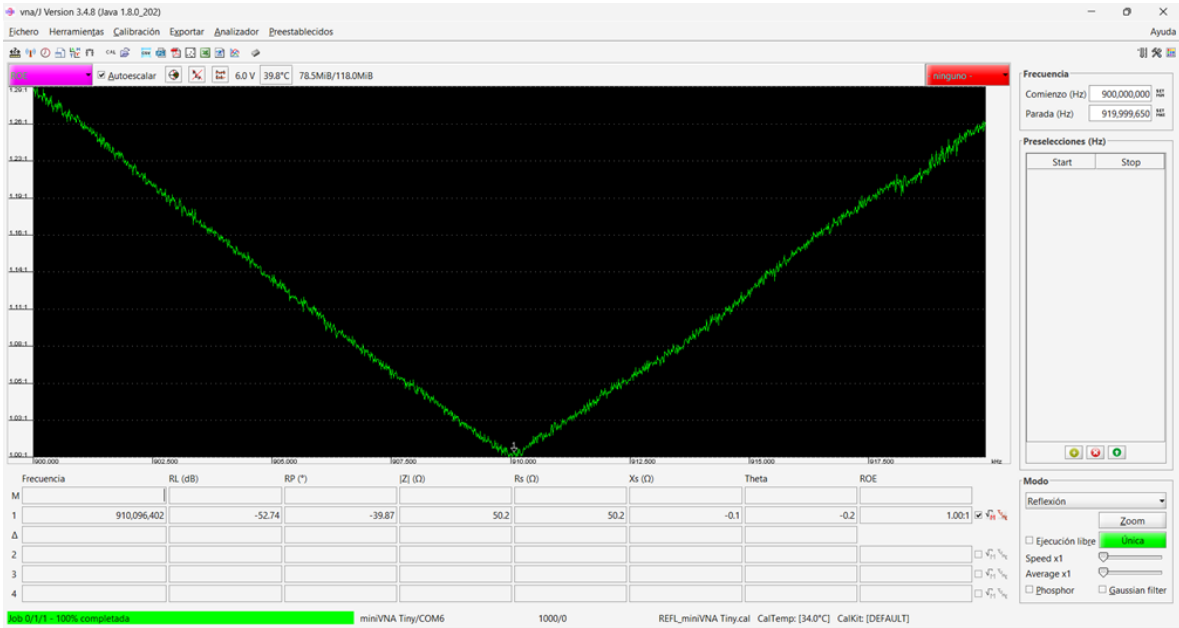


Figura 101: Resultados de antena 4.

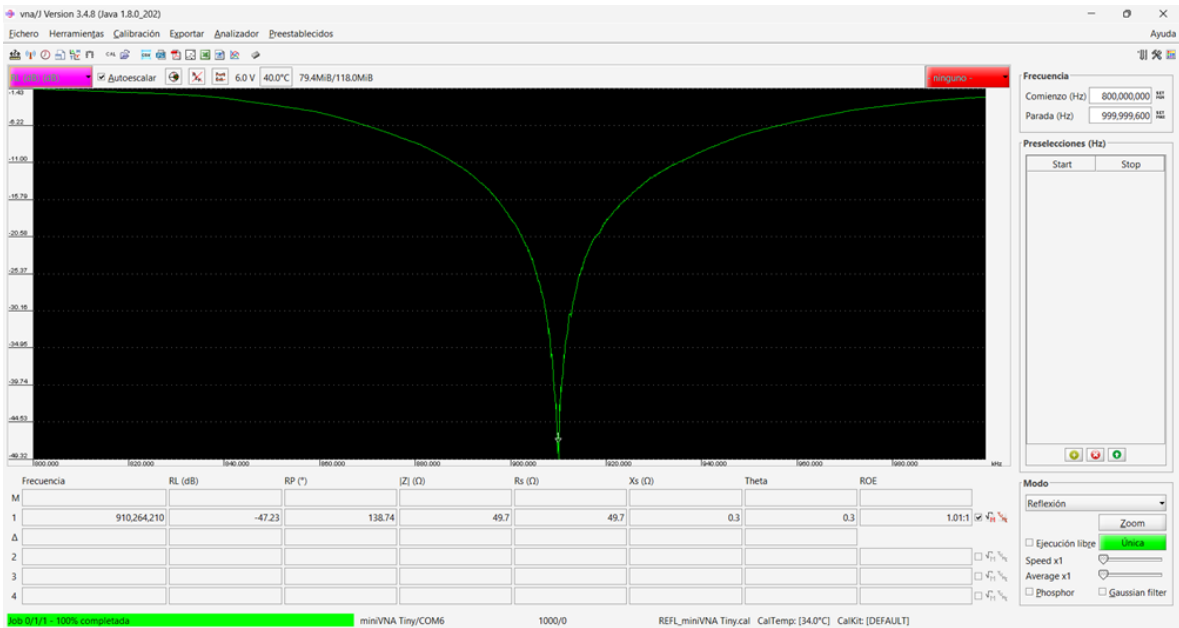


Figura 102: Resultados de antena 4.

Frecuencia de funcionamiento: 910 MHz

ROE= 1.00 → Potencia reflejada= 0.000%

Pérdidas: -47.23 dB

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS:**

De los análisis hechos se puede comprobar que la frecuencia de funcionamiento óptimo de cada una de las antenas se encuentra en el rango de 900 a 916 MHz, que es la frecuencia de funcionamiento sugerida por el fabricante del producto. Este valor de frecuencia es el adecuado para poder implementar una red empleando tecnología LoRa en El Salvador, ya que, según la normativa existente de la distribución nacional del cuadro de frecuencias, el rango utilizable es desde los 914-928, pues esta banda es la denominada banda ISM, la cual está disponible de forma libre para aplicaciones de índole industrial, científica y médica. Las pérdidas presentadas en el estudio se deben en buena parte a esto, ya que al ser este ancho de banda de uso “libre” para estas aplicaciones, pueden coincidir multitud de usuarios.

También se puede ver que estas antenas poseen valores de ROE de 1.03, 1.01, 1.05 y 1.00 para las antenas 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Lo cual es un valor excelente para su funcionamiento, pues se estima que el máximo valor que pueden presentar las antenas de Razón de onda estacionaria es de aproximadamente 1.5 antes de producir pérdidas y dañar a los amplificadores de potencia.

Finalmente se presenta para cada una un valor de pérdidas en el espacio, siendo este valor es más variable de todos, esto se debe a que, como se mencionaba anteriormente, la banda utilizada puede ser empleada para otros propósitos además de la conexión entre dispositivos LoRa, por ejemplo, radios de banda civil, radioaficionados, enlaces punto a punto, etc. Siendo esta la razón por la cual el resultado oscila de la forma observada.

## **CAPÍTULO III - ESTUDIO DE PREDICCIÓN DE COBERTURA.**

### **ANÁLISIS DE COBERTURA POR MODELO MATEMÁTICO.**

Uno de los métodos de cobertura en que se basan los diferentes softwares de simulación y diferentes instrumentos de medición son los cálculos matemáticos. En las secciones anteriores se hace mención de los diferentes modelos matemáticos para la predicción de cobertura, en esta sección se mencionará el modelo a usar y su forma a emplear en el análisis.

En este estudio se utilizará el modelo **COST 231**, Walfisch-Ikegami el cual es un 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

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. En general, las restricciones para el modelo son las siguientes (Rábanos, 2008):

- $F = 800 - 2000$  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 son los siguientes (Rábanos, 2008):

- $h_r$ : altura media de los edificios (m)

- $w$ : anchura de la calle (m)
- $b$ : separación media entre edificios (m)
- $\varphi$ : 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)

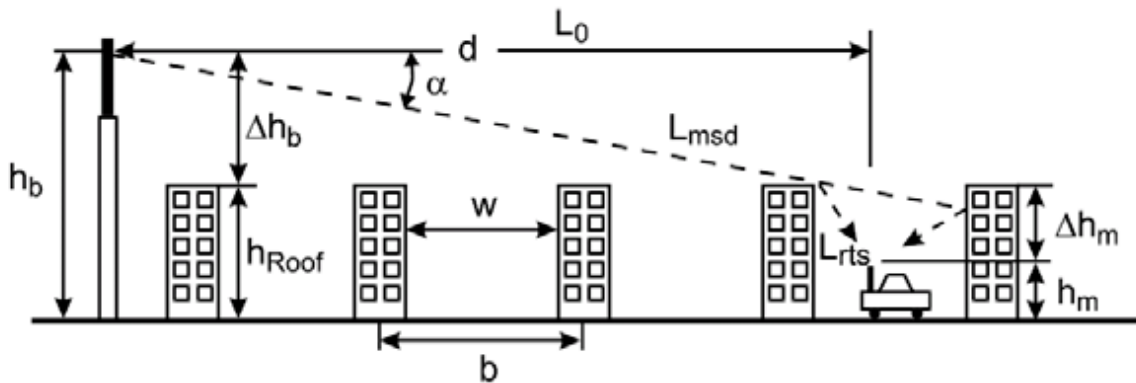


Figura 103: Vista lateral de los parámetros a usar en modelo COS231.

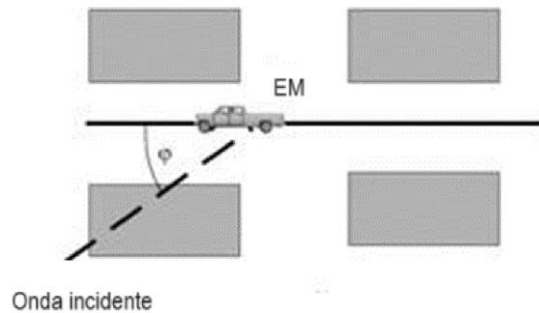


Figura 104: Vista de planta mostrando la dirección de la onda incidente.

Las pérdidas en trayectos sin visibilidad directa se modelan con las siguientes ecuaciones:

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (9)$$

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

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

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

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log w + 10 \log_{10} f + 20 \log_{10} \Delta h_m + L_{ori} \quad (11)$$

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

El valor de lori se obtiene de la siguiente manera:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi, & 0 < \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4 - 0.114(\varphi - 55^\circ), & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (12)$$

$L_{msd}$  = es una estimacion de la difracción multiobstaculo entre Tx y el edificio próximo al Rx

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d * \log_{10} d + k_f * \log_{10} f - 9 \log_{10} b \quad (13)$$

Donde

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

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

$$K_a = \begin{cases} 54, & \Delta h_b \geq 0 \\ 54 - 0.8\Delta h_b, & \Delta h_b < 0 \text{ y } d \geq 0.5 \\ 54 - 0.8\Delta h_b \cdot \frac{d}{0.5}, & \Delta h_b < 0 \text{ y } d < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

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

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \frac{f}{925 - 1} & \text{ciudades de tamaño medio} \\ -4 + 1.5 \frac{f}{925 - 1} & \text{grandes centros metropolitanos} \end{cases} \quad (16)$$

Al sustituir las fórmulas (10), (11) y (13) en (9) se calculan las perdidas en la trayectoria entre el transmisor y receptor.

## APLICACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN UIT R P.833-2

Aunque este modelo (UIT-R, 1999) 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, el modelo COS231 no contempla las pérdidas por vegetación que se encuentran en el lugar por lo cual a (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 (UIT-R, 1999).

- 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.
- 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 deben de tomar en consideración la trayectoria que la señal va a recorrer, para el caso presentado en este estudio, se escoge el caso 1 debido a que es el que se adapta mejor al ambiente de pruebas. Para el cálculo de las pérdidas en el caso 1 se tienen las siguientes fórmulas:

$$A_{veg} = A_m \left(1 - e^{-\frac{d_{veg}\gamma}{A_m}}\right) \quad (17)$$

$$A_m = A_1 f^\alpha \quad (18)$$

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)
- $\gamma$  : Atenuación específica para un trayecto muy corto de vegetación (dB/m)

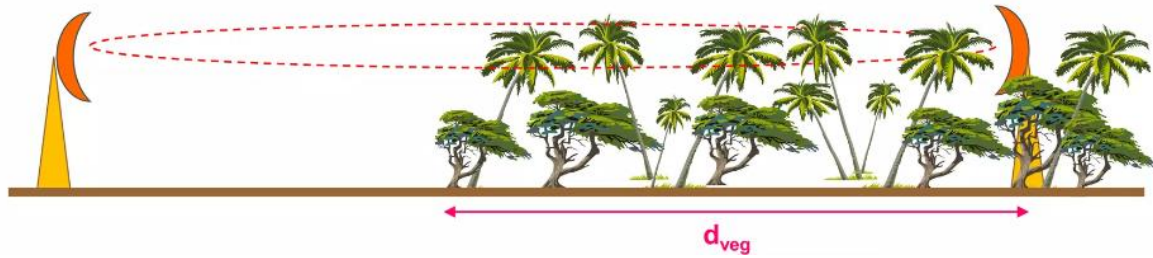


Figura 105: Pérdidas de señal en zona de vegetación.

Para una frecuencia que oscile entre los 900 – 1900 MHz:  $A_1 = 1.15$  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 (17) en (9) 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 debe aplicar la siguiente expresión matemática.

$$RSL = \text{Potencia Transmitida} - \text{Pérdidas de Propagación} \quad (19)$$

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 fórmula (19) se obtiene la intensidad de la señal en un punto determinado, al repetir el proceso para x cantidad de puntos, se podrá 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. En la última sección de este capítulo se expone un cuadro comparativo con los diferentes resultados de los análisis de cobertura.

## ANÁLISIS DE COBERTURA POR INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

### DEFINICIÓN DE LA ZONA DE MEDICIÓN

En primer lugar, se identifican dos zonas diferentes dentro de la Universidad de El Salvador a las cuales se les realizan las diferentes pruebas de recepción de señal, estas son la facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA) 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 que 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.

## 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, etc. Y 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 tomó una cantidad de 20 mediciones (tomando como primer punto uno de referencia, a corta distancia) que se realizaron alrededor del Gateway. Los puntos seleccionados fueron los siguientes:



Figura 106: Ubicación de puntos de medición y gateway ubicado en edificio B de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura mostrado en QGIS.

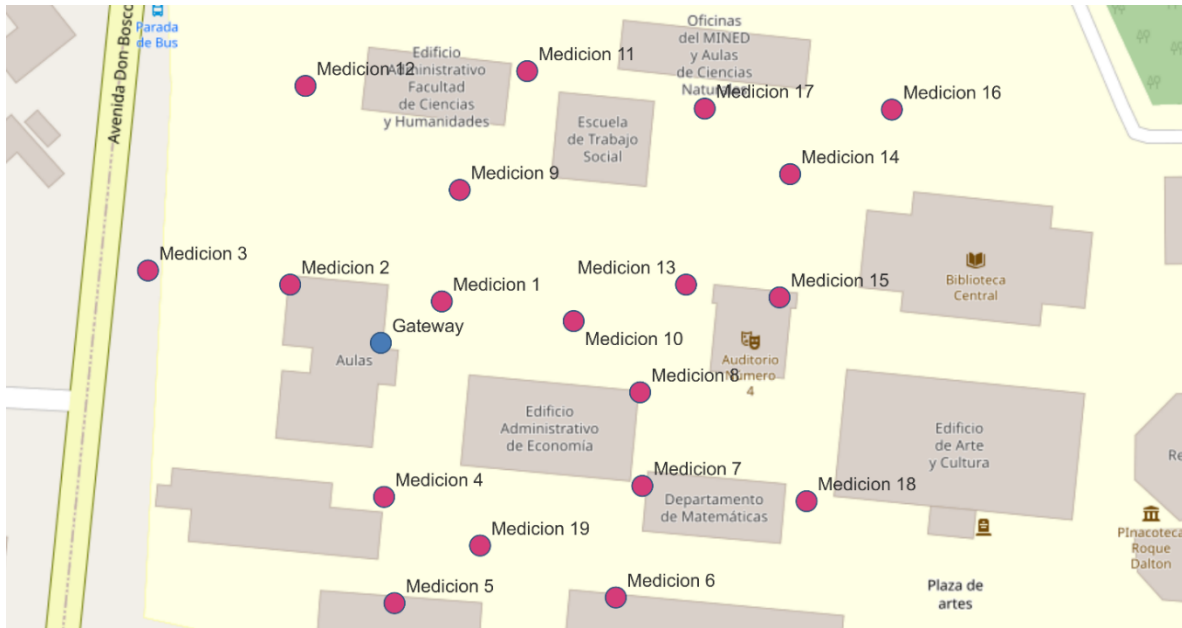


Figura 107: Ubicación de puntos de medición y gateway en facultad de Ciencias económicas mostrado en QGIS.

## 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.

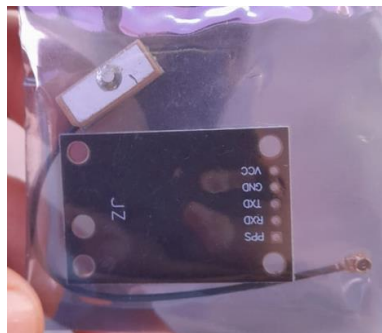


Figura 108: Módulo GPS NEO-6M-0-001 para ubicación de puntos de medición.

## 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 ente encargado de regular las telecomunicaciones a nivel general es la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), 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.

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:

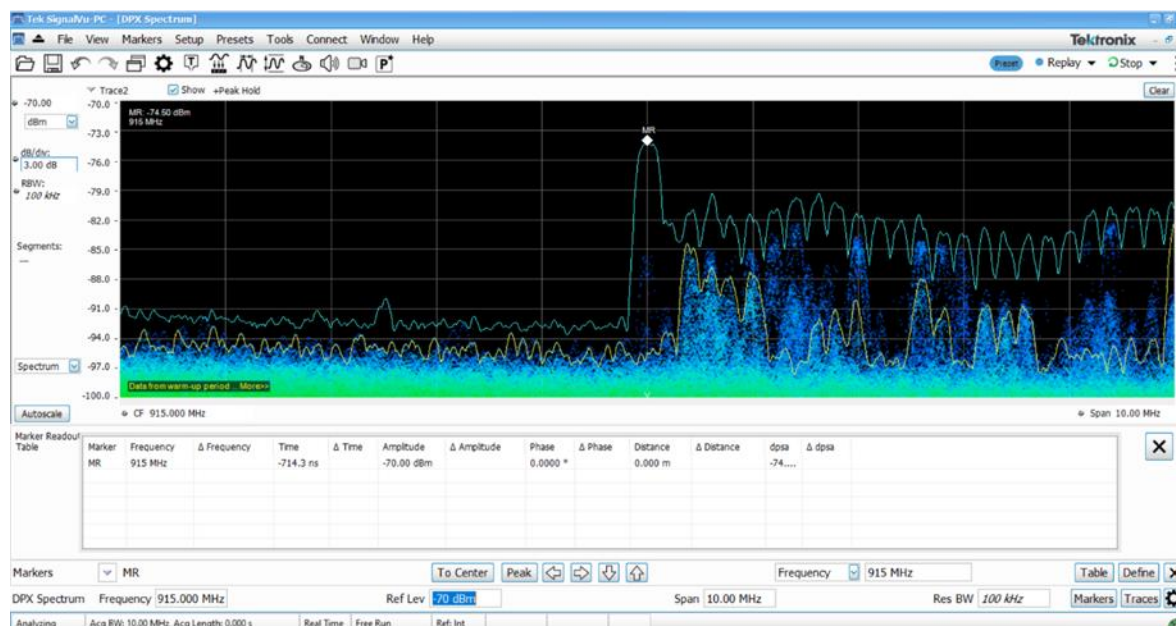


Figura 109: Resultados del espectro radial en software SignalVU.

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.

#### A. 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

Estos valores son definidos de esta forma debido a que lo que se busca es priorizar la calidad del enlace antes que la distancia, ya que estos parámetros aumentan la transmisión de datos sacrificando el área de cobertura. En la siguiente sección de este capítulo se expone un cuadro comparativo con los diferentes resultados de los análisis de cobertura.

## PROCESO DE MEDICIÓN

Para la implementación de este prototipo se usarán 2 placa TTGO ESP32 (LiLYGO), una será configurada como transmisor el cual enviará una cadena de texto al nodo receptor el cual tendrá un contador de mensajes recibidos y un indicador de intensidad de potencia recibida. Cada placa cuenta con una batería de 5 voltios como fuente de alimentación. La placa utiliza el lenguaje de programación Arduino, lo cual 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, Tektronix RSA306/USB Spectrum Analyzer) de la marca Tektronix. Este dispositivo se conecta a un ordenador, el cual 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 esté conectado a la PC.



*Figura 110: Equipo utilizado para medir el nivel de recepción de señal.*

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones realizadas a través de SignalVU-PC. Para la facultad de ingeniería y arquitectura

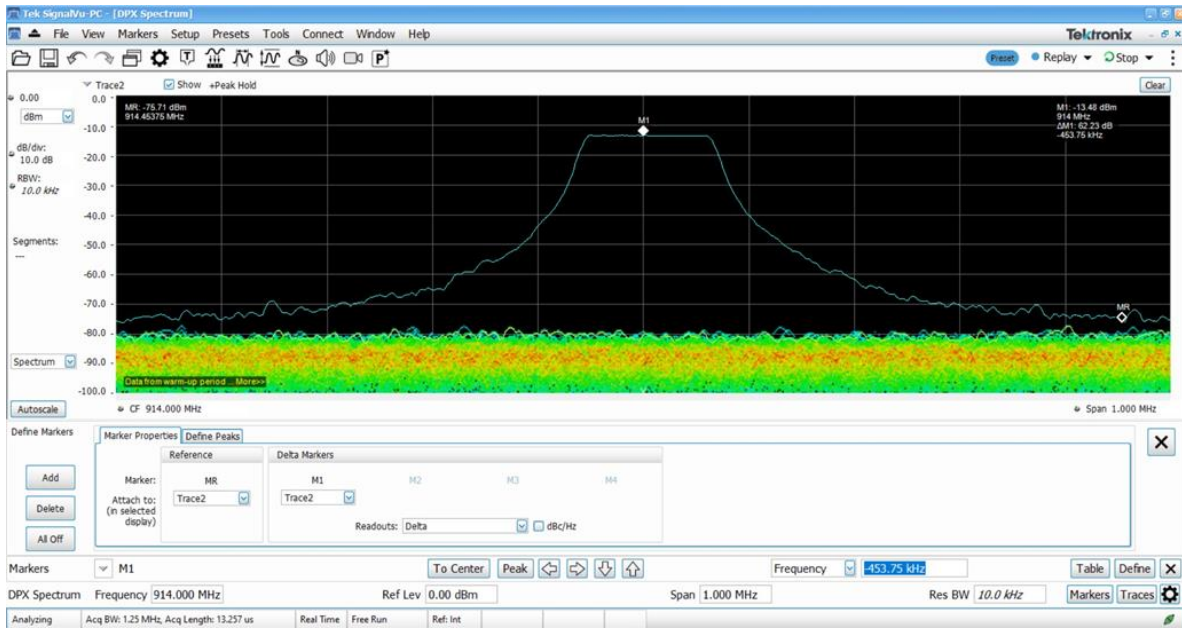


Figura 111: Medición de referencia con antenas a la par.

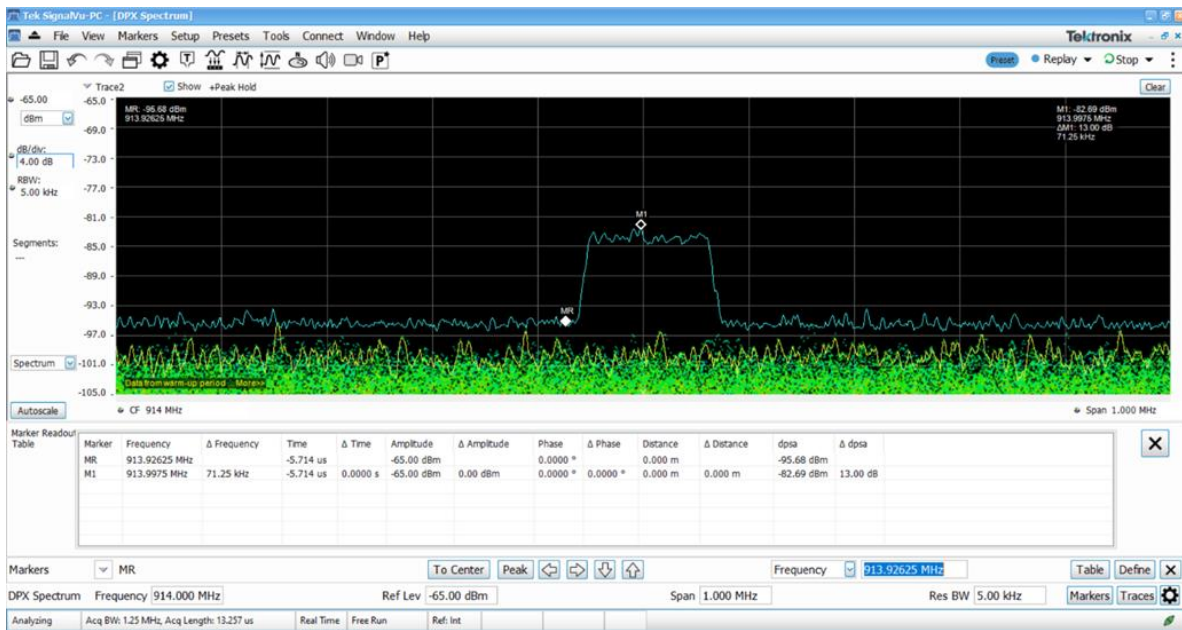


Figura 112: Medición 1 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

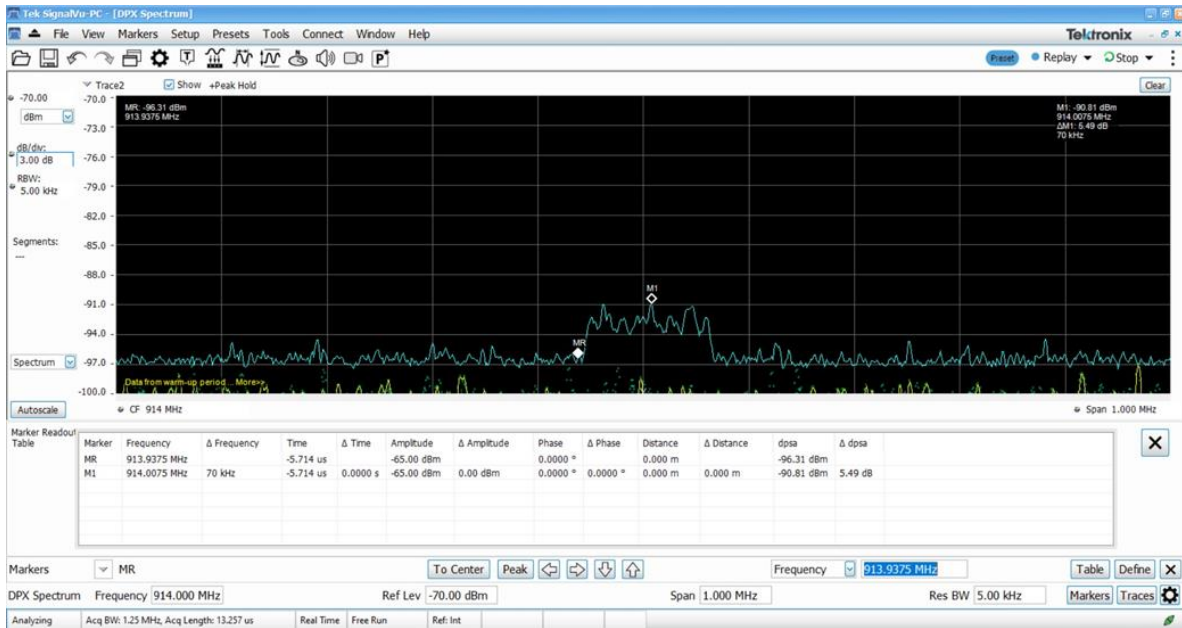


Figura 113: Medición 2 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

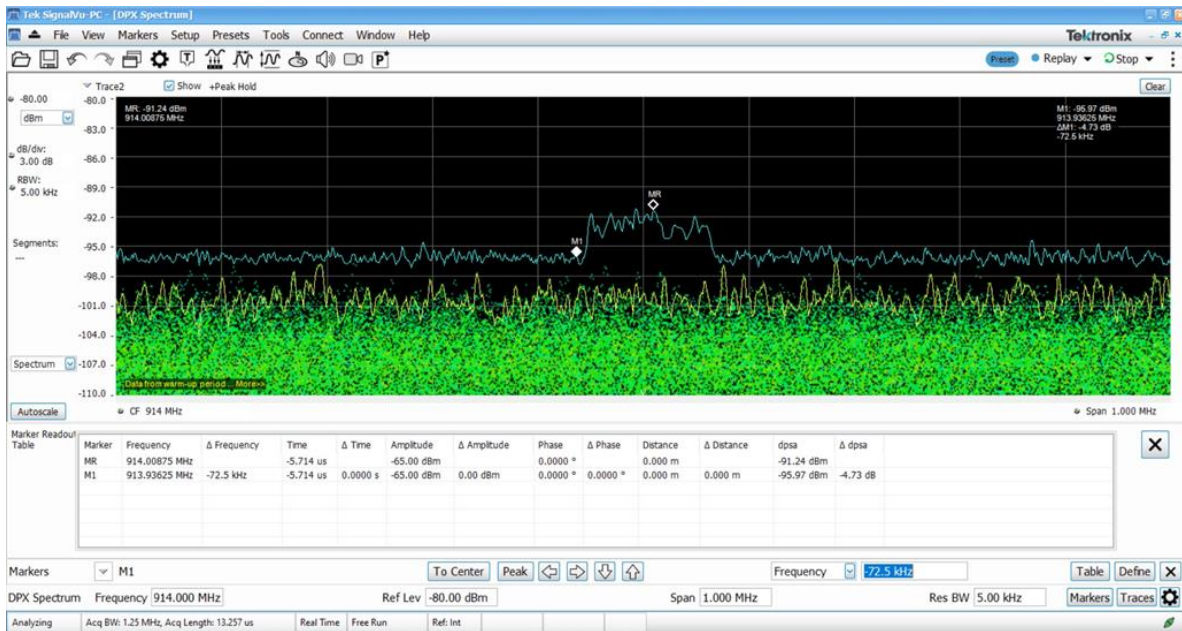


Figura 114: Medición 3 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

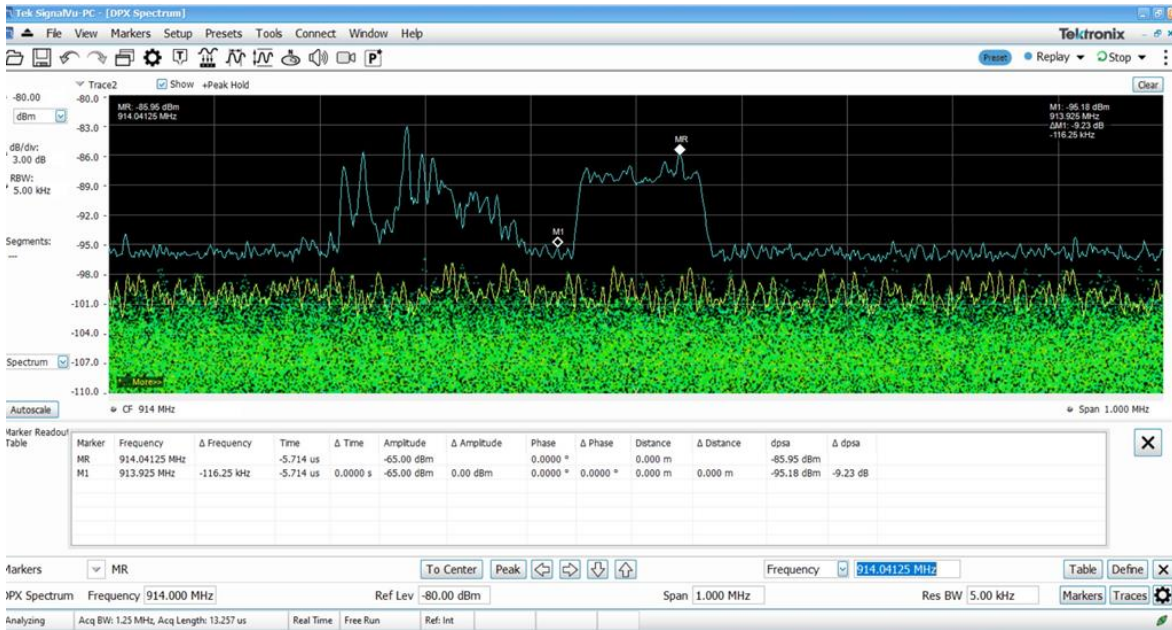


Figura 115: Medición 4 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

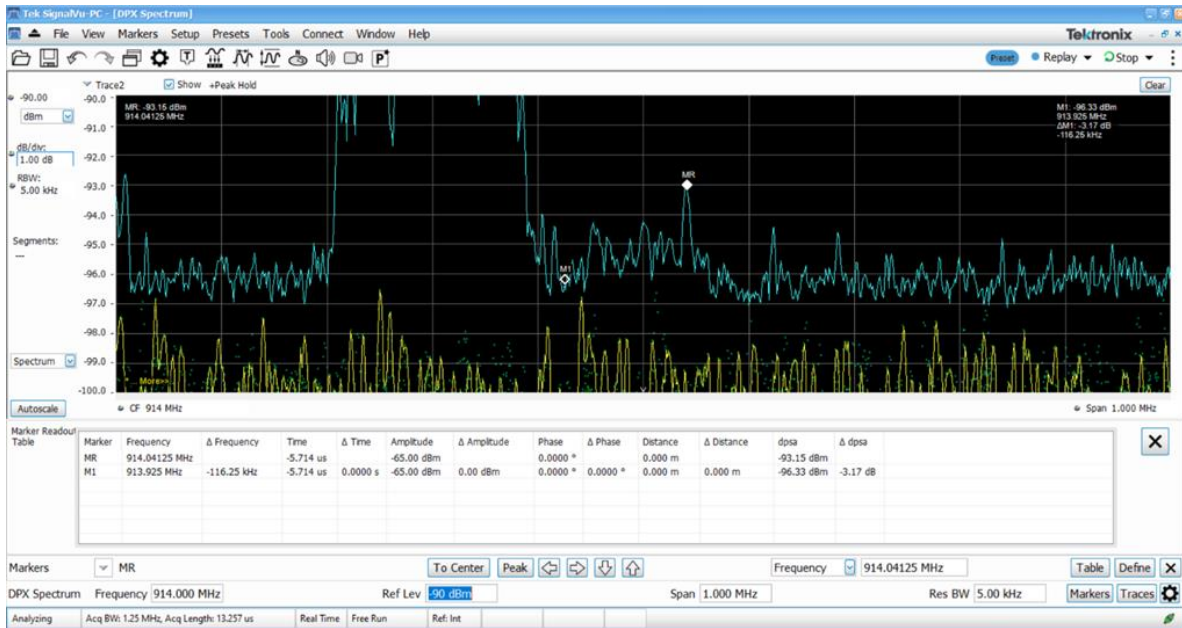


Figura 116: Medición 5 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

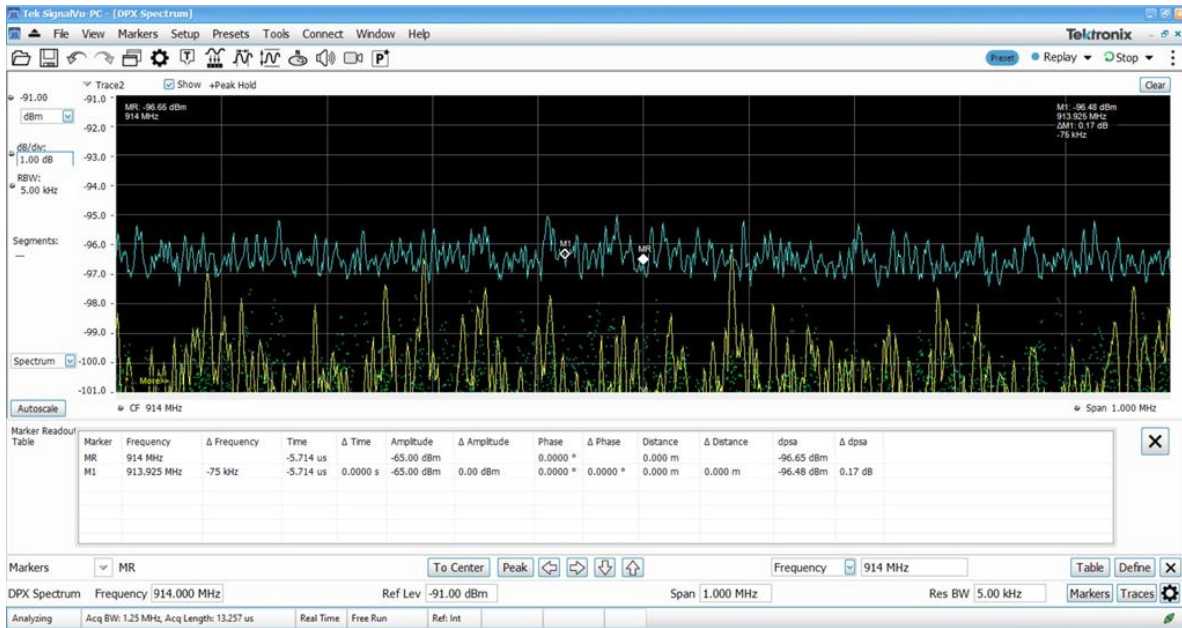


Figura 117: Medición 6 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

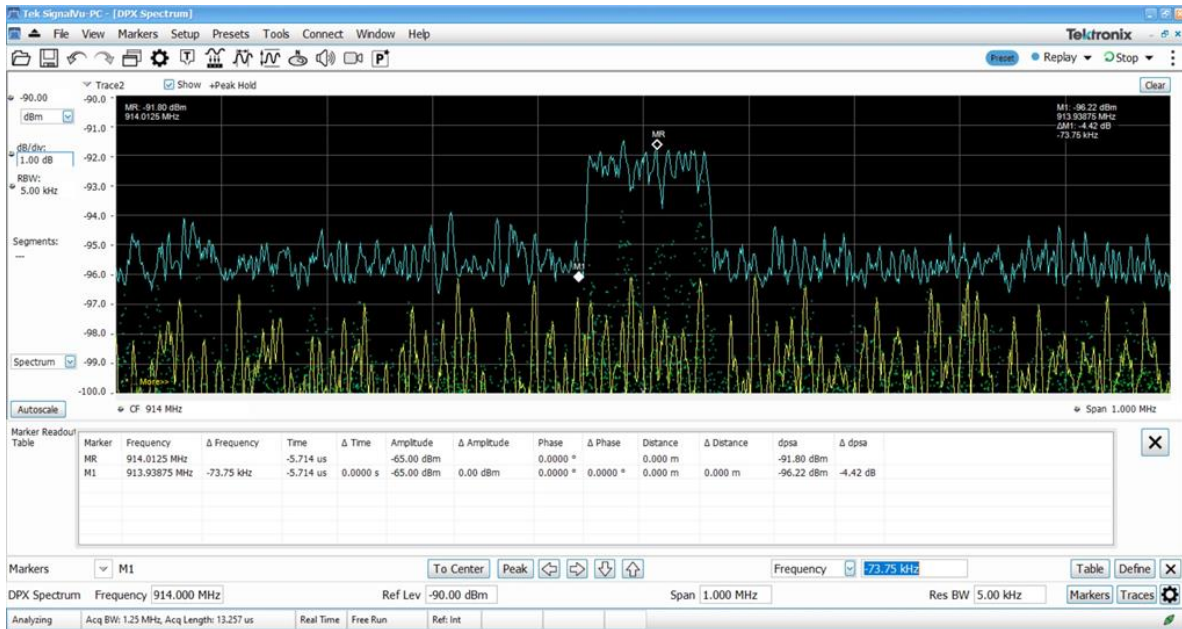


Figura 118: Medición 7 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

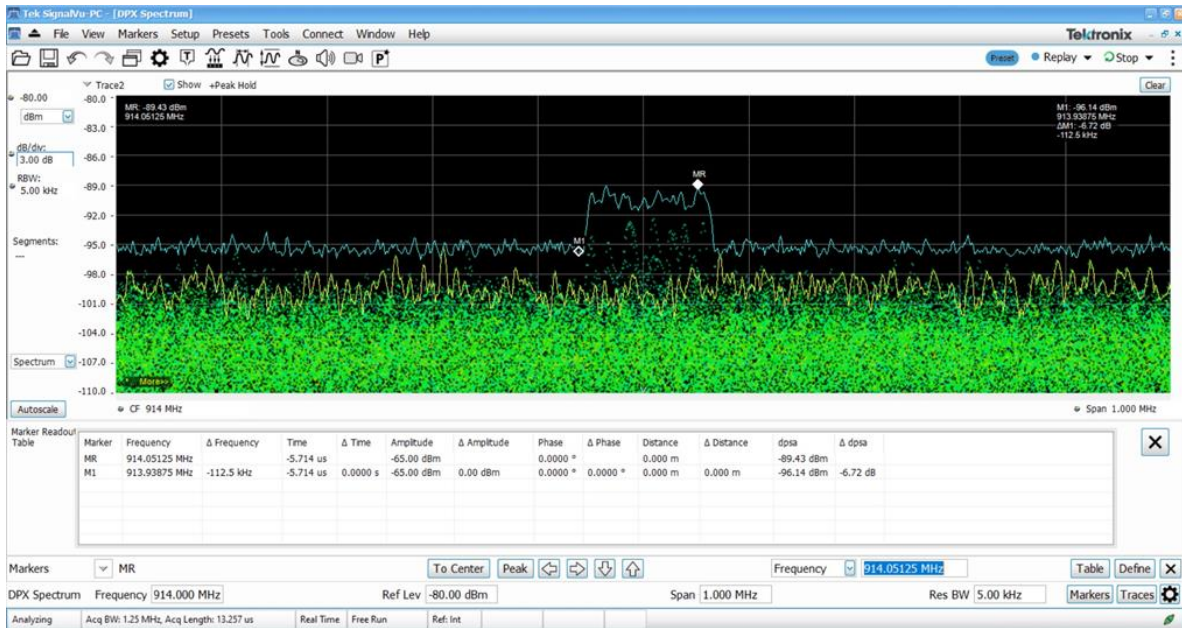


Figura 119: Medición 8 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

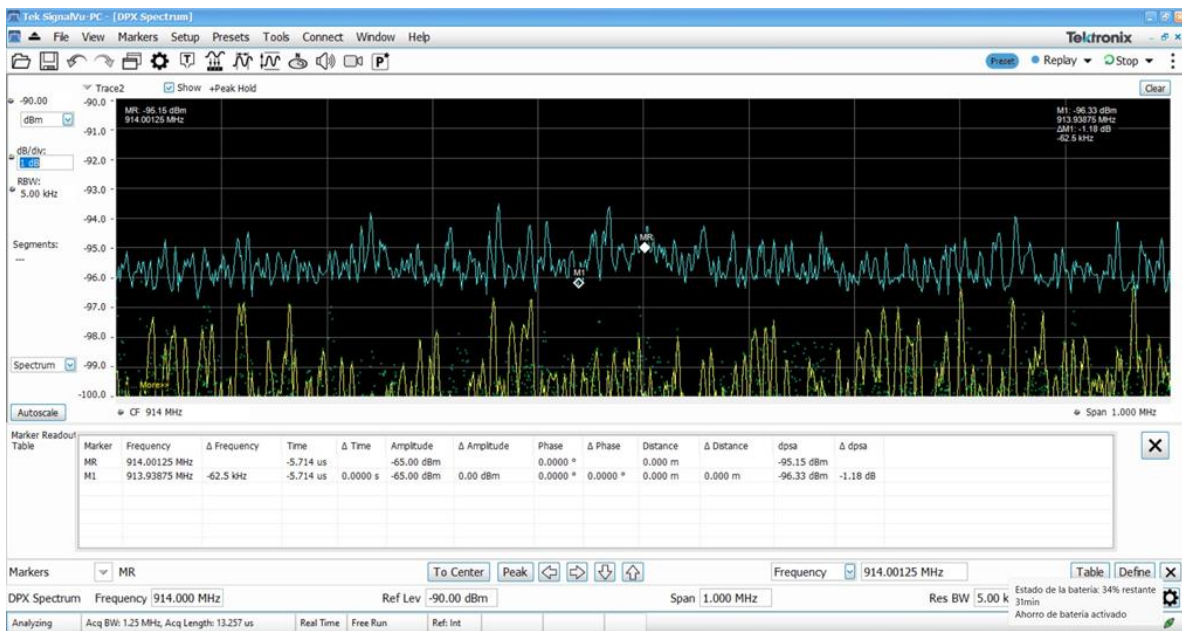


Figura 120: Medición 9 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

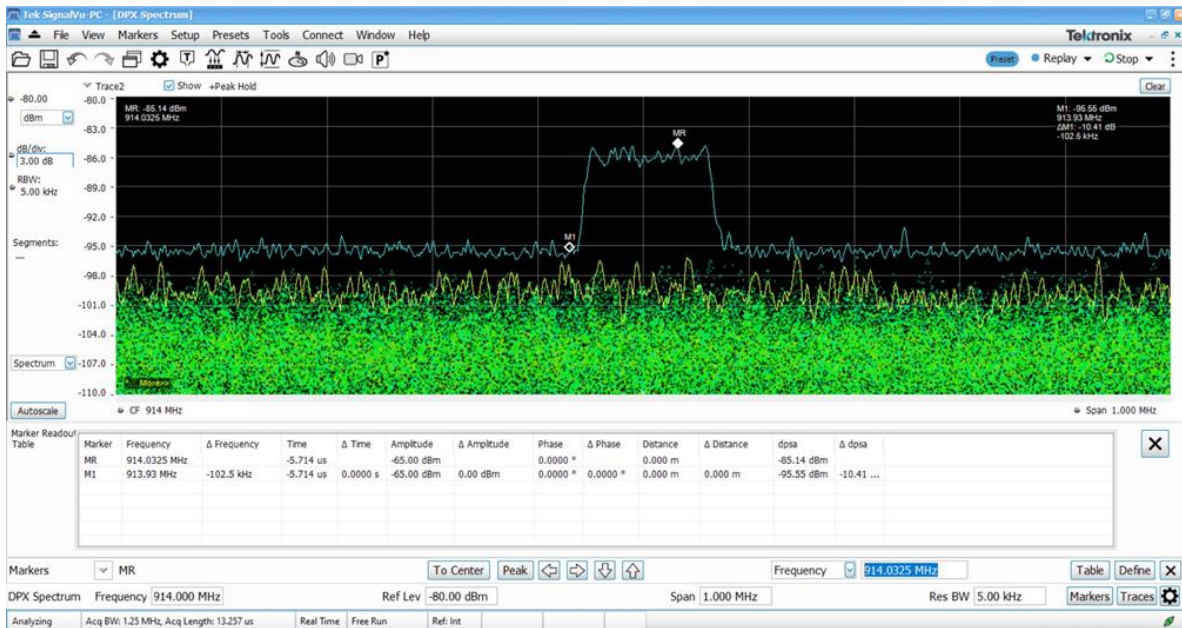


Figura 121: Medición 10 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.



Figura 122: Medición 11 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

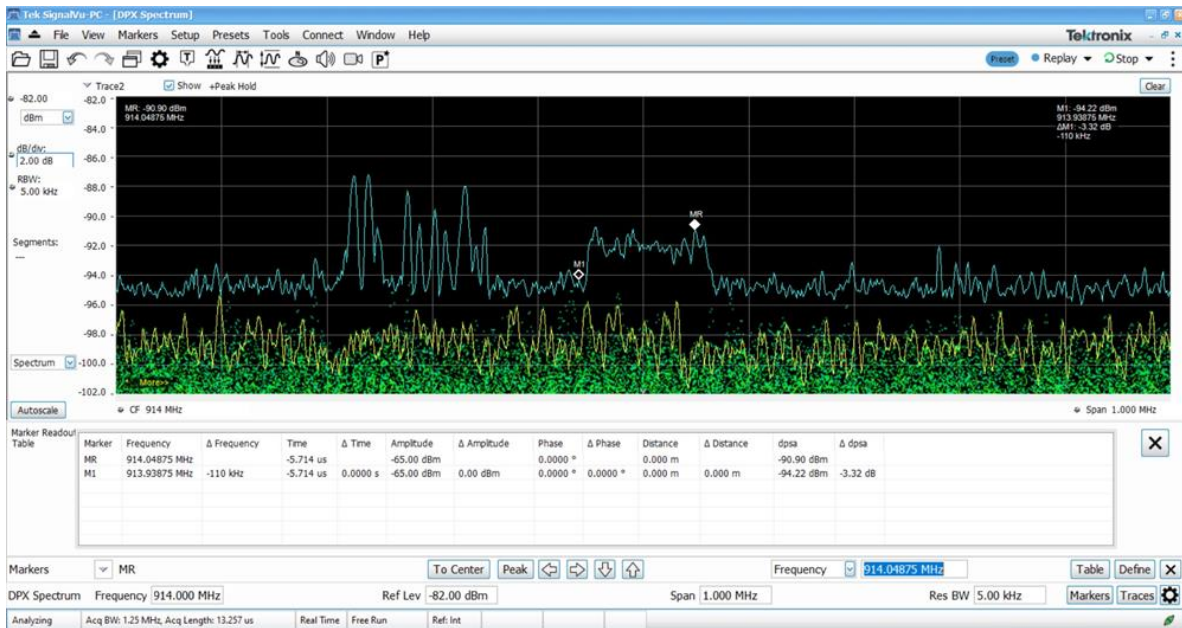


Figura 123: Medición 12 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

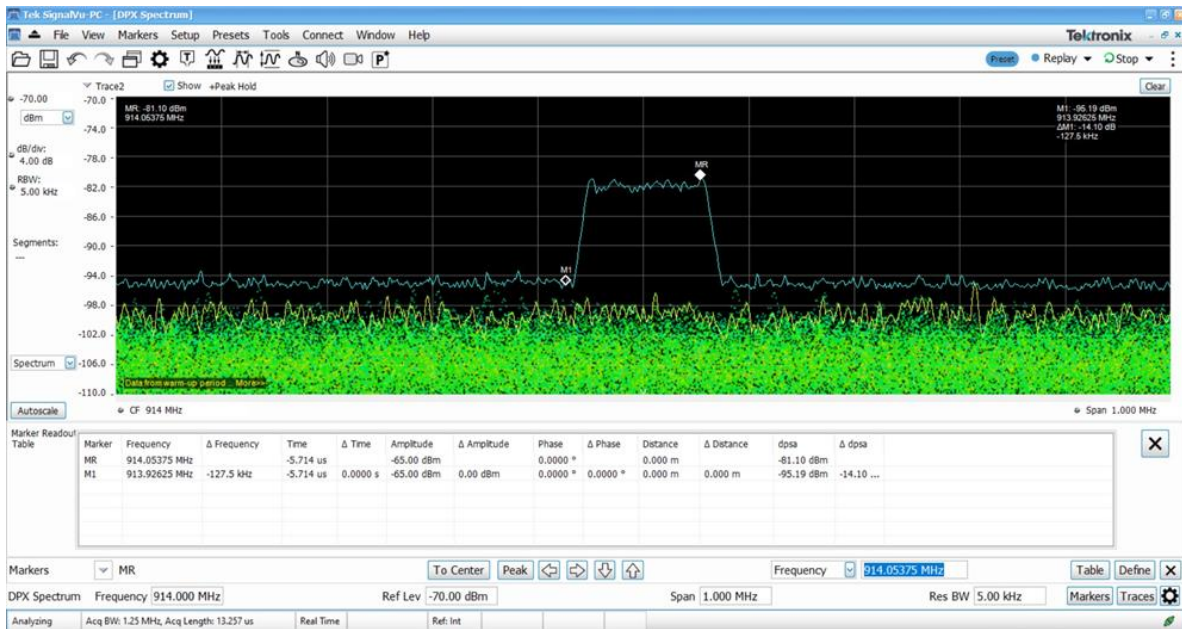


Figura 124: Medición 13 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

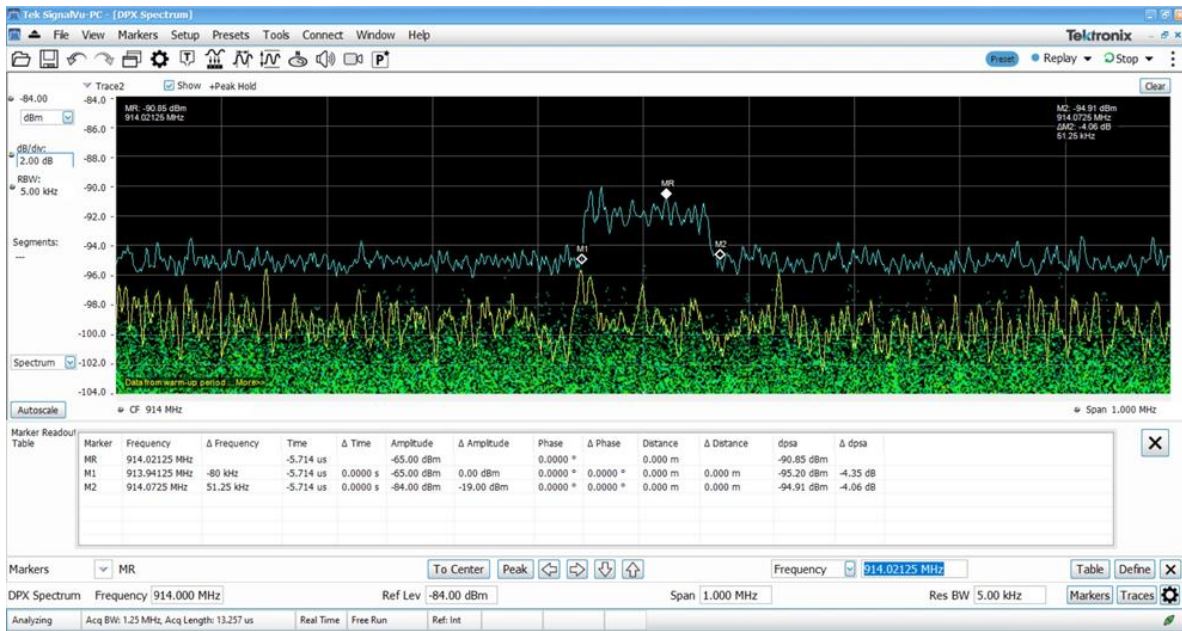


Figura 125: Medición 14 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

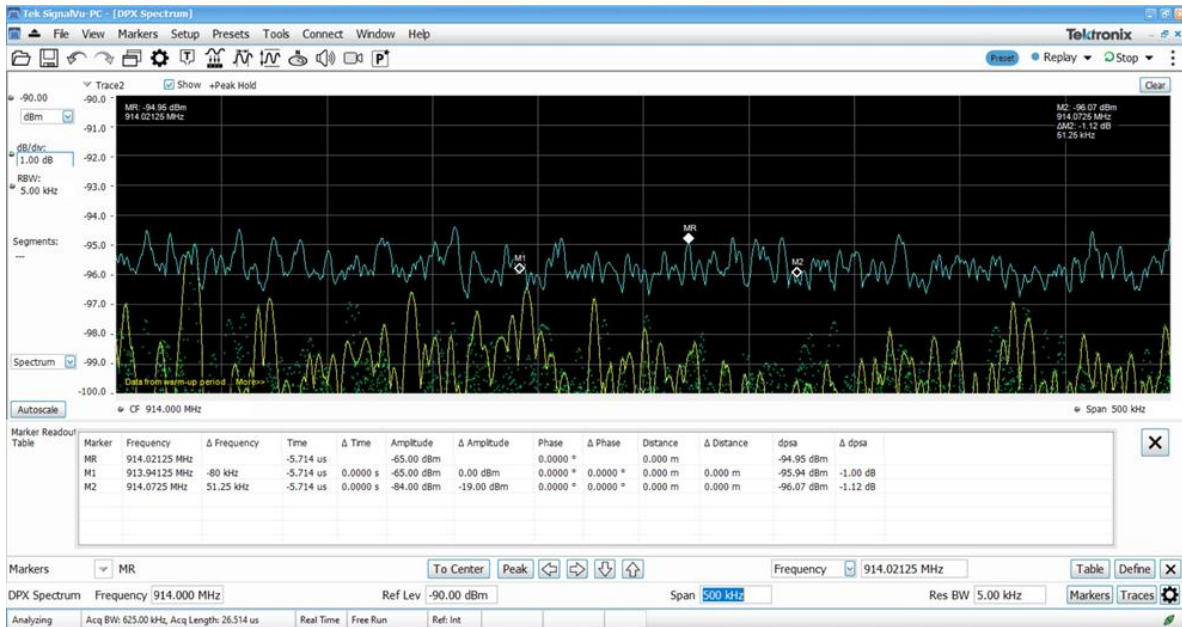


Figura 126: Medición 15 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

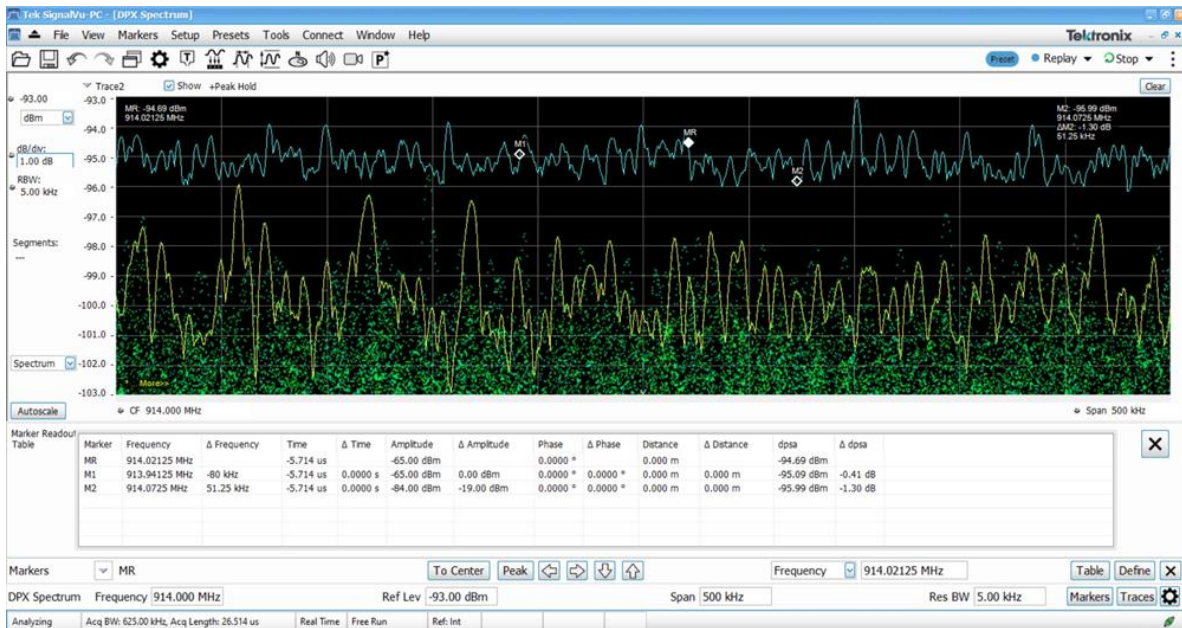


Figura 127: Medición 16 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

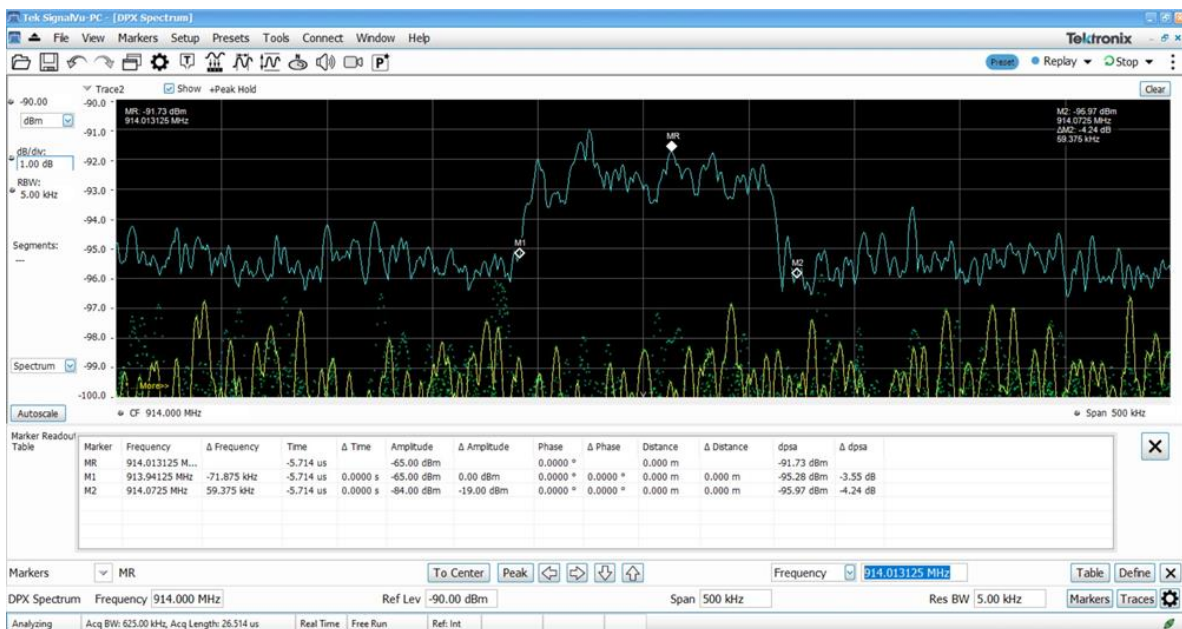


Figura 128: Medición 17 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

### Resultados de medición 17 en la FIA

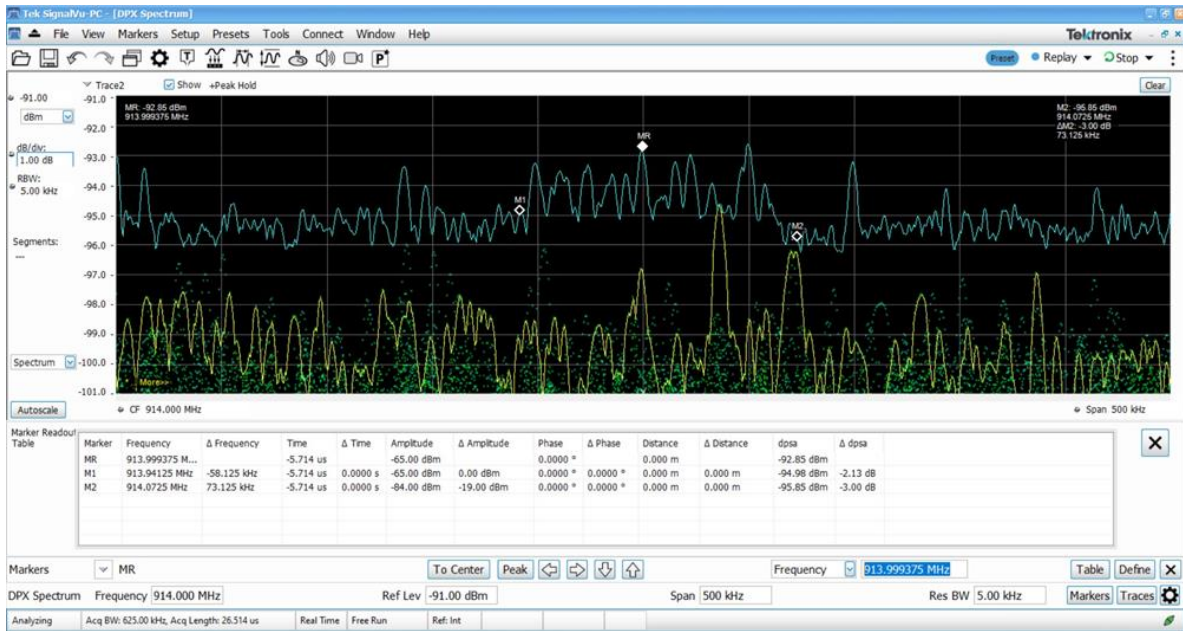


Figura 129: Medición 18 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.



Figura 130: Medición 19 en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.



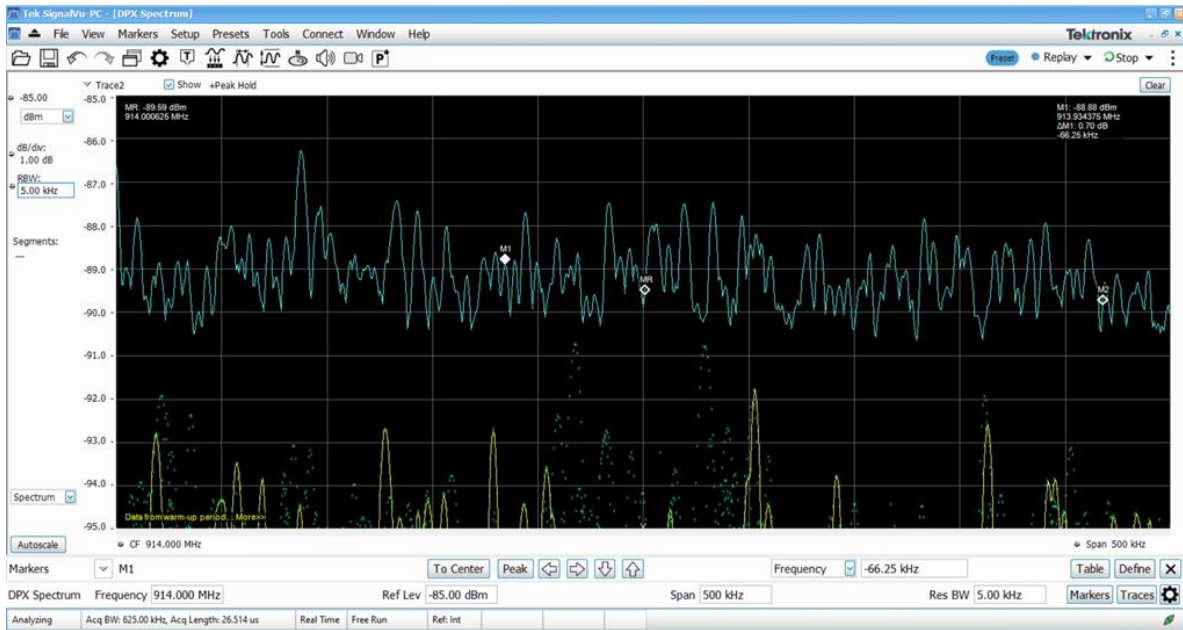


Figura 133: Medición 2 en la Facultad de Ciencias Económicas.

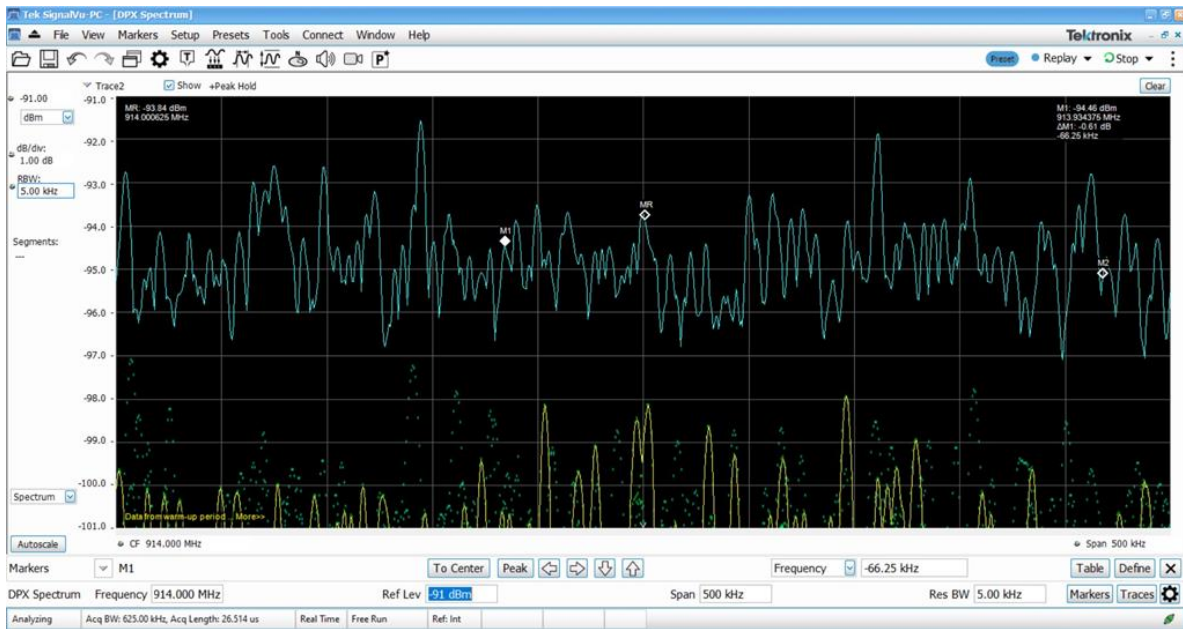


Figura 134: Medición 3 en la Facultad de Ciencias Económicas.

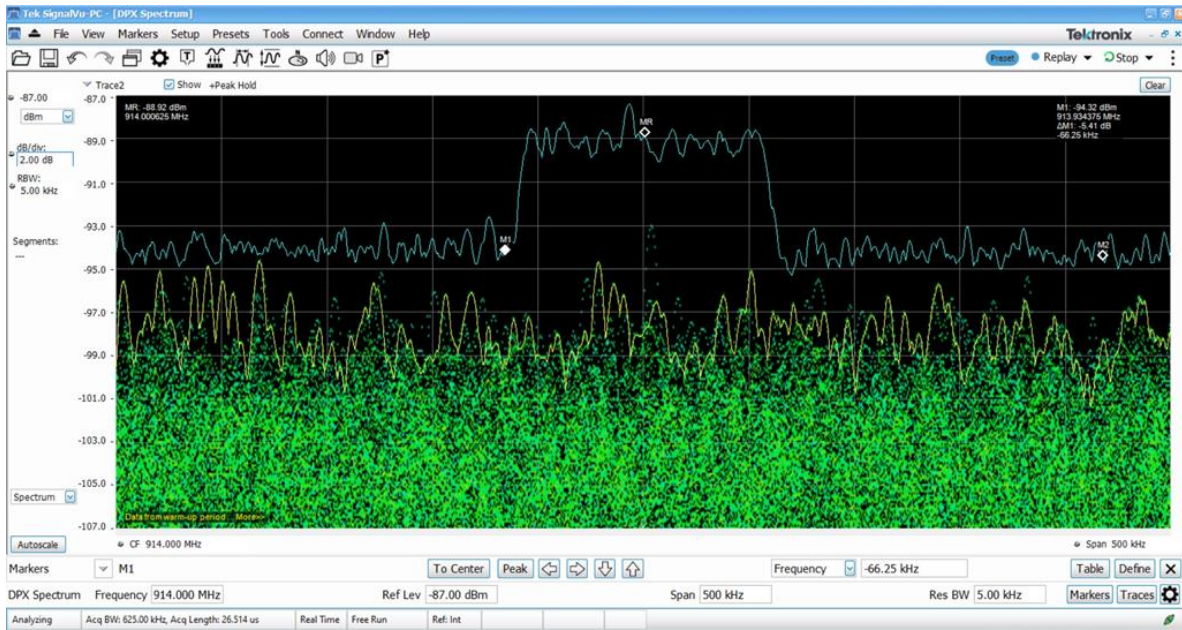


Figura 135: Medición 4 en la Facultad de Ciencias Económicas.

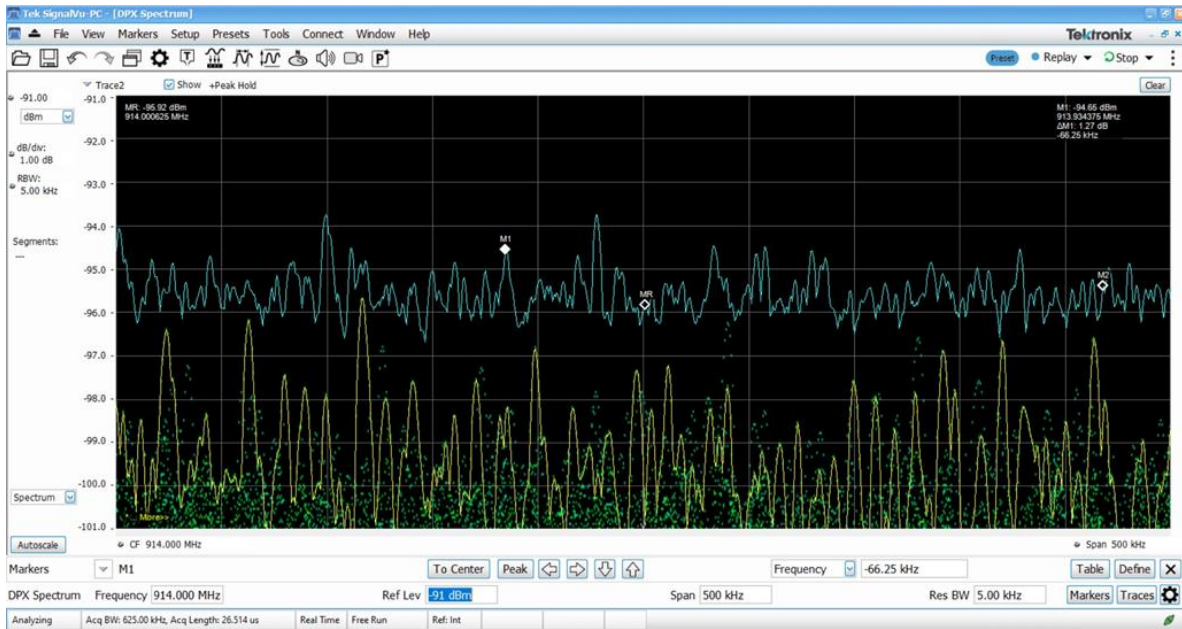


Figura 136: Medición 5 en la Facultad de Ciencias Económicas.

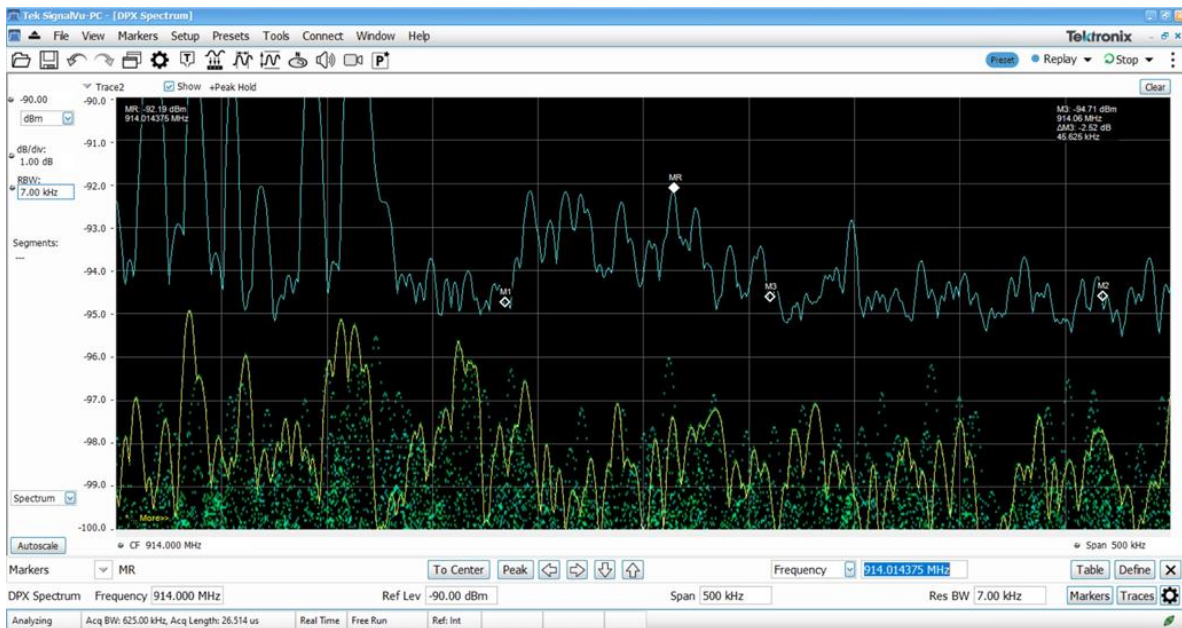


Figura 137: Medición 6 en la Facultad de Ciencias Económicas.

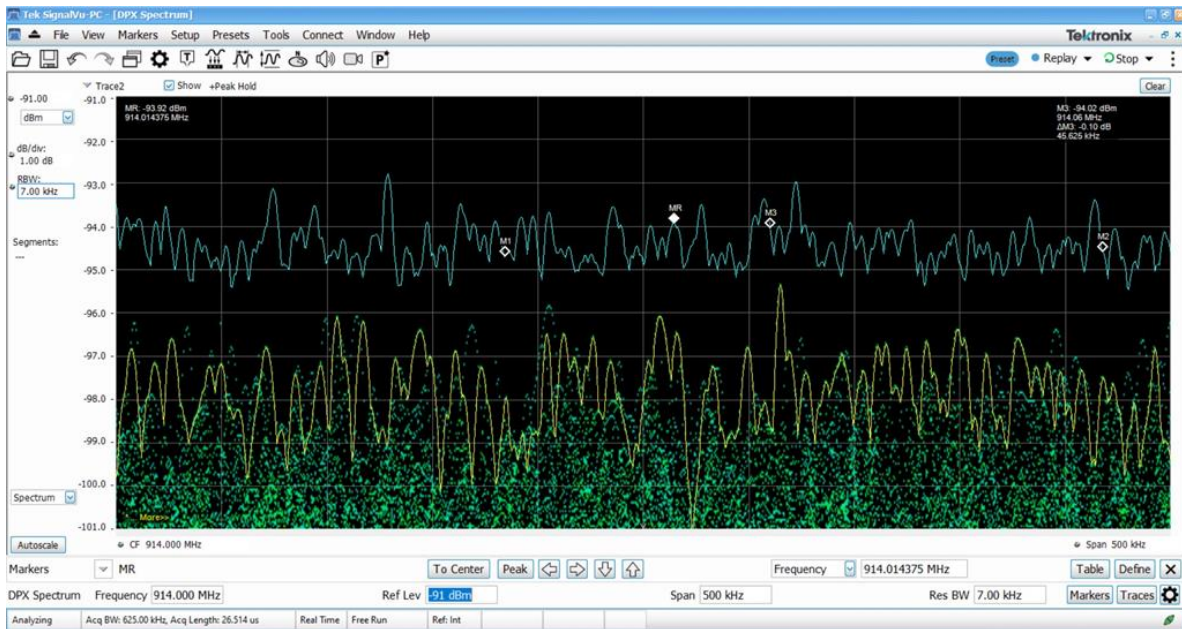


Figura 138: Medición 7 en la Facultad de Ciencias Económicas.

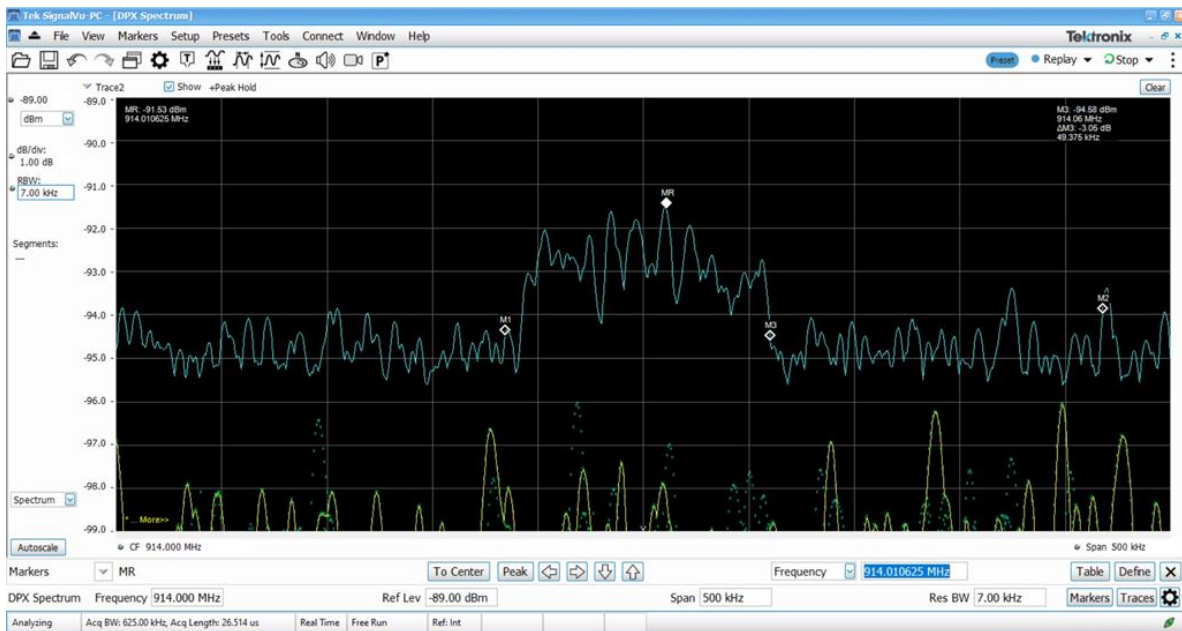


Figura 139: Medición 8 en la Facultad de Ciencias Económicas.

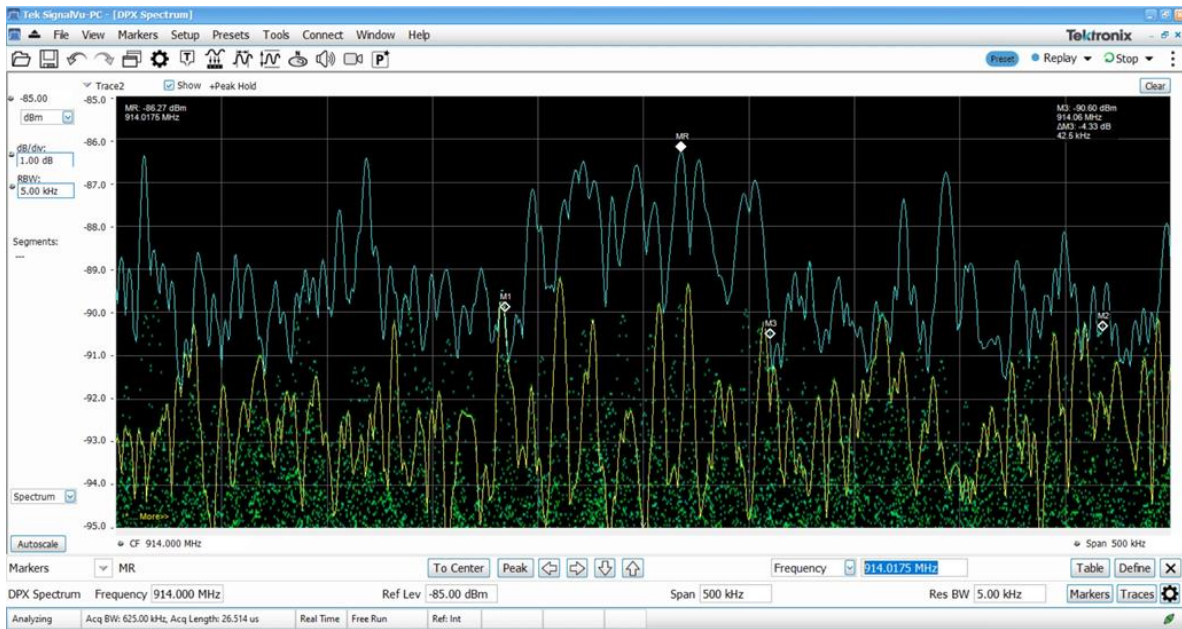


Figura 140: Medición 9 en la Facultad de Ciencias Económicas.

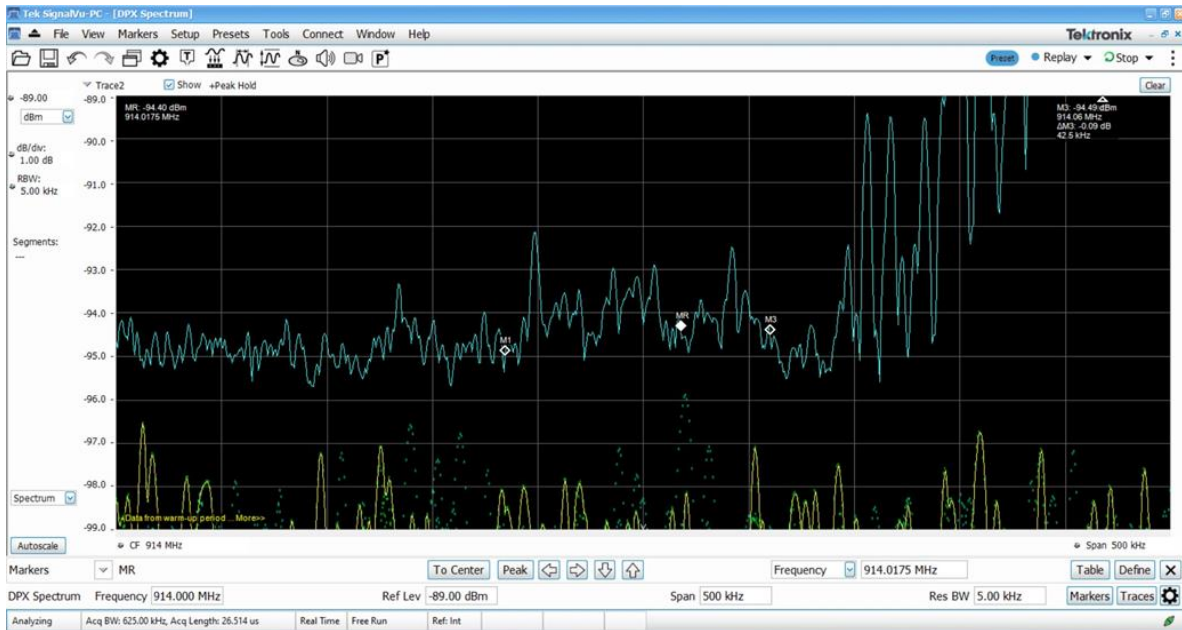


Figura 141: Medición 10 en la Facultad de Ciencias Económicas.

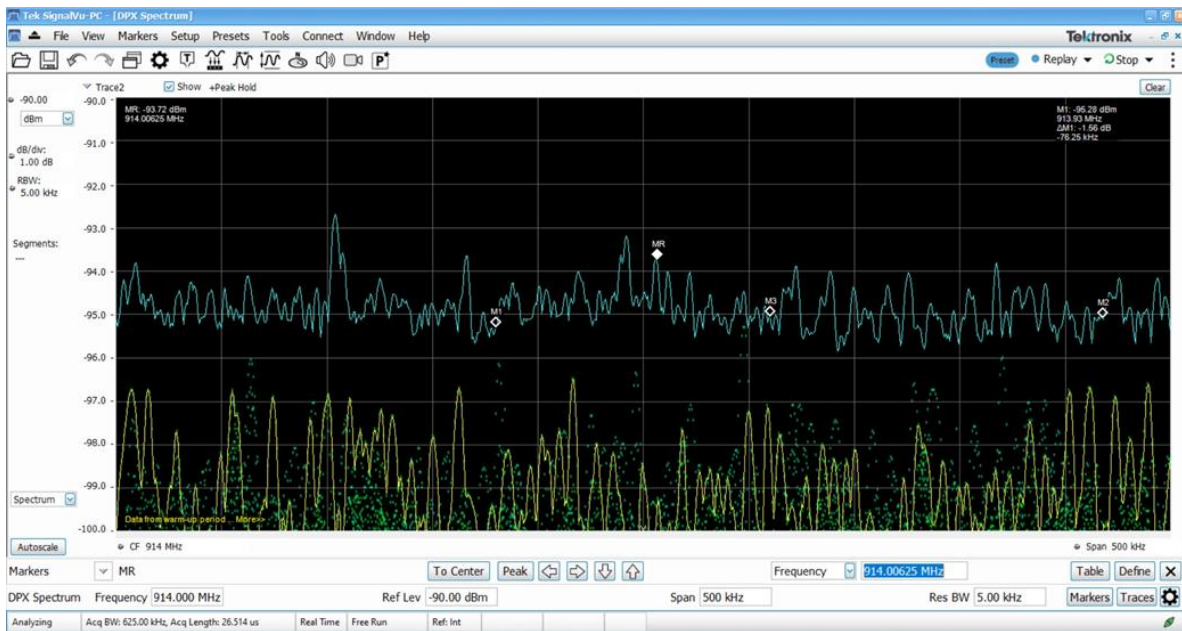


Figura 142: Medición 11 en la Facultad de Ciencias Económicas.

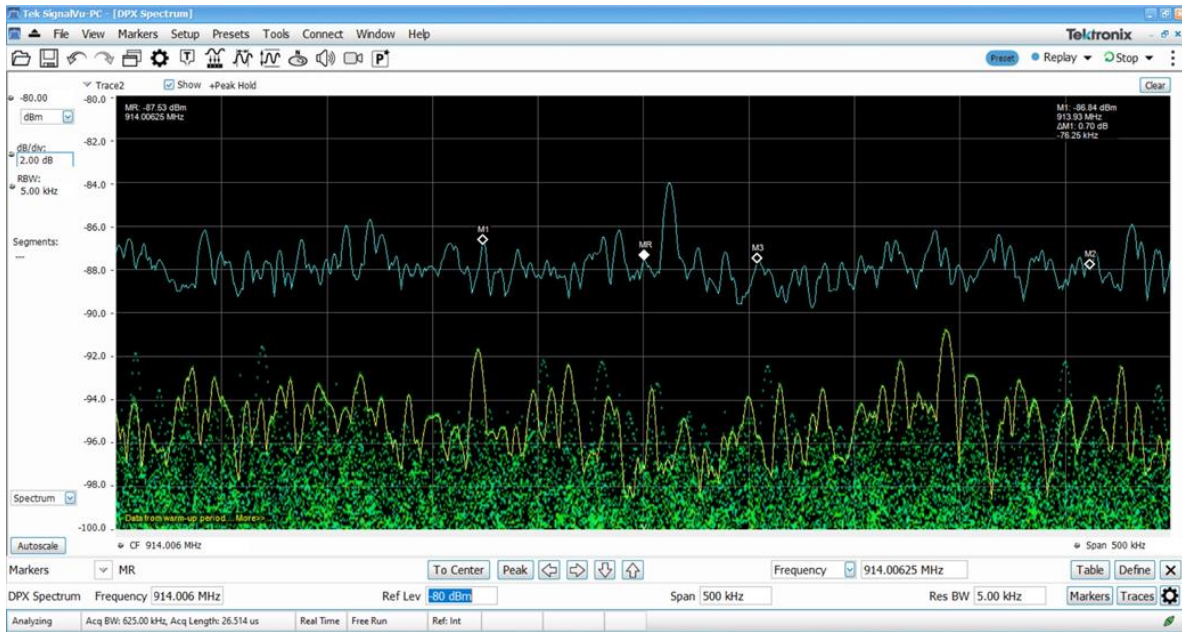


Figura 143: Medición 12 en la Facultad de Ciencias Económicas.

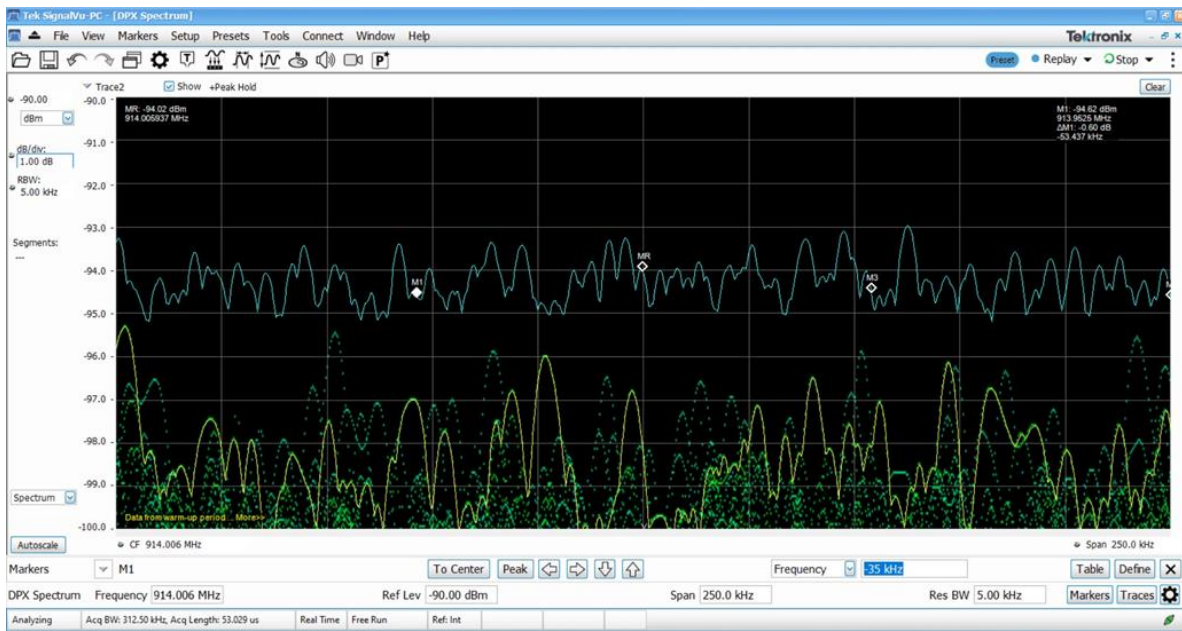


Figura 144: Medición 13 en la Facultad de Ciencias Económicas.

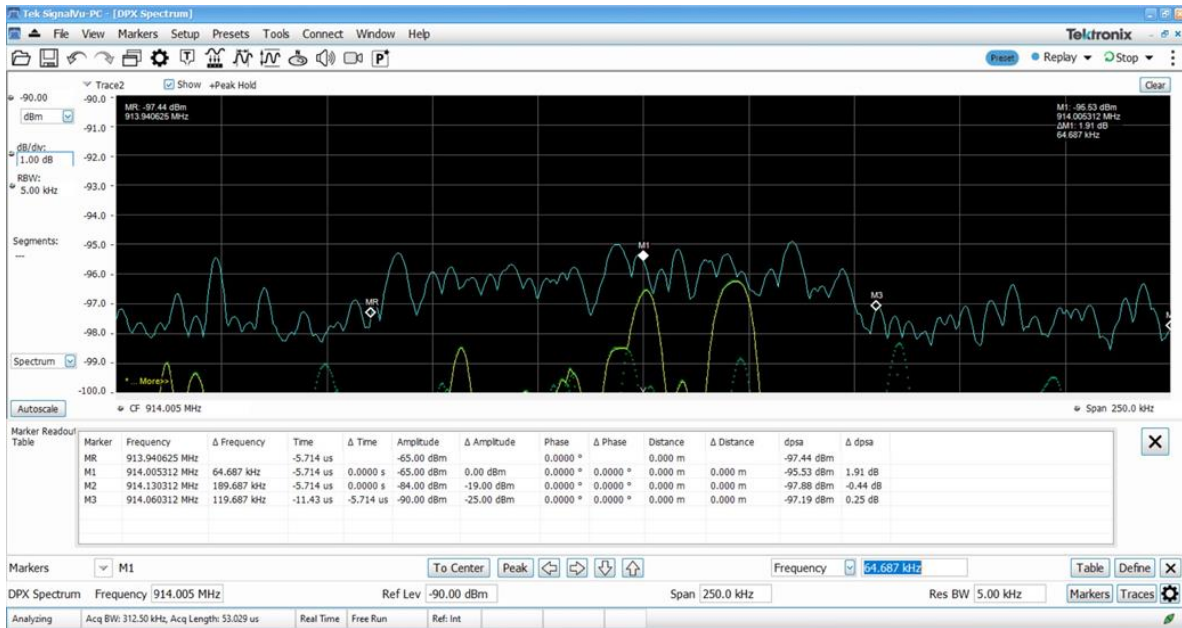


Figura 145: Medición 14 en la Facultad de Ciencias Económicas.

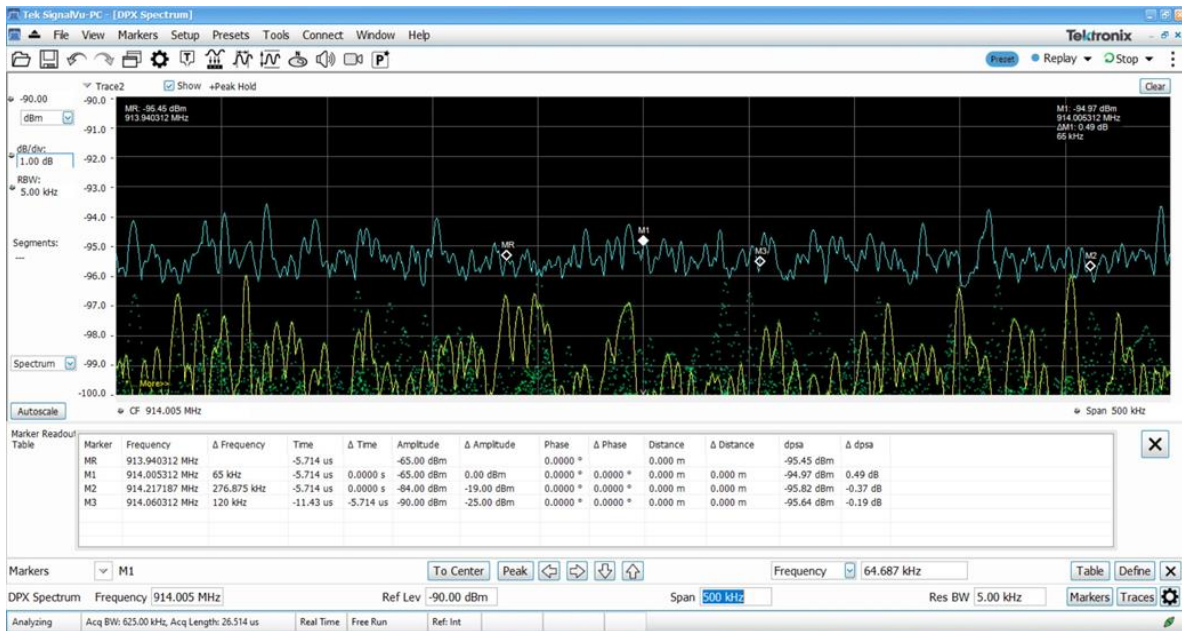


Figura 146: Medición 15 en la Facultad de Ciencias Económicas.

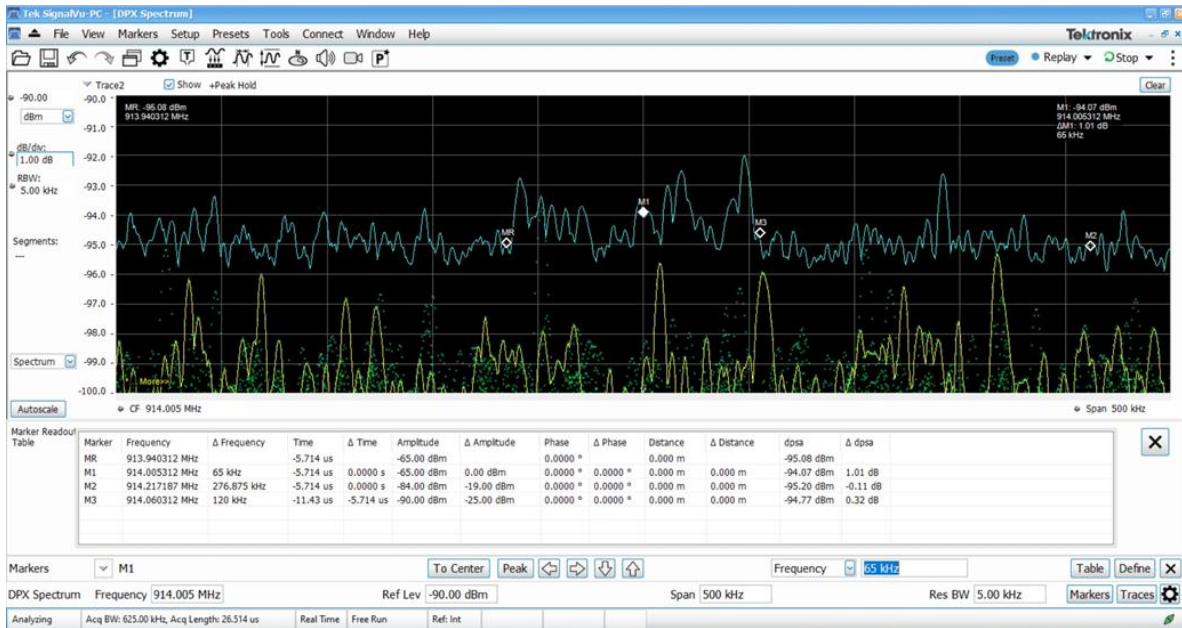


Figura 147: Medición 16 en la Facultad de Ciencias Económicas.

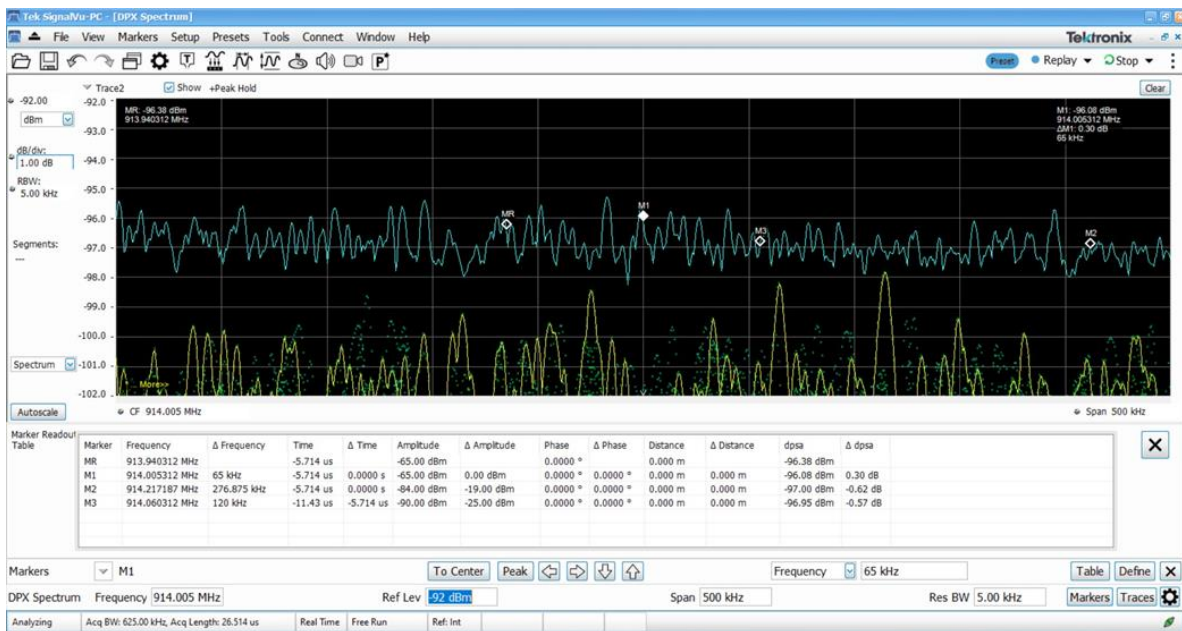


Figura 148: Medición 17 en la Facultad de Ciencias Económicas.

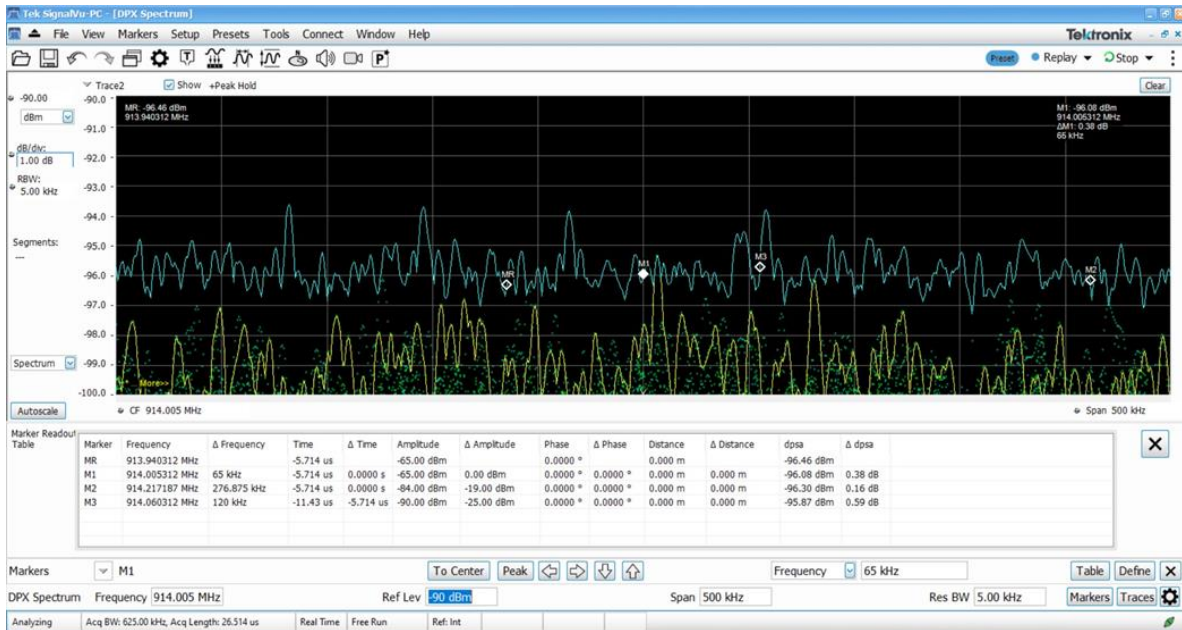


Figura 149: Medición 18 en la Facultad de Ciencias Económicas.

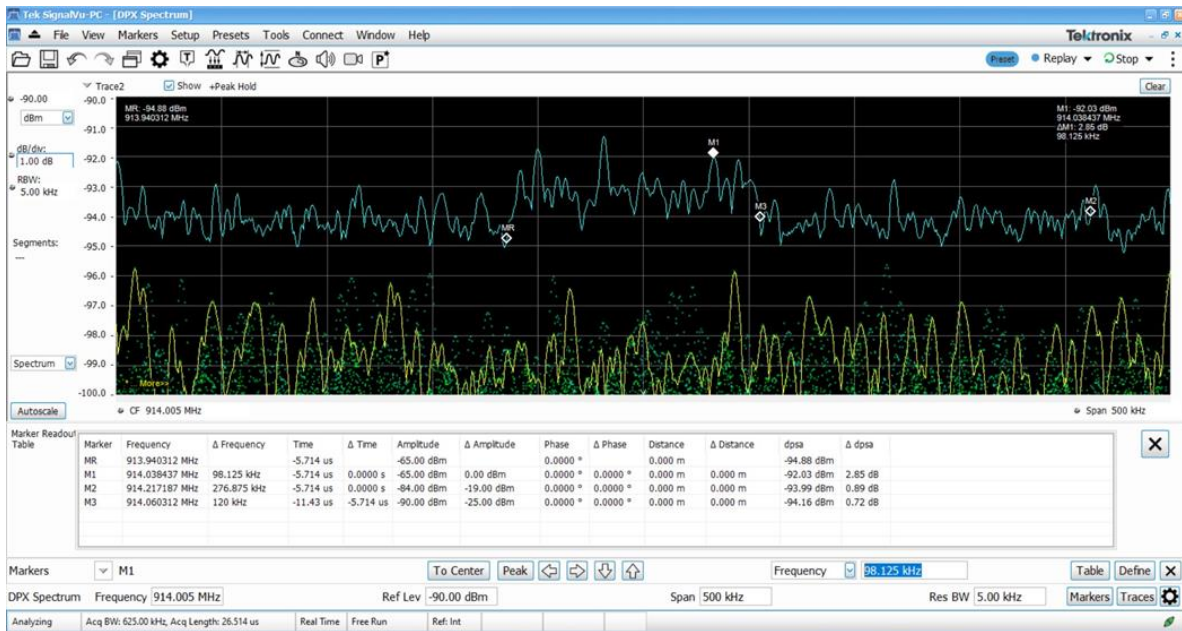


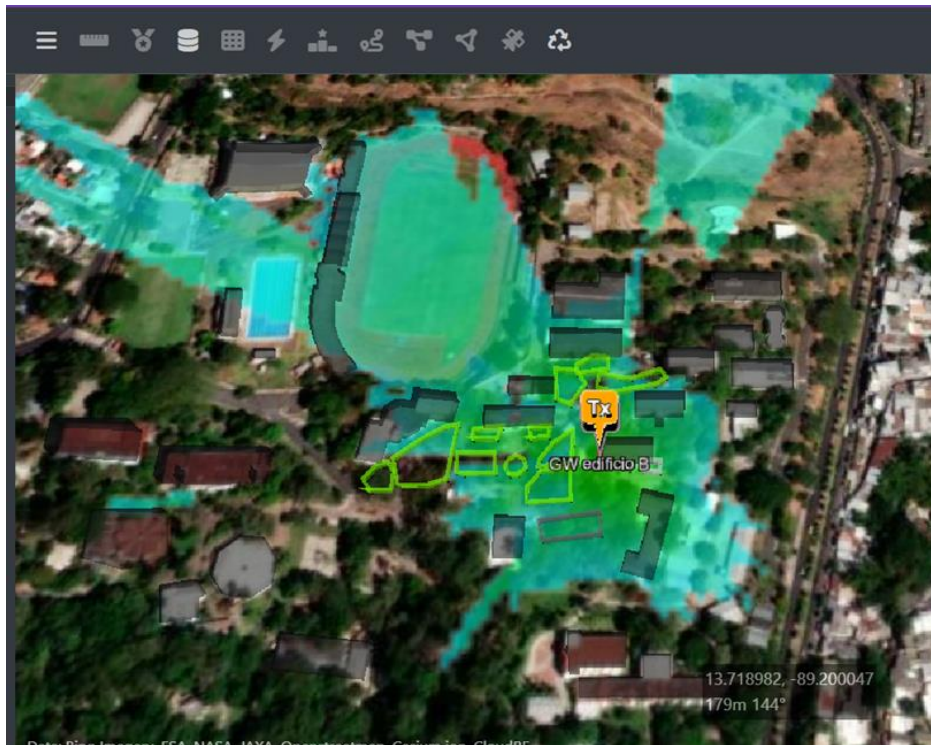
Figura 150: Medición 19 en la Facultad de Ciencias Económicas.

Los Resultados de ambas pruebas realizadas se colocan en una tabla y serán contrastados con los demás métodos de predicción de cobertura en la sección de resultados.

## ANÁLISIS DE COBERTURA POR SIMULACIÓN DE SOFTWARE.

para poder obtener una mejor comparación entre los resultados obtenidos de los métodos presentados anteriormente, se realiza una simulación con el software seleccionado anteriormente, el cual es Cloud RF, este se selecciona la ubicación del gateway y se realizan los cálculos para las dos zonas de estudio planteadas, las simulaciones muestran los siguientes resultados:

Para la facultad de ingeniería y arquitectura



*Figura 151: Simulación en Cloud RF para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.*



Figura 152: Gateway ubicado en el edificio B de la facultad de Ingeniería y Arquitectura.

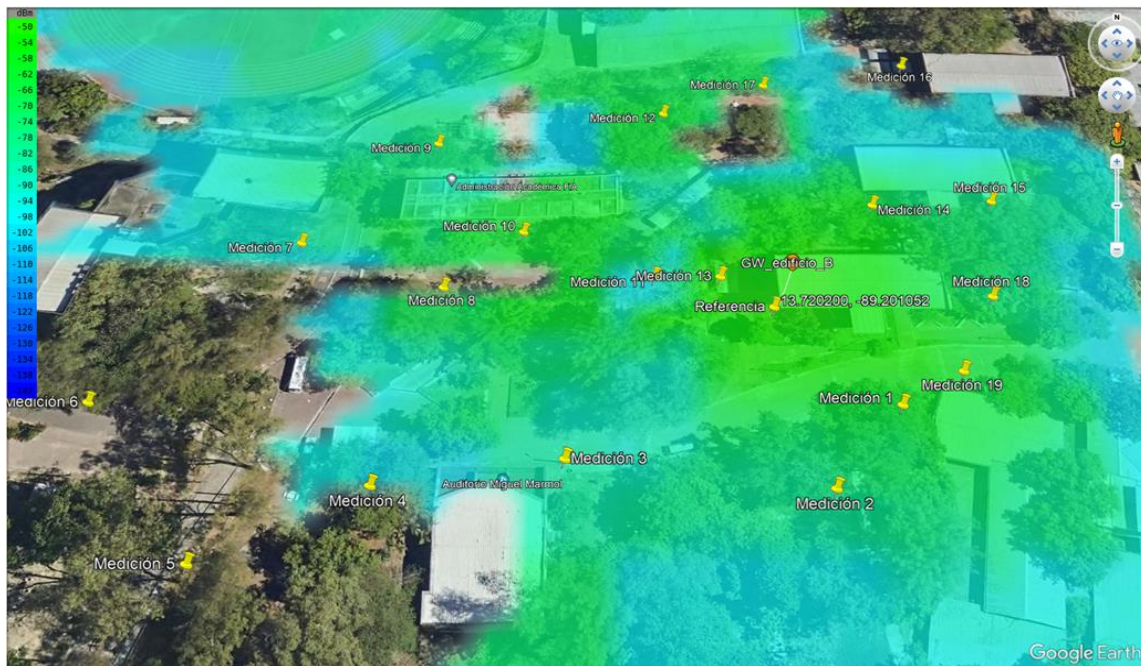


Figura 153: Mapa de cobertura visto en Google Earth.

De la imagen se puede mencionar que existen algunos puntos donde ya no existe cobertura y al contrastar con las mediciones tomadas anteriormente, se puede observar que efectivamente en estos sitios no se percibe señal desde el emisor como en el caso de los puntos 5 y 6, por ejemplo. Además, es importante también destacar que en las zonas más alejadas, sin que existan demasiados obstáculos de por medio, la exactitud de los resultados

mejora relativamente del valor de la medición y que la exactitud de los resultados mejora en las zonas alrededor de los edificios.

Para la facultad de ciencias económicas

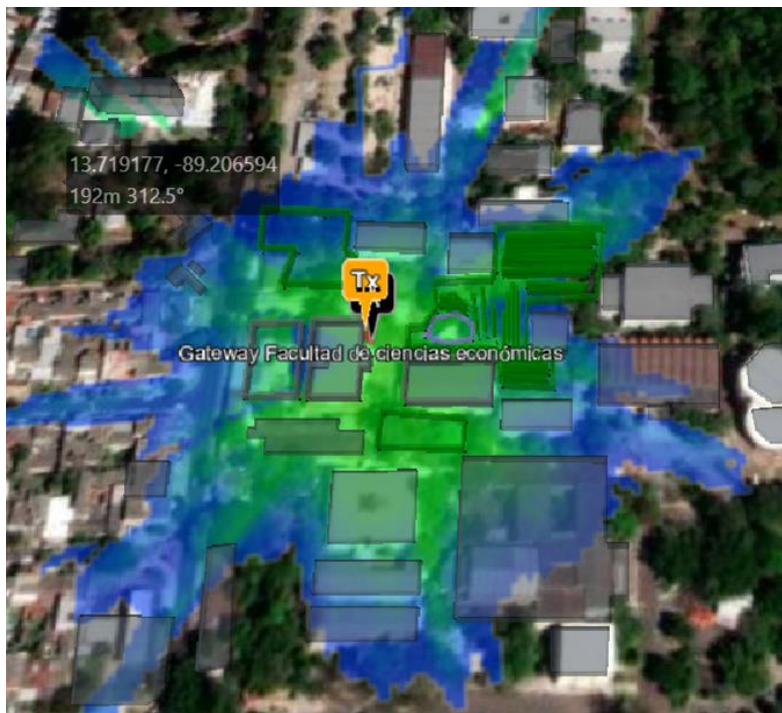


Figura 154: Mapa de cobertura simulado en Cloud RF para Facultad de Ciencias Económicas.

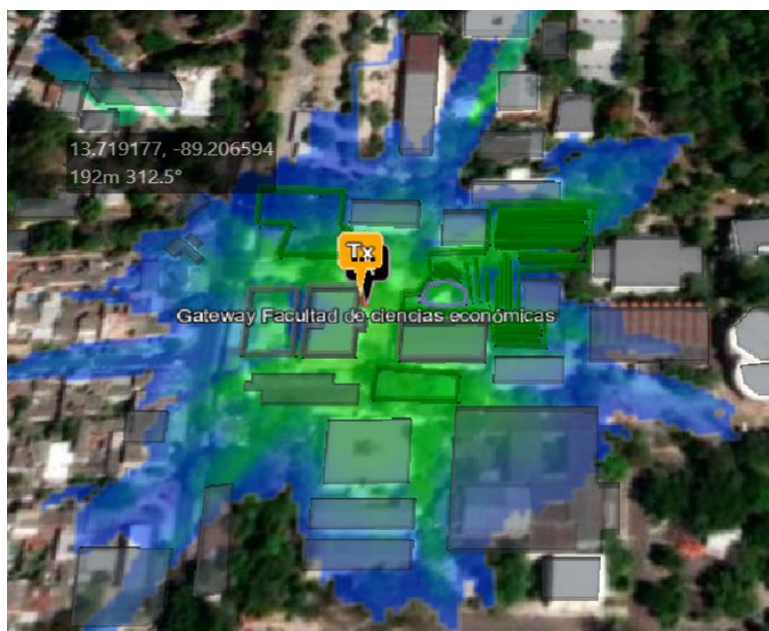


Figura 155: Resultados de simulación realizados en Cloud RF.

Visto desde Google Earth

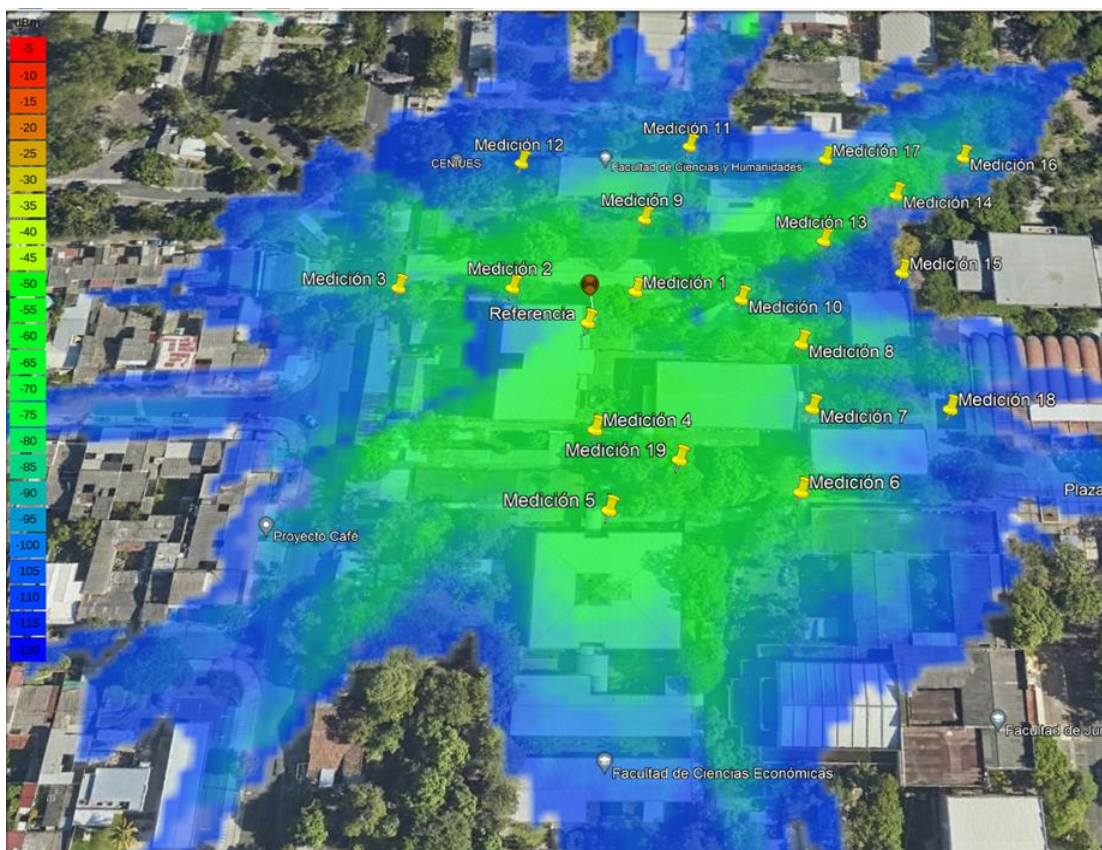


Figura 156: Cobertura de la facultad de ciencias económicas vista desde Google Earth.

Como en el caso anterior, se observa que existen ciertos sectores donde la cobertura se asemeja a los datos obtenidos, sin embargo, existen también algunos donde el dato es bastante disperso. Algo importante a destacar es que, a diferencia de la facultad de ingeniería y arquitectura, en esta zona existe mucha mayor presencia de obstáculos, tanto de edificios, techos de metal como de zonas de vegetación. Se observa que para zonas ubicadas detrás de edificios de considerable extensión, aún se percibe señal según la predicción, sin embargo, como se verá más adelante en la comparativa entre métodos, en estos puntos no se percibe señal según la medición directa a través de instrumentos.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE COBERTURA.

Se muestran a continuación los cuadros comparativos de resultados entre todos los métodos utilizados para la determinación de la intensidad de señal recibida en los distintos puntos de prueba.

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Tabla 9: Análisis de los resultados de los métodos de predicción de cobertura en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Punto de Prueba	Coordenadas Latitud/longitud	Nivel de Transmisión	Distancia	Descripción del Vano	Nivel de recepción en RSA 306B	Nivel de recepción con TTGO ESP32	Nivel de recepción simulación	cálculos matemáticos
Referencia	13.720200 / -89.201052	20 dBm	0.1 m	Tx y Rx a la par.	-13.48 dBm	-28 dBm		
<b>Punto 1</b>	13.720025 / -89.200881	20 dBm	26.74 m	El vano atraviesa una esquina de pared al inicio del trayecto, no existe interferencia debida a vegetación.	-82.69 dBm	-95 dBm	-74 dBm	-88.06 dBm
<b>Punto 2</b>	13.719891 / -89.200997	20 dBm	36.10 m	El vano atraviesa una edificación, no existe interferencia debida a vegetación.	-90.81 dBm	-105 dBm	-82 dBm	-95.67 dBm
<b>Punto 3</b>	13.719939 / -89.201379	20 dBm	47.50 m	El vano atraviesa una zona verde con árboles en la línea vista.	-91.24 dBm	-103 dBm	-86 dBm	-62.24 dBm
<b>Punto 4</b>	13.719897 / -89.201653	20 dBm	75.74 m	El vano pasa a través de zonas verdes con árboles y la esquina del auditorium.	-85.95 dBm	-106 dBm	-98 dBm	-75.98 dBm
<b>Punto 5</b>	13.719781 / -89.201886	20 dBm	103.72 m	El vano atraviesa dos zonas verdes con árboles, el auditorium y pasa además por una cabaña.	No se recibe ninguna señal	-108 dBm	No existe cobertura en este punto	-92.68 dBm
<b>Punto 6</b>	13.720024 / -89.202077	20 dBm	114 m	El vano atraviesa varios árboles entre sus puntos de inicio y fin.	No se recibe ninguna señal	-110 dBm	No existe cobertura en este punto	-79.34 dBm

<b>Punto 7</b>	13.720354 / -89.201825	20 dBm	86.52 m	El vano atraviesa 3 zonas verdes con árboles en la línea vista.	-91.80 dBm	-105 dBm	-90 dBm	-74.66 dBm
<b>Punto 8</b>	13.720256 / -89.201578	20 dBm	58.21 m	El vano atraviesa varios árboles en su trayectoria.	-89.43 dBm	-103 dBm	-86 dBm	-68.03 dBm
<b>Punto 9</b>	13.720603 / -89.201616	20 dBm	75.80 m	Edificio de administración académica en medio del vano, además de la presencia de árboles. No existe línea vista.	No se recibe ninguna señal	-110 dBm	-86 dBm	
<b>Punto 10</b>	13.720378 / -89.201452	20 dBm	48.13 m	Línea vista obstaculizada por pocos árboles.	-85.14 dBm	-90 dBm	-66 dBm	-64.17 dBm
<b>Punto 11</b>	13.720267 / -89.201236	20 dBm	22.10 m	El vano solo es obstaculizado por ramas en su trayectoria.	-77.06 dBm	-88 dBm	-94 dBm	-53.95 dBm
<b>Punto 12</b>	13.720660 / -89.201202	20 dBm	51.70 m	En el vano se distinguen árboles, poste de tendido eléctrico y techo de metal.	-90.90 dBm	-107 dBm	-86 dBm	-66.21 dBm
<b>Punto 13</b>	13.720263 / -89.201131	20 dBm	11.13 m	Línea vista obstruida por techo metálico.	-81.10 dBm	-89 dBm	-50 dBm	-46.07 dBm
<b>Punto 14</b>	13.720407 / -89.200866	20 dBm	28.25 m	El vano atraviesa dos pisos del edificio B, 2 árboles y un techo de metal. No existe línea vista.	-90.85 dBm	-104 dBm	-74 dBm	-89.35 dBm
<b>Punto 15</b>	13.720417 / -89.200663	20 dBm	46.00 m	El vano atraviesa el edificio B y escaleras metálicas. No existe línea vista.	No se recibe ninguna señal	-115 dBm	-86 dBm	-96.44 dBm
<b>Punto 16</b>	13.720757 / -89.200753	20 dBm	67.40 m	El vano pasa a través de 2 edificios (B y C) y dos zonas con árboles. No existe	No se recibe ninguna señal	-119 dBm	No existe cobertu ra en este	-98.65 dBm

				línea vista.				punto	
<b>Punto 17</b>	13.720718 / -89.201014	20 dBm	55.03 m	Presencia moderada de árboles en la trayectoria que obstruyen el enlace.	-91.73 dBm	-109 dBm	-90 dBm	-80.64 dBm	
<b>Punto 18</b>	13.720219 / -89.200706	20 dBm	36.52 m	El vano atraviesa todo el largo del edificio B. no existe línea vista	No se recibe ninguna señal	-115 dBm	-82 dBm	-83.68 dBm	
<b>Punto 19</b>	13.720083 / -89.200779	20 dBm	32.05 m	El vano atraviesa la pared externa del edificio B al inicio del trayecto, no existe interferencia debida a vegetación.	-88.96 dBm	-105 dBm	-70 dBm	-78.75 dBm	

Tabla 10: Análisis de los resultados de los métodos de predicción de cobertura en la Facultad de Ciencias Económicas.

Punto de Prueba	Coordenadas Latitud/longitud	Nivel de Transmision	Distancia	Descripcion del Vano	Nivel de Recepcion en RSA 306B	Nivel de Recepcion con TTGO ESP32	Nivel de recepci ón simulación	Calcul os matem aticos
Referencia	13.718050 / -89.205189	20 dBm	0.1 m	Tx y Rx a la par.	-15.28 dBm	-30 dBm		
Punto 1	13.717967 / -89.205314	20 dBm	16.20 m	Vano sin obstáculos entre emisor y receptor.	-80.81 dBm	-90 dBm	-80 dBm	-58 dBm
Punto 2	13.718083 / -89.205500	20 dBm	24.00 m	El vano atraviesa un edificio de concreto desde la antena emisora a la receptora.	No se recibe ningun a señal	-106 dBm	-95 dBm	-82 dBm
Punto 3	13.718111 / -89.205792	20 dBm	54.52 m	El vano presenta en su recorrido dos edificios de concreto	No se recibe ningun a señal	-112 dBm	-95 dBm	-92 dBm
Punto 4	13.717661 / -89.205308	20 dBm	33.58 m	La línea de visión se ve obstaculizada por dos paredes de concreto	-88.92 dBm	-101 dBm	-55 dBm	-72.446915
Punto 5	13.717450 / -89.205286	20 dBm	57.45 m	El vano atraviesa dos paredes de concreto y varios árboles.	No se recibe ningun a señal	-106 dBm	-55 dBm	-103 dBm
Punto 6	13.717461 / -89.204833	20 dBm	76.38 m	La línea de visión es obstruida por la esquina de un edificio	-92.19 dBm	-102 dBm	-85 dBm	-83 dBm
Punto 7	13.717683 / -89.204778	20 dBm	65.58 m	El vano atraviesa un edificio de 40 m de largo y algunos árboles en su trayectoria.	No se recibe ningun a señal	No se recibe ninguna señal	-85 dBm	-81 dBm
Punto 8	13.717869 / -89.204783	20 dBm	58.68 m	Linea de visión obstaculizada por árboles.	-91.53 dBm	-103 dBm	-80 dBm	-85 dBm

Punto 9	13.718272 / -89.205153	20 dBm	38.80 m	No existe ningún obstáculo en la trayectoria. Existe una pequeña oficina de por medio, pero debido a su altura no interviene.	-86.27 dBm	-94 dBm	-80 dBm	-64 dBm
Punto 10	13.718011 / -89.204919	20 dBm	42.70 m	EL vano atraviesa algunas ramas de árboles y un techo de metal en su trayectoria.	No se recibe ningun a señal	-112 dBm	-80 dBm	-60 dBm
Punto 11	13.718508 / -89.205014	20 dBm	68.05 m	Presencia de árboles y la esquina de un edificio en la trayectoria.	No se recibe ningun a señal	-116 dBm	-105 dBm	-84 dBm
Punto 12	13.718478 / -89.205469	20 dBm	59.35 m	El vano presenta en su trayectoria varios árboles y también una porción significativa de un edificio. En el recorrido también existe una pequeña oficina, pero no afecta la medición debido a su altura.	No se recibe ningun a señal	-117 dBm	-105 dBm	-85 dBm
Punto 13	13.718083 / -89.204689	20 dBm	70.46 m	Densa vegetación en el vano y parte de un techo de metal	No se recibe ningun a señal	-112 dBm	-95 dBm	-69 dBm
Punto 14	13.718303 / -89.204475	20 dBm	97.51 m	EL vano atraviesa una densa vegetación en su trayectoria.	-95.53 dBm	-111 dBm	-105 dBm	-74 dBm
Punto 15	13.718058 / -89.204497	20 dBm	88.89 m	La línea de visión se ve obstaculizada por una densa vegetación, la esquina de una edificación y también por un techo metálico.	No se recibe ningun a señal	No se recibe ninguna señal	-110 dBm	-74 dBm
Punto 16	13.718431 / -89.204267	20 dBm	124.52 m	EL vano atraviesa una densa	-94.07 dBm	-116 dBm	-105 dBm	-79 dBm

				vegetación en su trayectoria.				
Punto 17	13.718433 / -89.20465	20 dBm	87.84 m	La línea de visión es obstaculizada por densa vegetación y una cabaña	No se recibe ninguna señal	-117 dBm	-90 dBm	-85 dBm
Punto 18	13.717653 / -89.204442	20 dBm	100 m	El vano atraviesa un edificio de 40 m de largo y algunos árboles en su trayectoria.	No se recibe ninguna señal	No se recibe ninguna señal	-100 dBm	-80 dBm
Punto 19	13.717564 / -89.205111	20 dBm	49.72	El vano pasa a través de dos esquinas de edificios en su trayectoria.	-92.03 dBm	-110 dBm	-55 dBm	-85 dBm

## SÍNTESIS DE LA COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS

Cada modelo presenta ventajas y desventajas dependiendo no solo de factores geográficos, sino que también de practicidad y accesibilidad, por lo que, luego de analizar los resultados obtenidos en la facultad de ingeniería y arquitectura y la facultad de ciencias económicas; y estudiar el comportamiento de la señal recibida en los diferentes puntos y entornos, se determina que:

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 toma 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.

## CAPITULO IV: PROPUESTA DE DISEÑO DE RED EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

### DEFINICIÓN DE PUNTOS Y COORDENADAS

Luego de la determinación de la metodología óptima para la realización de las predicciones de cobertura, se procede a la selección de la ubicación de los diferentes puntos de la red LoRa. Para este escenario, se mostrará a continuación algunos mapas realizados en el programa QGIS donde se muestra la localización geográfica de los puntos seleccionados, así como también se muestran las coordenadas de cada uno.

### COORDENADAS DE GATEWAYS

Tabla 11: Ubicación en coordenadas de gateways.

<b>Gateways</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
<b>Gateway 1</b>	13.72025993	-89.20098361
Gateway 2	13.72031909	-89.20075355
Gateway 3	13.72074361	-89.20064076
Gateway 4	13.72080558	-89.20041748
Gateway 5	13.72066924	-89.20014955
Gateway 6	13.72128278	-89.20004429
Gateway 7	13.72127968	-89.20038877
Gateway 8	13.72118672	-89.20126913
Gateway 9	13.72051505	-89.20208176
Gateway 10	13.7219807	-89.20271202
Gateway 11	13.72105209	-89.20308376
Gateway 12	13.72020455	-89.20298513
Gateway 13	13.72029299	-89.20371722
Gateway 14	13.71983236	-89.20476415
Gateway 15	13.72006452	-89.20496519
Gateway 16	13.71941228	-89.20463139
Gateway 17	13.71913699	-89.20413345
Gateway 18	13.71851259	-89.20529314
Gateway 19	13.71852549	-89.20445294
Gateway 20	13.71789351	-89.20530971
Gateway 21	13.71779272	-89.20552849
Gateway 22	13.71733258	-89.20513829
Gateway 23	13.71703459	-89.20545857
Gateway 24	13.71815859	-89.20406293
Gateway 25	13.71774336	-89.20434363
Gateway 26	13.71695629	-89.20452225
Gateway 27	13.71760392	-89.20363233
Gateway 28	13.71823296	-89.20331335

Gateway 29	13.71750786	-89.202433
Gateway 30	13.71679596	-89.20245061
Gateway 31	13.71661573	-89.2010029
Gateway 32	13.71696193	-89.20118785
Gateway 33	13.71813821	-89.20250335
Gateway 34	13.71811652	-89.20170593
Gateway 35	13.71804835	-89.20076178
Gateway 36	13.71826836	-89.20117963
Gateway 37	13.71921993	-89.20102232
Gateway 38	13.7198584	-89.20073036

## GEOLOCALIZACIÓN DE GATEWAYS

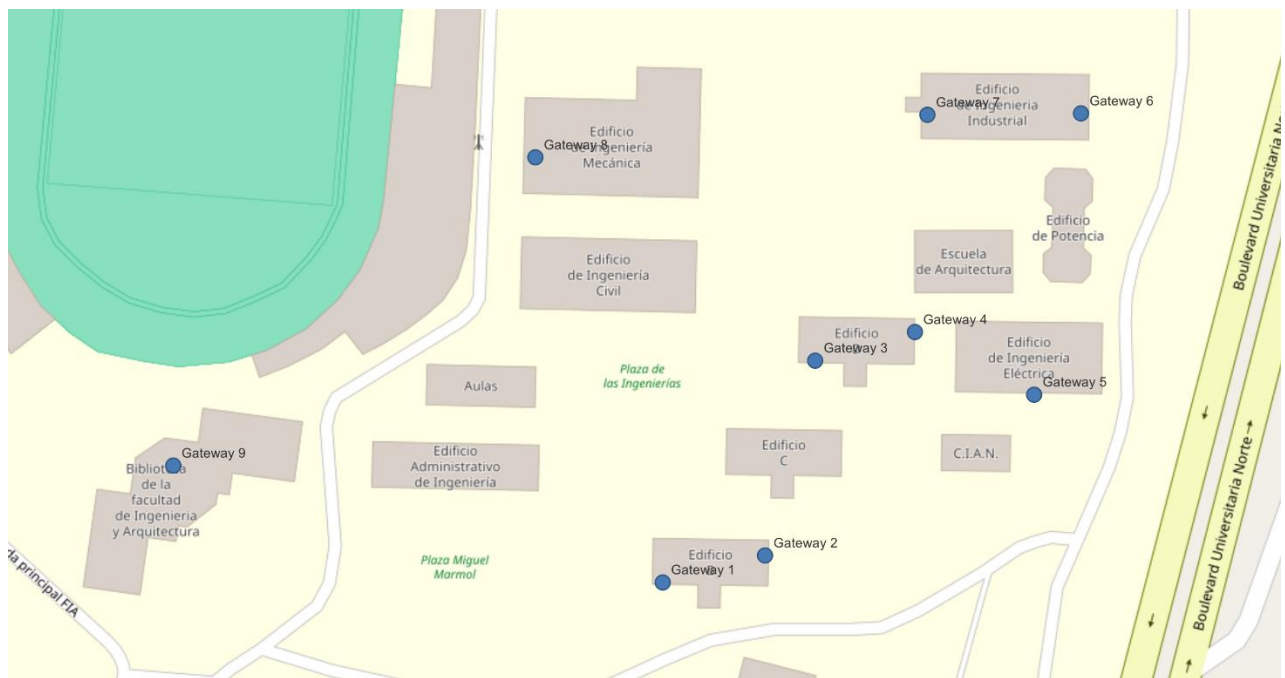


Figura 157: Mapa de puntos de ubicación de gateways en QGIS.



Figura 158: Mapa de puntos de ubicación de gateways en QGIS.



Figura 159: Mapa de puntos de ubicación de gateways en QGIS.



Figura 160: Mapa de puntos de ubicación de gateways en QGIS.



Figura 161: Mapa de puntos de ubicación de gateways en QGIS.



Figura 162: Mapa de puntos de ubicación de gateways en QGIS.

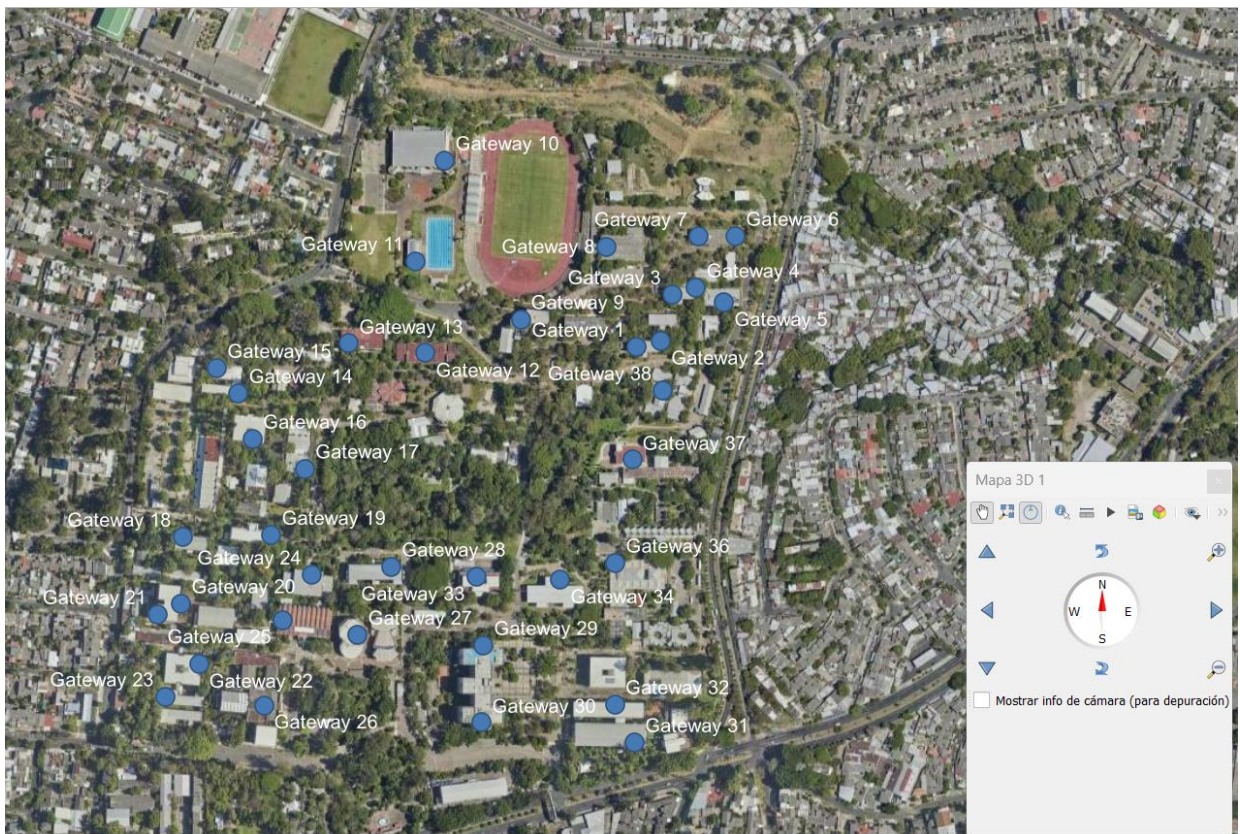


Figura 163: Mapa completo en QGIS de puntos de ubicación para Gateway.

## COORDENADAS DE NODOS DETECTORES DE GAS Y HUMO MQ-2

<b>Nodos</b>	<b>x</b>	<b>y</b>
<b>Nodo 1</b>	13.72196851	-89.20300869
Nodo 2	13.72114296	-89.20303397
Nodo 3	13.72038139	-89.20367634
Nodo 4	13.72026306	-89.2031335
Nodo 5	13.72031194	-89.20219875
Nodo 6	13.72047657	-89.20154999
Nodo 7	13.72095248	-89.20104423
Nodo 8	13.72110939	-89.20102304
Nodo 9	13.72072096	-89.20055699
Nodo 10	13.72124059	-89.20030808
Nodo 11	13.7207724	-89.20017303
Nodo 12	13.71994408	-89.20073176
Nodo 13	13.7198952	-89.20145202
Nodo 14	13.71962767	-89.20057553
Nodo 15	13.72012415	-89.20524925
Nodo 16	13.71982832	-89.20527308
Nodo 17	13.72002897	-89.20479115
Nodo 18	13.71949133	-89.20415827
Nodo 19	13.7192418	-89.20417416
Nodo 20	13.71935242	-89.20501887
Nodo 21	13.71841604	-89.20510891
Nodo 22	13.71817423	-89.20328708
Nodo 23	13.71814593	-89.20262243
Nodo 24	13.71840833	-89.20116603
Nodo 25	13.71856782	-89.20076089
Nodo 26	13.71880963	-89.20074235
Nodo 27	13.71911061	-89.20051198
Nodo 28	13.71804121	-89.20171002
Nodo 29	13.71829515	-89.20569835
Nodo 30	13.71801198	-89.2054121
Nodo 31	13.71772373	-89.20483566
Nodo 32	13.71738976	-89.20526439
Nodo 33	13.71692754	-89.20470233
Nodo 34	13.71748881	-89.2036122
Nodo 35	13.71773516	-89.20337169
Nodo 36	13.71738214	-89.2025469
Nodo 37	13.71684373	-89.20256128
Nodo 38	13.71694913	-89.20145023
Nodo 39	13.71675866	-89.20126332
Nodo 40	13.71689072	-89.20060715
Nodo 41	13.7166177	-89.20058885

Nodo 42	13.71768055	-89.20071825
Nodo 43	13.71766151	-89.20113391
Nodo 44	13.71624147	-89.20240234

## GEOLOCALIZACIÓN DE NODOS DETECTORES DE GAS Y HUMO MQ-2



Figura 164: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

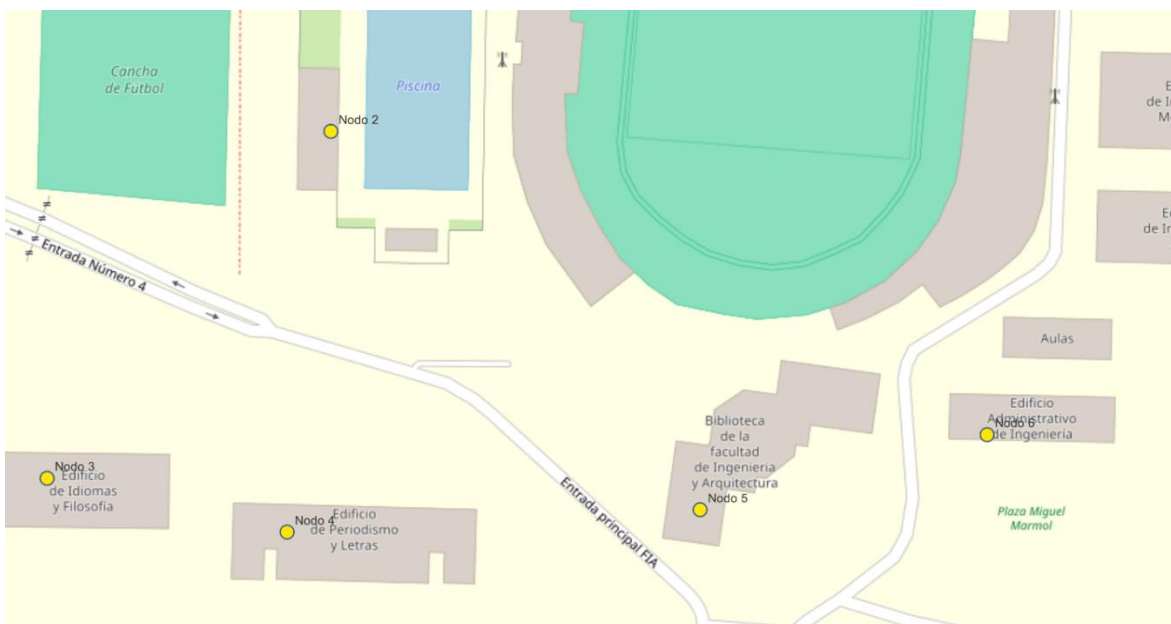


Figura 165: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.



Figura 166: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

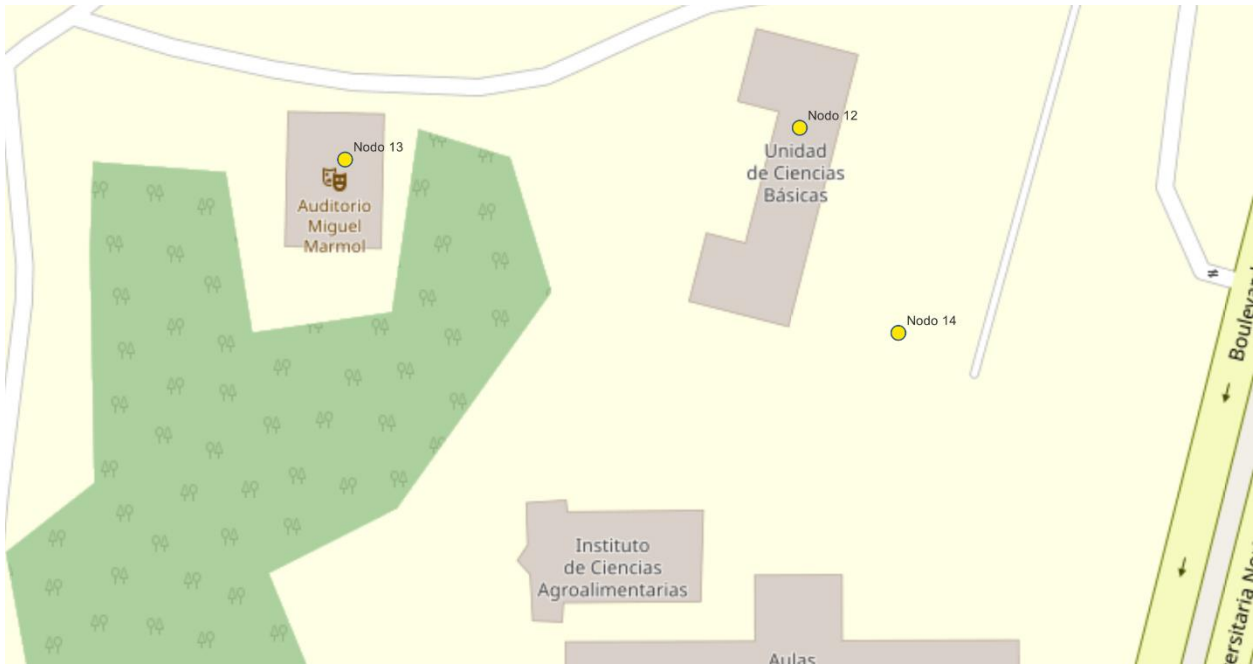


Figura 167: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

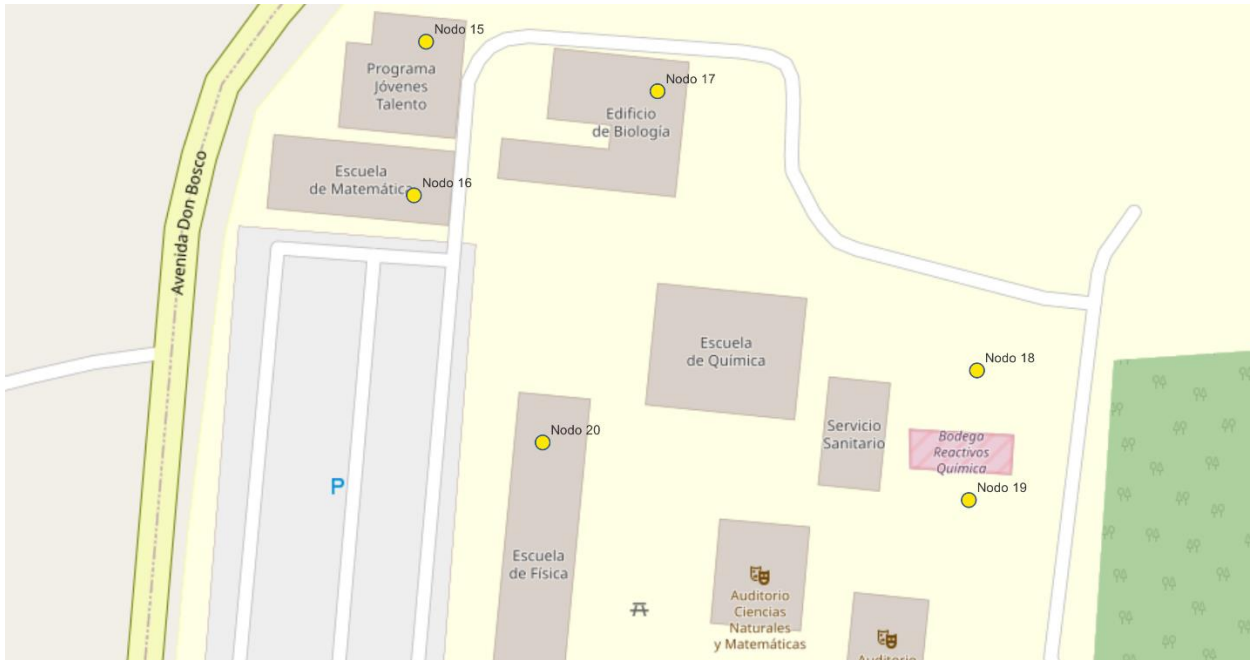


Figura 168: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.



Figura 169: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

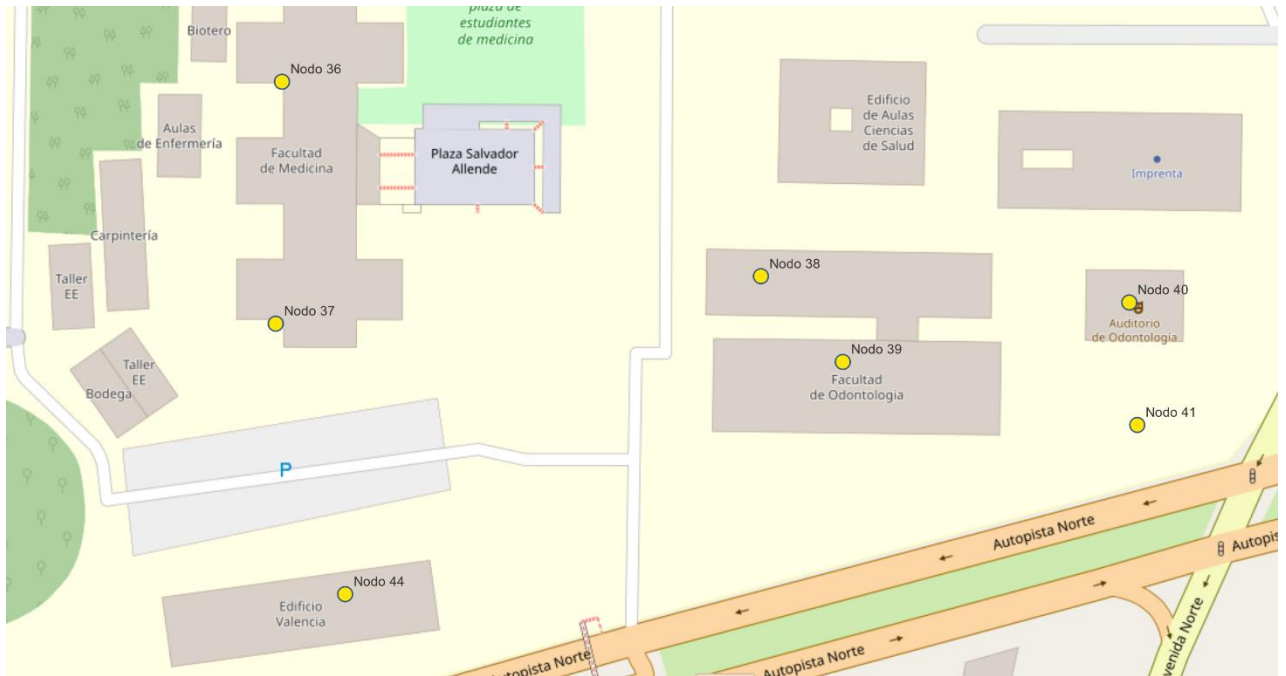


Figura 170: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

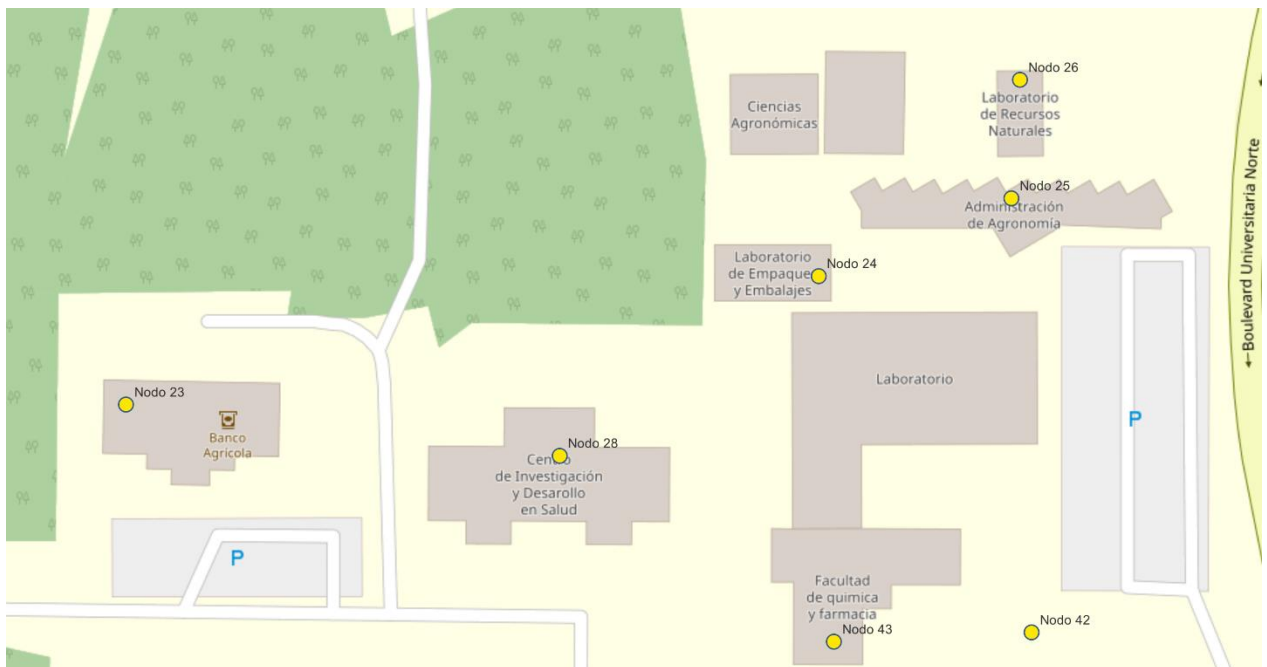


Figura 171: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

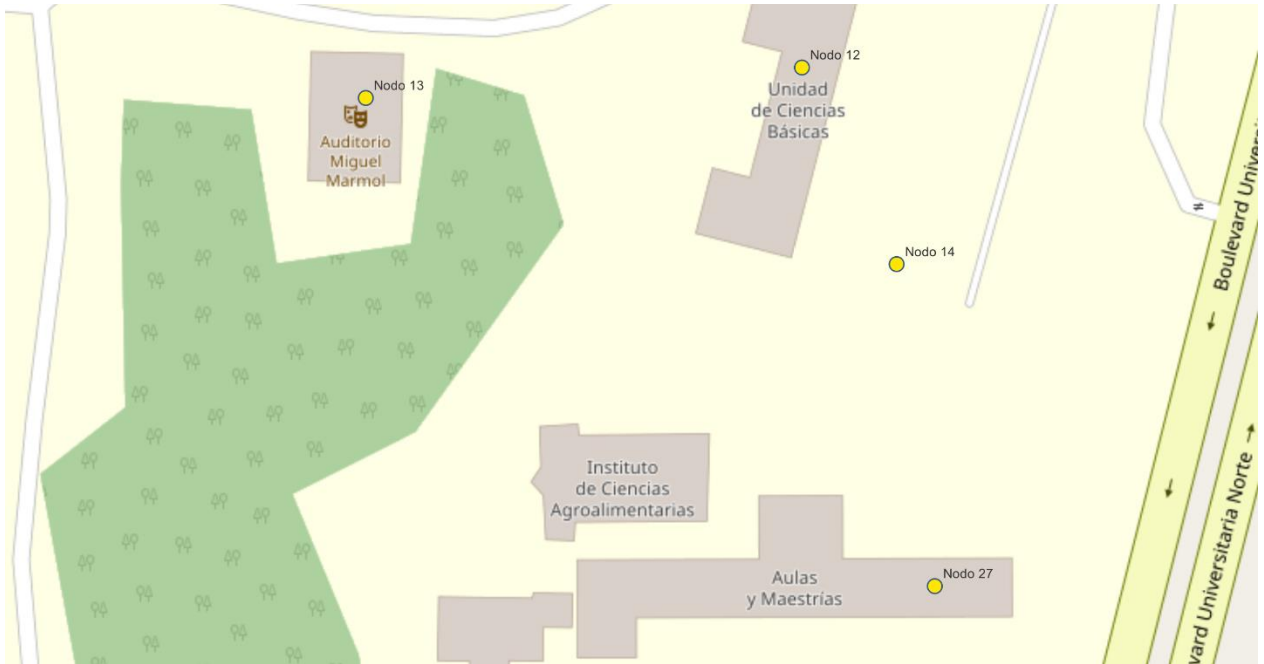


Figura 172: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-2 en QGIS.

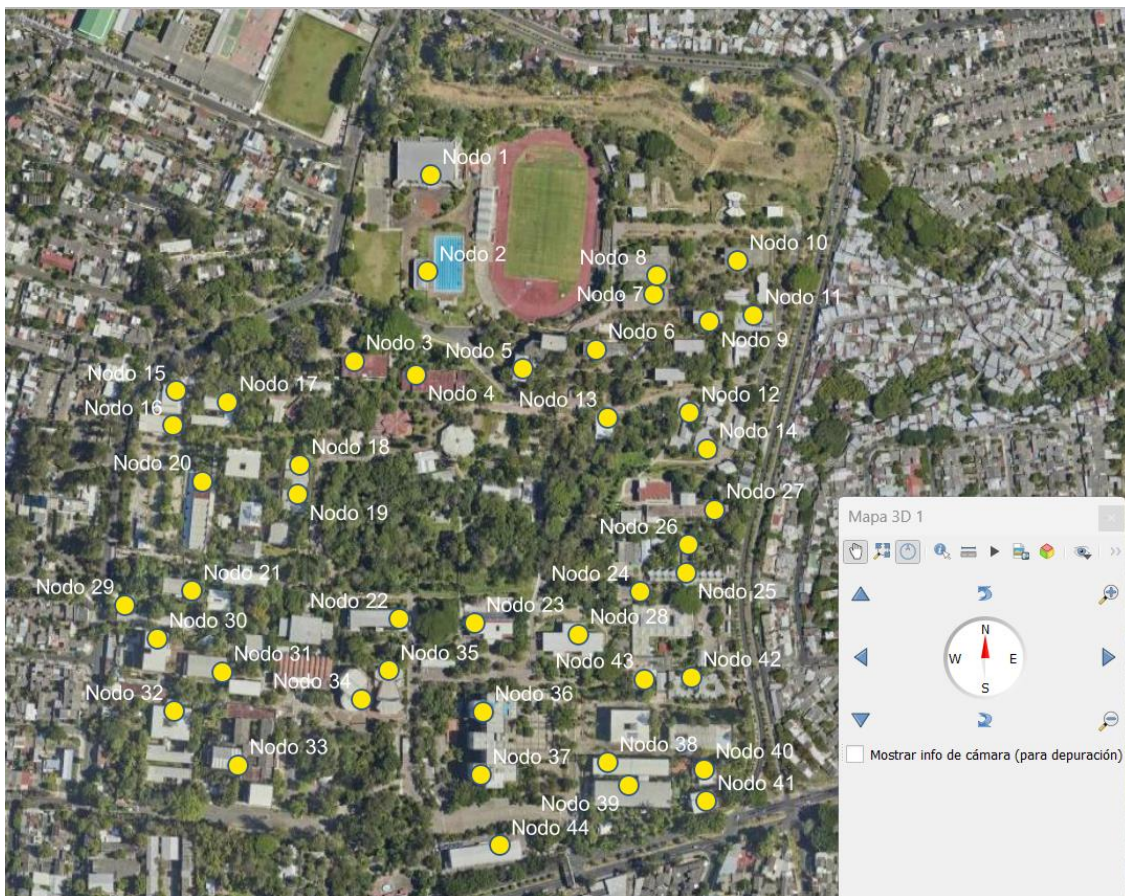


Figura 173: Mapa completo en QGIS de puntos de ubicación para sensores MQ-2.

## COORDENADAS DE NODOS DETECTORES DE CALIDAD DE AIRE MQ-135

Tabla 12: Ubicación en coordenadas de sensores MQ-135.

Nodos MQ-135	Latitud	Longitud
Nodo 1	13.71763281	-89.20367769
Nodo 2	13.71686403	-89.20230604
Nodo 3	13.71686656	-89.20531825
Nodo 4	13.71976101	-89.20527812
Nodo 5	13.72065535	-89.20031597
Nodo 6	13.72120691	-89.20306869
Nodo 7	13.71907477	-89.20291969

## GEOLOCALIZACIÓN DE NODOS DETECTORES DE CALIDAD DE AIRE MQ-135

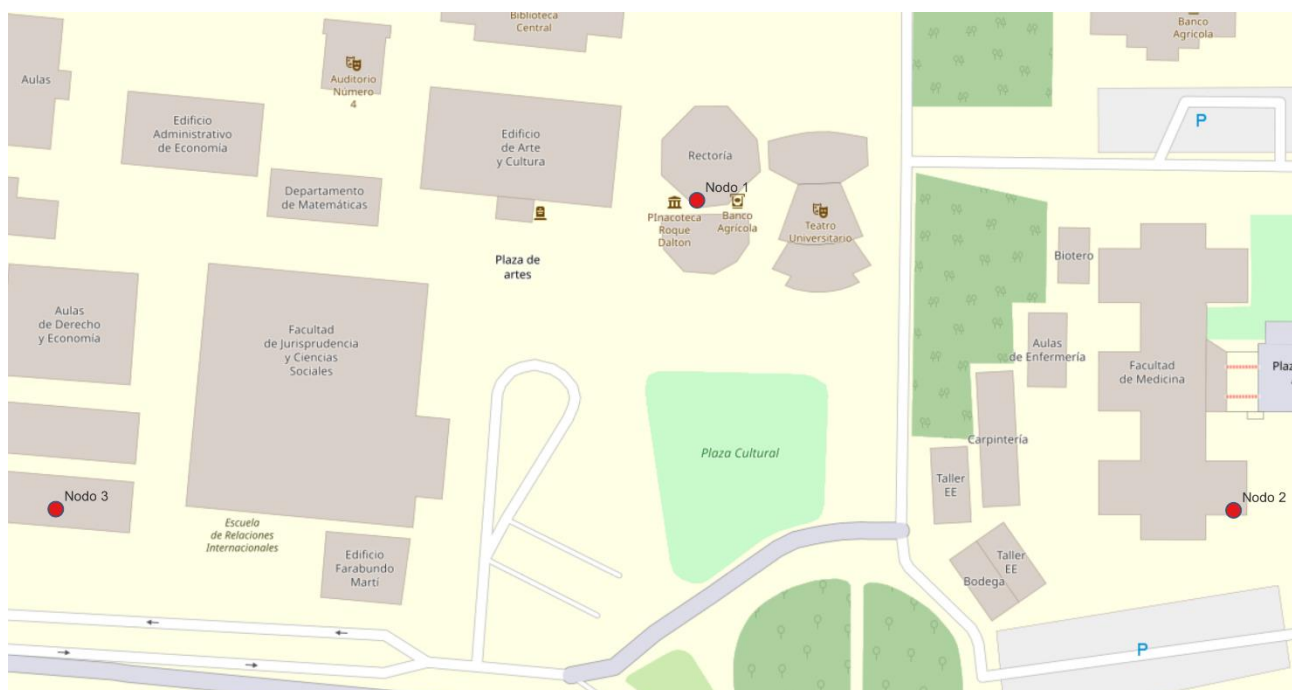


Figura 174: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-135 en QGIS.

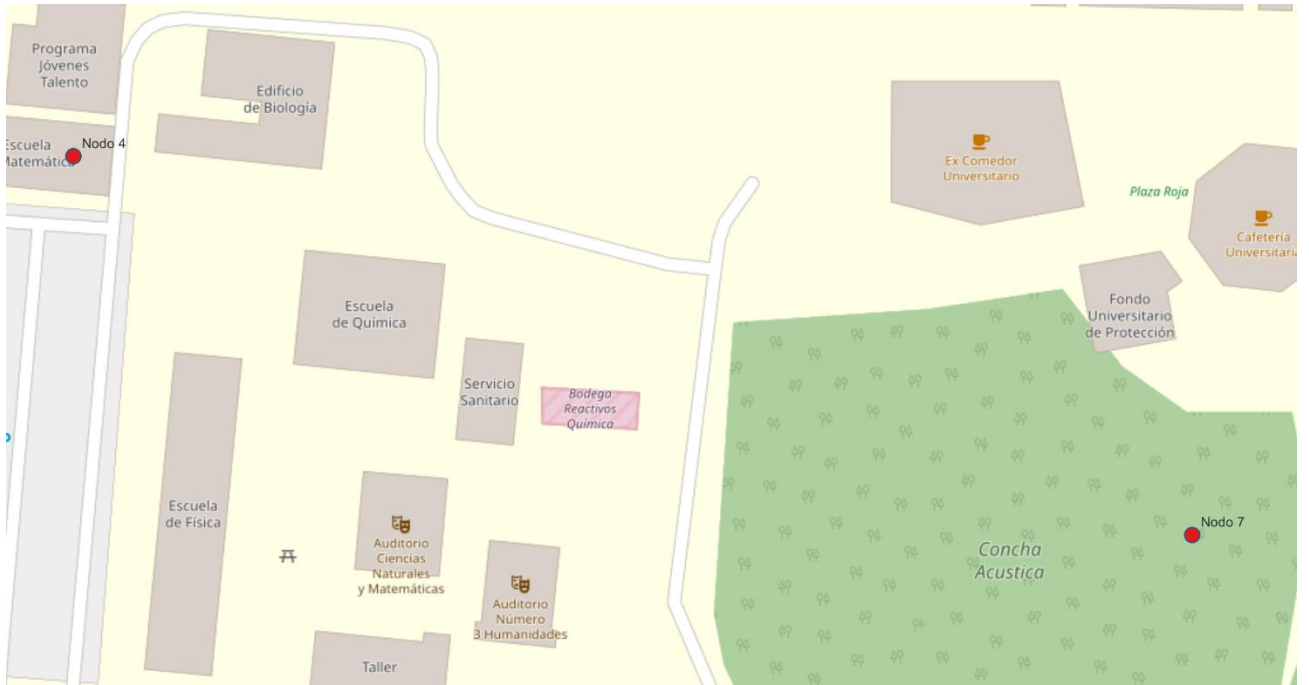


Figura 175: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-135 en QGIS.



Figura 176: Mapa de puntos de ubicación de sensores MQ-135 en QGIS.

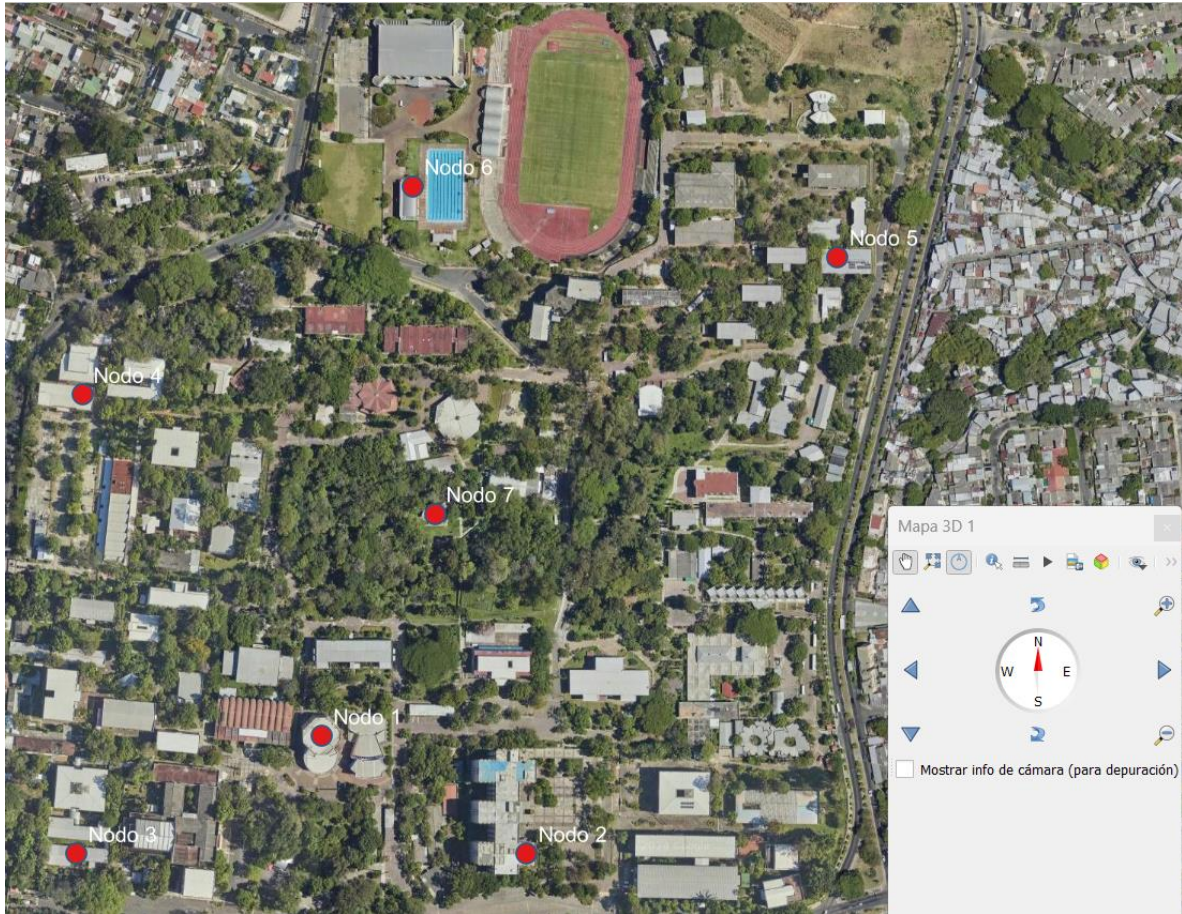


Figura 177: Mapa completo en QGIS de puntos de ubicación para sensores MQ-135.

## COORDENADAS DE NODOS DETECTORES DE TEMPERATURA GY906

Tabla 13: Ubicación en coordenadas de sensores GY906.

Nodos GY906	Latitud	Longitud
<b>Nodo 1</b>	13.71763281	-89.20367769
Nodo 2	13.71686403	-89.20230604
Nodo 3	13.71686656	-89.20531825
Nodo 4	13.71976101	-89.20527812
Nodo 5	13.72065535	-89.20031597
Nodo 6	13.72120691	-89.20306869
Nodo 7	13.71907477	-89.20291969

## GEOLOCALIZACIÓN DE NODOS DETECTORES DE TEMPERATURA GY906



Figura 178: Mapa de puntos de ubicación de sensores GY906 en QGIS.

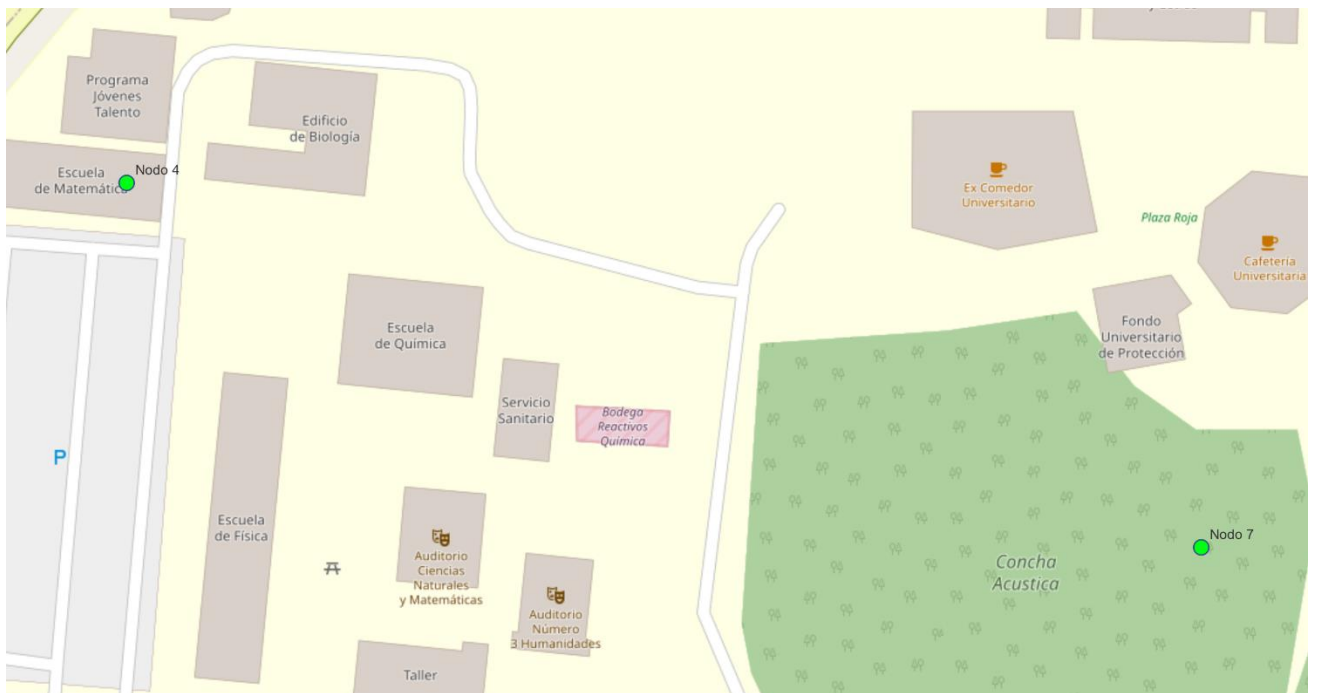


Figura 179: Mapa de puntos de ubicación de sensores GY906 en QGIS.



Figura 180: Mapa de puntos de ubicación de sensores GY906 en QGIS.

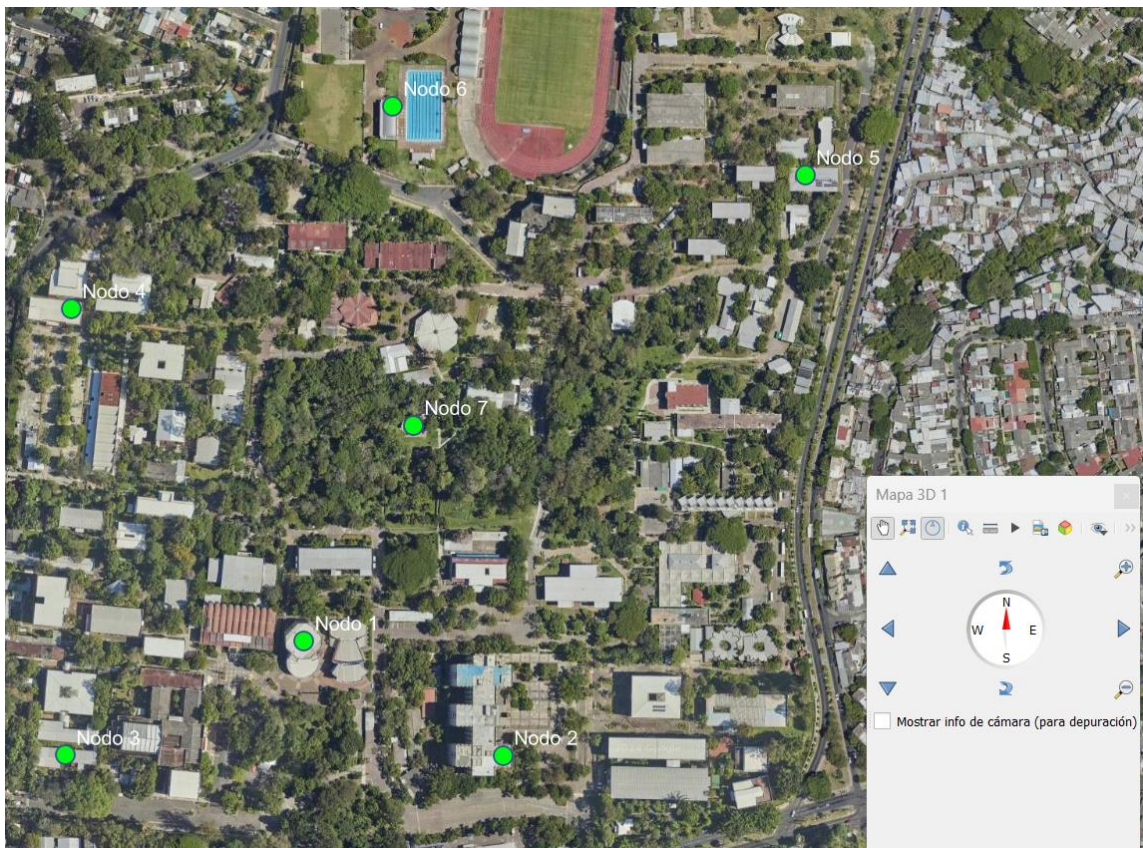


Figura 181: Mapa completo en QGIS de puntos de ubicación para sensores GY906.

## PRESUPUESTO DE RED

Partiendo de la cantidad de equipos descrita en el apartado anterior, se realiza un presupuesto de la inversión que significaría realizar la red de sensores LoRa en la Universidad de El Salvador. En este presupuesto se consideran la cantidad total de placas TTGO LoRa32, los sensores a ser utilizados y también los componentes requeridos para hacer funcionar estos nodos.

Tabla 14: Presupuesto total de construcción de gateways y nodos de red.

<b>Presupuesto para Gateway</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Precio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
<b>Placa TTGO LoRa32 V1</b>	\$15	38	\$570
<b>Cables JST 2 Pines</b>	\$1.25	38	\$48
<b>Batería de litio 4.2V 8800 mAh</b>	\$4.75	38	\$181
<b>Case protector</b>	\$2.60	38	\$99
<b>Total</b>			<b>\$897</b>

<b>Presupuesto para sensores de temperatura infrarrojo GY-906 MLX90614</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Precio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
<b>Placa TTGO LoRa32 V1</b>	\$15	7	\$105
<b>Sensor GY-906 MLX90614</b>	\$16	7	\$112
<b>Cables JST 2 Pines</b>	\$1.25	7	\$9
<b>Bateria de litio 4.2V 8800 mAh</b>	\$4.75	7	\$33
<b>Case protector</b>	\$2.60	7	\$18
<b>Total</b>			<b>\$277</b>

<b>Presupuesto para sensores de calidad de aire MQ-135</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Precio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
<b>Placa TTGO LoRa32 V1</b>	<b>\$15</b>	<b>7</b>	<b>\$105</b>
<b>Sensor MQ-135</b>	\$6.38	7	\$45
<b>Cables JST 2 Pines</b>	\$1.25	7	\$9
<b>Batería de litio 4.2V 8800 mAh</b>	\$4.75	7	\$33

Case protector	\$2.60	7	\$18
<b>Total</b>			<b>\$210</b>

#### Presupuesto para sensores de gas y humo MQ-2

Material	Precio	Cantidad	Total
Placa TTGO LoRa32 V1	\$15	44	\$660
Sensor MQ-2	\$2.92	44	\$128
Cables JST 2 Pines	\$1.25	44	\$55
Batería de litio 4.2V 8800 mAh	\$4.75	44	\$209
Case protector	\$2.60	44	\$114
<b>Total</b>			<b>\$1,167</b>

<b>Total general</b>	<b>\$2,551</b>
----------------------	----------------

## CAPÍTULO V - DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE RED.

Habiendo seleccionado tecnologías definitivas expuestas en los capítulos anteriores, se describen los procedimientos para la implementación del prototipo del proyecto desde los transmisores hasta el servidor IOT, testeando conectividad y desempeño.

La siguiente lista de tareas describe el proceso de testeo, implementación y puesta en marcha del prototipo luego de la toma de decisiones y adquisición de recursos necesarios.

### ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura del sistema está basada en software de código abierto y hardware de bajo costo con el objetivo de implementar un proyecto económico y que brinde resultados aceptables. La siguiente figura muestra la topología general del sistema, para montar una red LoraWAN, mostrando todos los niveles necesarios y las partes que estas lo componen.

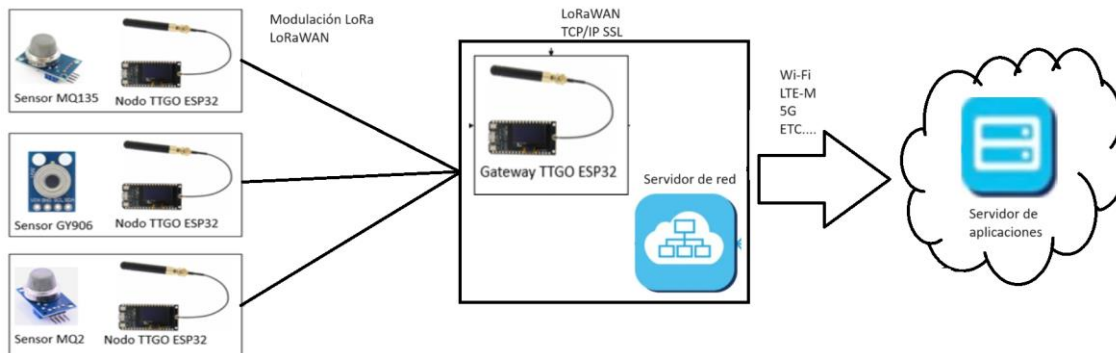


Figura 182: Arquitectura del prototipo a usar.

El esquema muestra el diseño de la red conformada por diferentes niveles, iniciando por la lectura de los sensores ubicados en diferentes posiciones, luego dicha información es obtenida por las placas TTGO el cual posee una batería permitiendo su ubicación en cualquier lugar, la información de las diferentes placas se transmite hasta un nodo central el cual recibe los datos para posteriormente poder ser publicados y visualizados en tiempo real en una página IOT.

Cada transmisor tiene conectado un sensor arduino diferente el cual recogerá los valores medidos del sensor y serán enviados por medio del protocolo LoRa hacia el receptor, el cual procesa los datos y los subirá a la página AskSensor para su visualización en tiempo real y procesar los datos almacenarlos en su base de datos.

## IMPLEMENTACIÓN DE NODOS LORA

El prototipo consta de 3 nodos más conocidos como placas transmisoras, cada placa tiene conectado un sensor en sus terminales. Los sensores utilizados para el prototipo son el GY906 para temperatura, el MQ2 para calidad de aire y el MQ135 para gases. Estos sensores como la placa TTGO trabaja bajo código de programación Arduino lo cual lo hace muy versátil para que la placa TTGO reciba datos de cualquier sensor que trabaja bajo entorno de programación Arduino.

Al momento de escoger los sensores a utilizar es importante conocer la hoja de datos de cada sensor para así conocer su voltaje de funcionamiento y los pines requeridos para su correcta operación, ya que hay sensores que necesitan ser conectados ya sea a un pin digital, analógico o de transmisión. Así también se necesita conocer la hoja de datos de los nodos TTGO ESP32 V1.0 para conocer toda la distribución de sus pines de entrada, voltaje de alimentación, pines del protocolo LoRa, salidas de voltaje, pines de transmisión, entre otros.

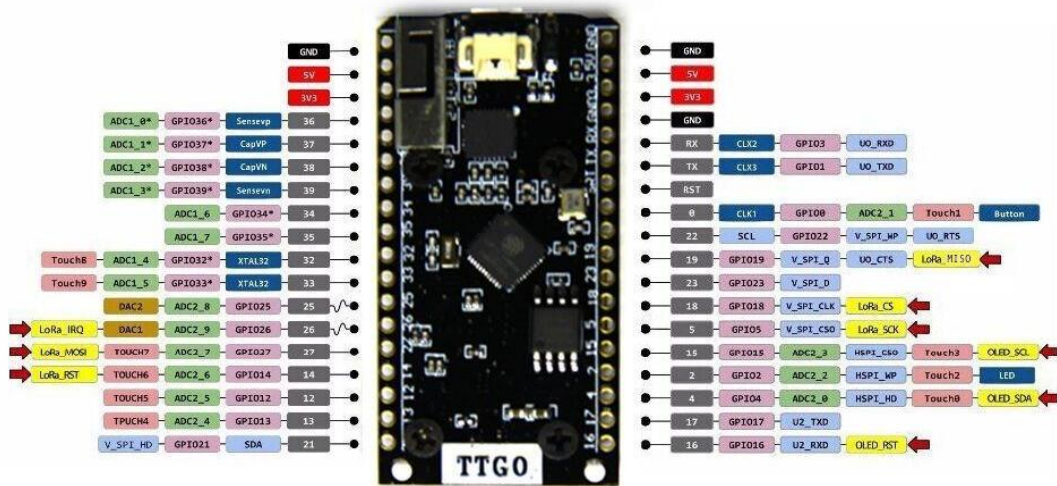


Figura 183: Distribución de pines de placa TTGO ESP32.

Conociendo estos datos, se procede a descargar las librerías de los sensores que van a ser a utilizar, el sensor GY906 utiliza la librería Adafruit\_MLX90614.h. Los sensores MQ2 y MQ135 permiten la lectura de sus datos sin ninguna librería, basta con especificar en el código a que pin está conectada su entrada, estas y muchas librerías más pueden ser descargadas directamente del software Arduino. Cada placa está siendo alimentada por una batería de 5 voltios permitiendo su ubicación en cualquier lugar, el código que se utilizó para programar los dispositivos se encuentra en el apartado de anexos.

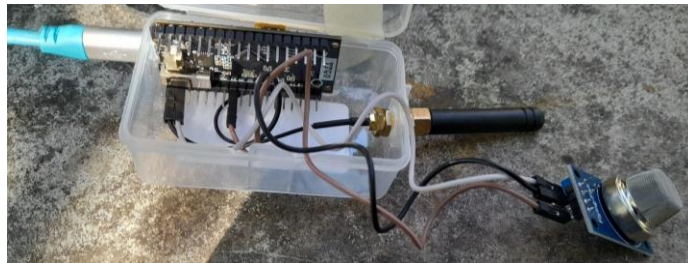


Figura 184: Ensamblaje de nodos.



Figura 185: Implementación de red de sensores con tecnología LoRa.

## CONECTIVIDAD PUNTO A PUNTO LORA

Como se mencionó anteriormente, se utilizará el protocolo de comunicación LoRa, el cual lo traen las placas TTGO para el envío de datos de los nodos hacia el gateway. Esta tecnología tiene un amplio campo de aplicaciones por ejemplo el control de temperatura en los cultivos en lugares donde la señal de internet tiene un costo elevado de cobertura.

Para tener una conectividad estable se requiere que todas las placas estén trabajando bajo la misma frecuencia de transmisión. Inicialmente se programaron los nodos para que trabajen en la frecuencia de 915 MHz, pero al realizar el estudio por medio del analizador de espectro se estableció que la banda de 914 Mhz ofrece mejor resultado al no presentar interferencias. todas las placas trabajaron en esta frecuencia.

```
if (!LoRa.begin(914E6)) {  
  Serial.println("Error inicializando LoRa");  
  while (1);  
}  
LoRa.setSpreadingFactor(7);  
LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);  
}
```

Figura 186: Especificando frecuencia, potencia y factor de ensanchamiento a usar en los enlaces.

Así también se programó en cada placa una potencia de salida de 20 dBm y un Spreading Factor de 7, estos valores no son fijos, sino que varían de acuerdo con cada entorno de trabajo y aplicación a usar, buscando siempre obtener la mejor conexión entre placas.

La placa TTGO presenta pines preestablecidos para acceder al chip sx1276 el cual se encargará de enviar los paquetes lora. Para el funcionamiento del protocolo LoRa será

necesario descargar las librerías: <LoRa.h>, <SPI.h> y <Wire.h>. Los pines para la conectividad lora son los siguientes:

```
#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST
#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)
```

Figura 187: Definición de pines lora en placa TTGO ESP32.

Sera necesario definirlos y declararlos para su uso en el código. Para tener un flujo de datos estable entre los 3 nodos y el gateway, es necesario que cada nodo cuente con un único identificador diferente al resto de los nodos. Esto permitirá que al estar conectado los 3 nodos al mismo tiempo el gateway pueda identificar de qué nodo vino el último mensaje recibido y almacenarlo en una variable específica. El sensor MQ135 es el ID=1, el sensor GY906 tiene el ID=2 y el sensor MQ2 tiene el ID=3.

```
int myID = 3; // Identificador único de cada placa transmisora
const int blueLED = LED_BUILTIN;
String LoRaMessage = "";
```

Figura 188: Identificador de placa transmisora.

La lógica de funcionamiento es la misma en todos los nodos, al ser cargado el código en las placas y acceder a los pines LoRa, se ejecutará un loop que se repetirá cada 500 ms el cual almacenará en una variable llamada LoRaMessage el valor medido por el sensor y este dato será enviado en un paquete por medio de LoRa.beginPacket(); a la placa transmisora. Los códigos completos de los nodos están escritos en los anexos.

```
LoRa.beginPacket();
LoRa.write(myID);

// Envía el mensaje
LoRa.print(LoRaMessage);
LoRa.endPacket();
```

Figura 189: Envío de paquete con el valor del sensor.

## IMPLEMENTACIÓN DE GATEWAY LORA

Los Gateway tienen 2 funciones principales: recibir, identificar y almacenar los datos provenientes de los nodos y conectarse vía wifi a la página IOT. En esta sección se explicará la primera función. Para que el gateway TTGO ESP32 se conecte con las demás placas es necesario que esté configurado con la misma frecuencia, potencia de salida y

Spreading Factor que la de los nodos, si algún dato varía la placa no se podrá conectar con los nodos.

Así mismo será necesario definir y declarar los pines LoRa tal y como se realizó en los nodos. Para el funcionamiento del protocolo LoRa será necesario descargar las librerías: LoRa.h, SPI.h y Wire.h. El código se ejecuta en un loop de 500 ms el cual para identificar y recibir los mensajes LoRa se ejecutan las siguientes líneas de código.

```
// Recibe el mensaje
int packetSize = LoRa.parsePacket();
if (packetSize) {
  // Lee el identificador del remitente
  int senderID = LoRa.read();

  // Lee el resto del mensaje
  String messageFromSender = "";
  while (LoRa.available()) {
    char c = LoRa.read();
    messageFromSender += c;
  }

  digitalWrite(blueLED, ON); // Enciende el LED azul

  if (senderID == 1) {
    // Procesa el valor del sensor MQ135 enviado por la Placa 1
    mq135ValueFromPlaca1 = messageFromSender.toInt();
    Serial.print("Valor del sensor MQ135 recibido de Placa 1: ");
    Serial.println(mq135ValueFromPlaca1);
  }
}
```

Figura 190: Código del gateway en la cual recibe e identifica el mensaje del transmisor.

```
} else if (senderID == 2) {
  // Procesa el valor del sensor GY906 enviado por la Placa 2
  gy906ValueFromPlaca2 = messageFromSender.toInt();
  Serial.print("Valor del sensor GY906 recibido de Placa 2: ");
  Serial.println(gy906ValueFromPlaca2);
} else if (senderID == 3) {
  // Procesa el valor de la Placa 3 (nuevo ID)
  valueFromPlaca3 = messageFromSender.toInt();
  Serial.print("Valor recibido de Placa 3: ");
  Serial.println(valueFromPlaca3);
  // Agrega la lógica necesaria para el nuevo sensor o acción relacionada con Placa 4
}
// Agrega la línea de depuración
Serial.println("Mensaje recibido de LoRa: " + messageFromSender);
digitalWrite(blueLED, OFF); // Apaga el LED azul
}
```

Figura 191: Condiciones else-if para evaluar de que placa vino el mensaje.

La lógica del código es la siguiente. Primero la placa identificará si hay mensajes nuevos por medio de `lora.parsepacket()` si hay algún paquete nuevo se leerá el identificador asignado a cada nodo por medio de `LoRa.read()` continuamente se ejecutará una serie de condiciones para evaluar de qué placa vino el mensaje para luego guardarlo en la variable `valueFromPlaca` e imprimirlo en pantalla. y así estará en un bucle recibiendo cada uno de los mensajes de las 3 placas. Los códigos completos del gateway está escrito en los anexos.

## DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE API MQTT

Existe una diversidad de plataformas IOT a las cuales los dispositivos se pueden conectar, algunas son de paga, otras son gratuitas y otras son de código abierto permitiendo personalizar y escribir todos los códigos desde cero. MQTT es un protocolo de transmisión de datos binario cliente-servidor simple y ligero. La plataforma que se ha escogido para realizar esta funciona es la página AskSensors, esta página cuenta con una versión gratis a la cual accedes al crearte una cuenta, esta permitirá crear ventanas de visualización de la lectura de los sensores, guardar los datos en una base de datos, crear alertas de correo, entre muchas cosas más. Aunque esta versión es muy buena se ha tenido que optar por la opción de pagar debido a que en la opción gratuita actualiza las ventanas de visualización de los sensores cada 10 segundos y en la opción de paga lo actualizará cada segundo.

Al momento de crear su cuenta en AskSensor será necesario, crear un ApiKeyIn en el cual le permitirá mandar los datos de los sensores a la página IOT. Las librerías que necesitarás para la conexión IOT son: <WiFi.h>, <PubSubClient.h> y <Adafruit\_MLX90614.h>. Para realizar una subida IOT estable se requerirá de una conexión Wifi, puede ser de cualquier velocidad, el sistema no requiere una velocidad y banda ancha en específico. Primero se necesita declarar las variables de conexión wifi, usuario y ApiKeyIn de la página AskSensor y de la conexión wifi a usar. Estas variables serán usadas por las librerías anteriormente mencionadas las cuales se puede observar su uso en el código completo del Gateway mostrado en el anexo de la tesis.

```
//conexion a wifi
const char* ssid = "Galaxy A32E10B"; // Wifi SSID
const char* password = "harrymessi"; // Wifi Password
const char* username = "davicito"; // my AskSensors usernamevvv
const char* pubTopic = "publish/davicito/yfgsrzU3gf0xxe3fRx80zkoC0fm57ktp"; // publish/username/apiKeyIn
```

Figura 192: Variables de conexión a wifi y pagina AskSensor.

Al momento de energizar la placa automáticamente se ejecutará el código cargado en él, conectándose a la red wifi y a la página AskSensor para el envío de datos de los sensores conectados a los nodos. Se ejecutará un loop el cual se repetirá cada 500 ms, la parte encarga de subir los datos de los sensores es la siguiente:

```
// Enviar datos a AskSensors en cada iteración del bucle
char mqtt_payload[40] = "";
sprintf (mqtt_payload, 40, "m1=%1d&m2=%1d&m3=%1d",mq135ValueFromPlaca1, gy906ValueFromPlaca2, valueFromPlaca3);
Serial.print("Mensaje publicado: ");
Serial.println(mqtt_payload);
client.publish(pubTopic, mqtt_payload);
```

Figura 193: Registro de valores medido por los sensores hacia las gráficas en página IOT.

inicialmente se crea un vector de 40 espacios donde se almacenarán los datos recibidos de los sensores, previamente identificados por medio de un ID que se a asignado a cada placa. La función “m1=%1d&m2=%1d&m3=%1d” se encargará de mandar los datos de cada sensor a las gráficas en la página AskSensor la gráfica m1 corresponde al module 1 del sensor MQ135, la gráfica m2 corresponde a module 2 del sensor de temperatura y la gráfica m3 corresponde a module 3 del sensor MQ2, al ser un loop este se ejecutará cada 500 ms enviando datos en tiempo real de lo que se esté midiendo.

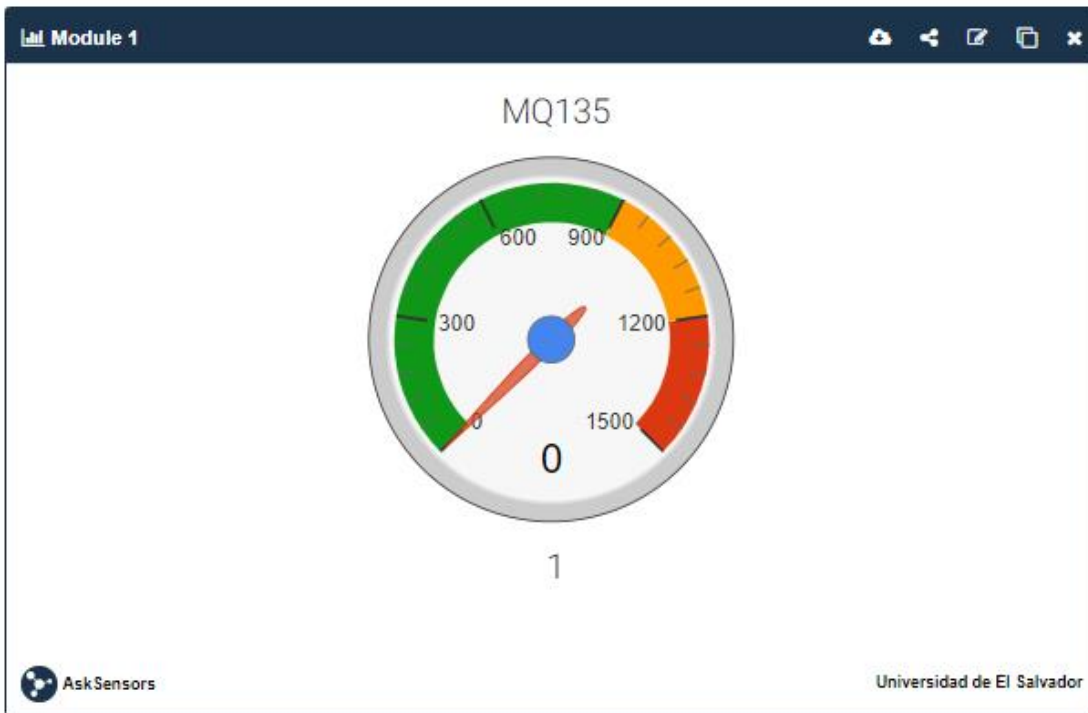


Figura 194: Grafica m1 del sensor MQ135.



Figura 195: Grafica m2 del sensor de temperatura GY906.

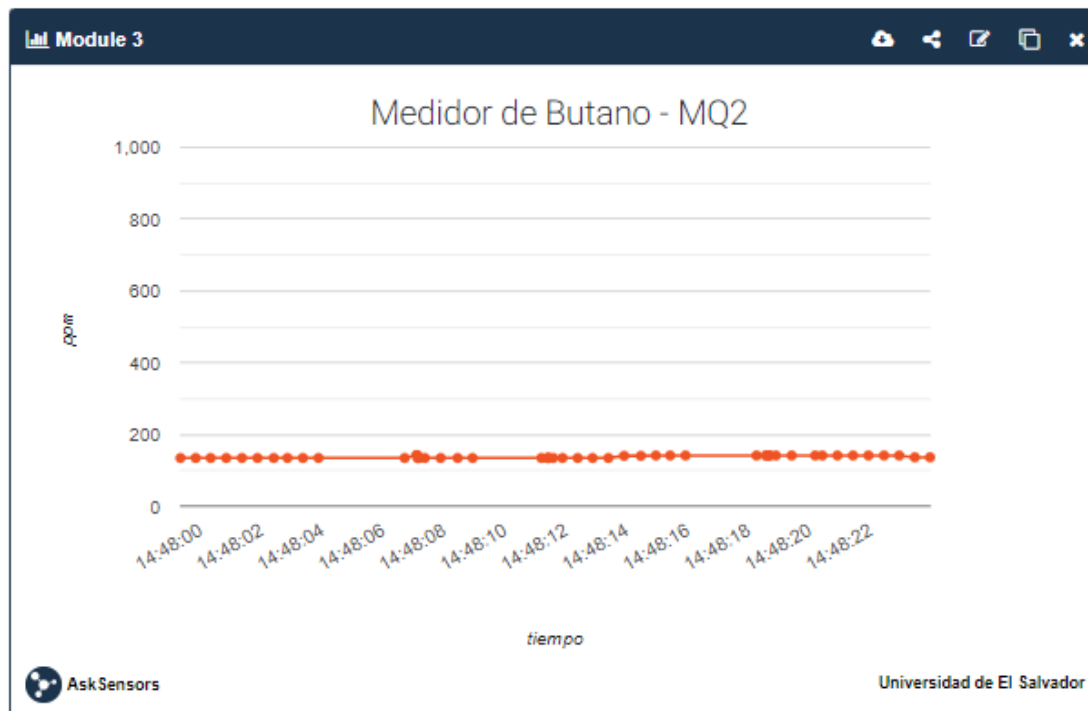


Figura 196: Grafica m3 del sensor de butano MQ2.

## IMPLEMENTACIÓN Y UBICACIÓN DE LOS NODOS Y GATEWAY

Al tener el prototipo y códigos listos se realiza la implementación física de los nodos y el Gateway. Se a escogido la facultad de ingeniería y arquitectura para la realizar esta prueba. Como solo se tienen 3 nodos y 1 Gateway. El Gateway se a ubicado en el edificio B de la facultad y los nodos se han ubicado de forma aleatoria, dándole un tiempo estimado de 1 hora por ubicación y luego siendo trasladado a otra ubicación, en esa hora se monitorea la conexión de la pagina IOT, la lectura de los datos de los sensores y la recepción de la señal recibida. Los nodos y Gateway se han ubicado en un case donde permite la fácil ubicación de los dispositivos en cualquier lugar, tal y como se muestra en las siguientes imágenes.



*Figura 197: Ubicación física del prototipo.*



Figura 198: Ubicación física del prototipo.



Figura 199: Mapa de Ubicación de los nodos sensores en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura en QGIS.

A continuación, se muestran imágenes de las diferentes mediciones realizadas a diferentes momentos. En estas capturas se puede observar la hora y la fecha en las cuales fueron capturados los datos

# MEDICIÓN 1

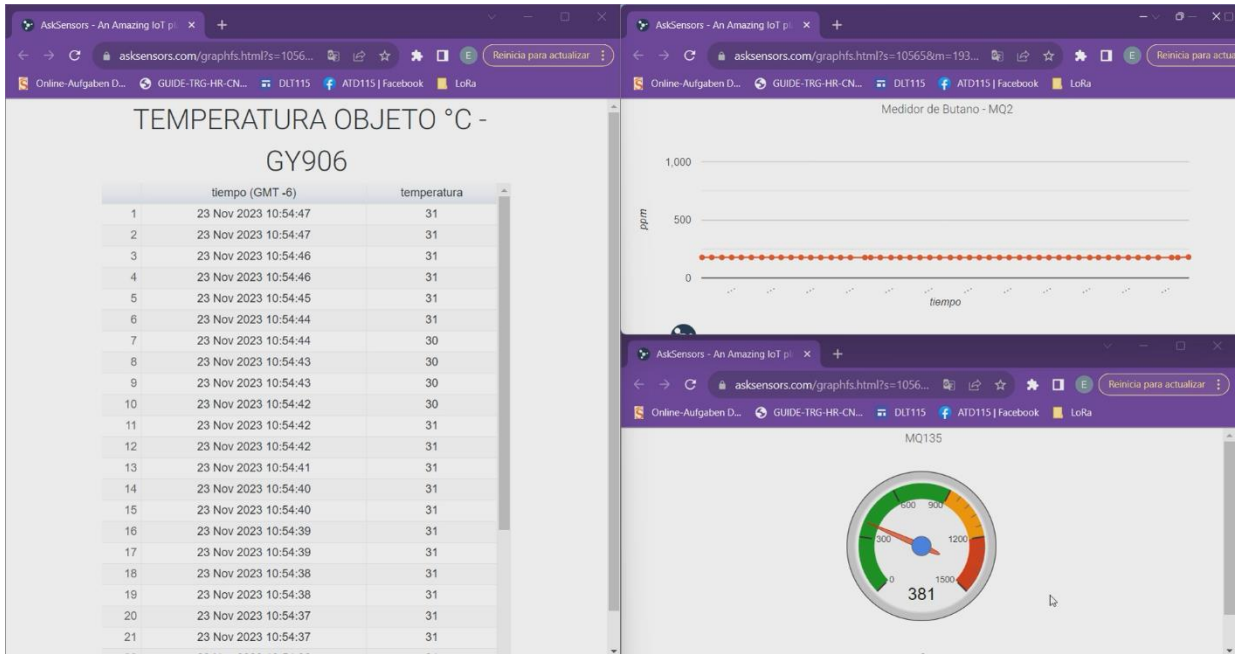


Figura 200: Primera toma de datos realizada a los sensores en ubicación 1

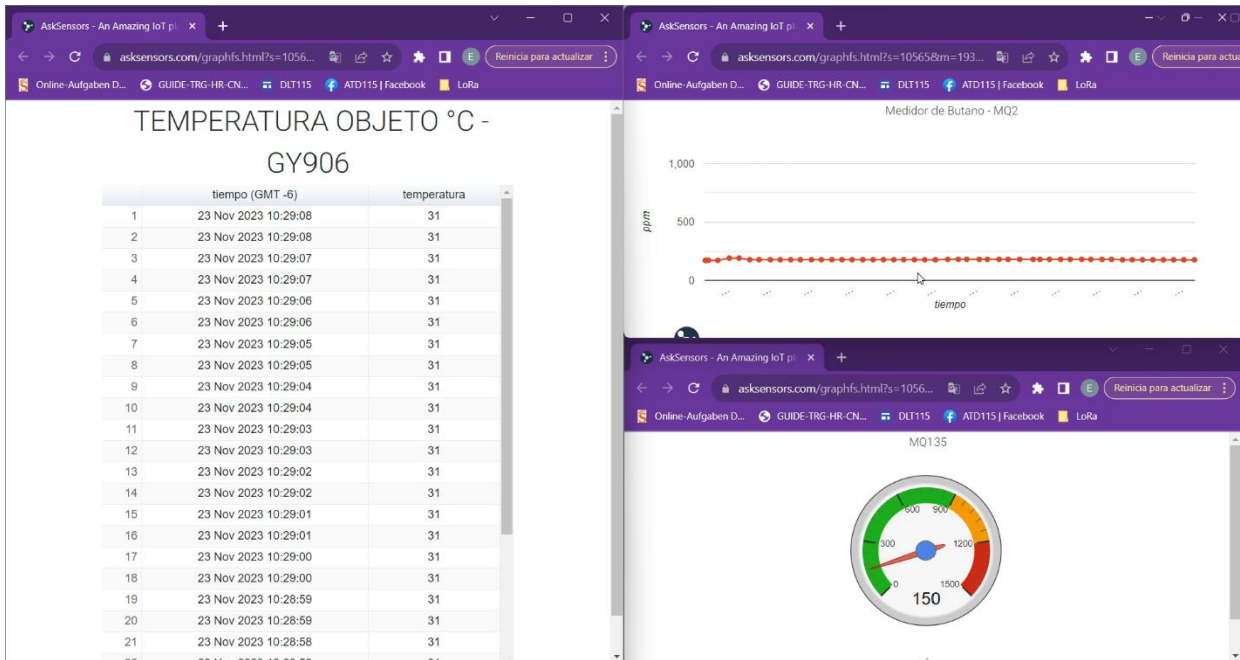


Figura 201: Segunda toma de datos realizada a los sensores en ubicación 1.

## MEDICIÓN 2

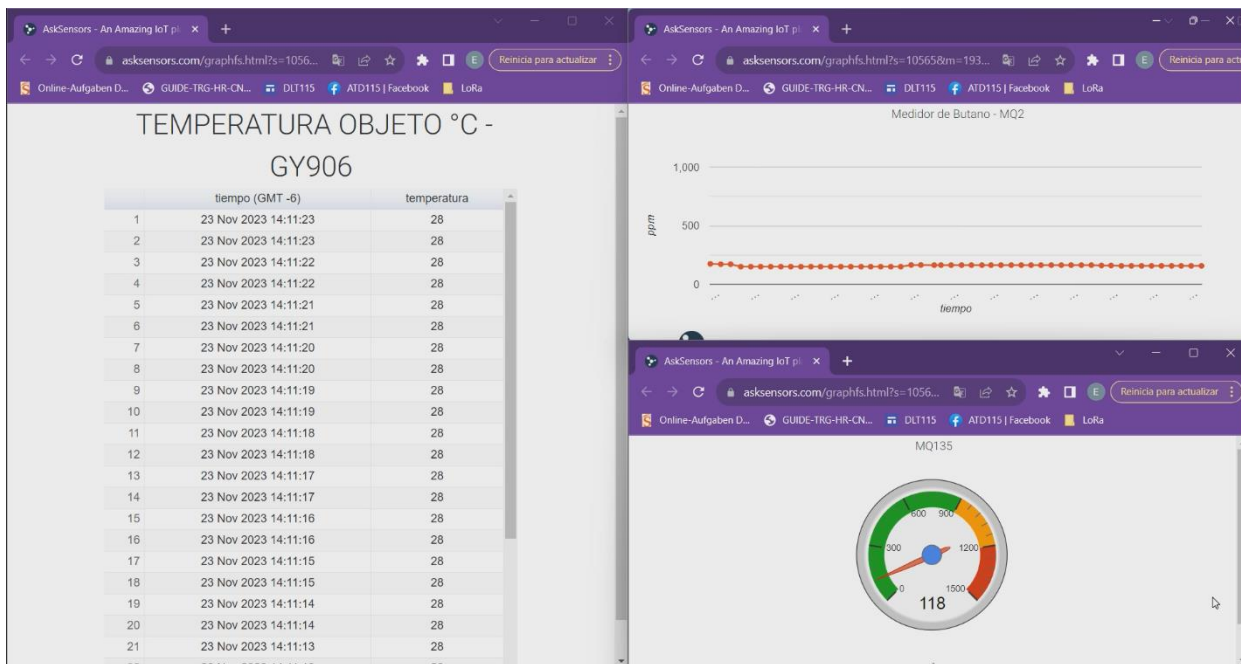


Figura 202: Primera toma de datos realizada a los sensores en ubicación 2.

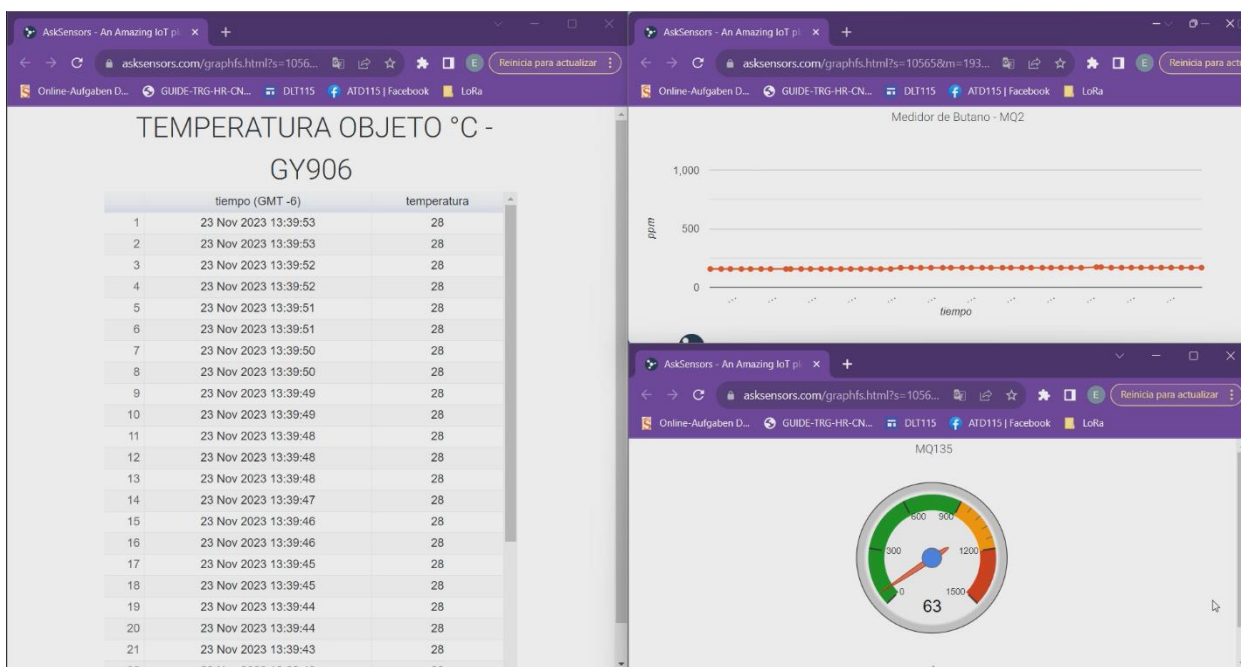


Figura 203: Segunda toma de datos realizada a los sensores en ubicación 2.

### MEDICIÓN 3

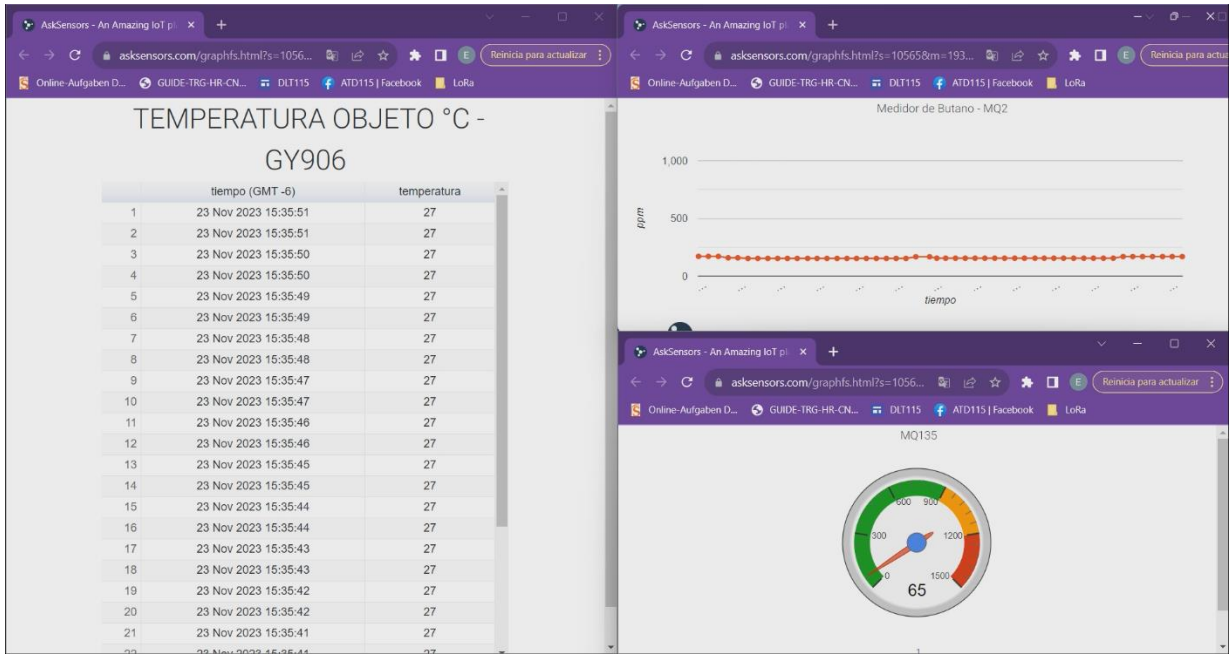


Figura 204: Primera toma de datos realizada a los sensores en ubicación 3.

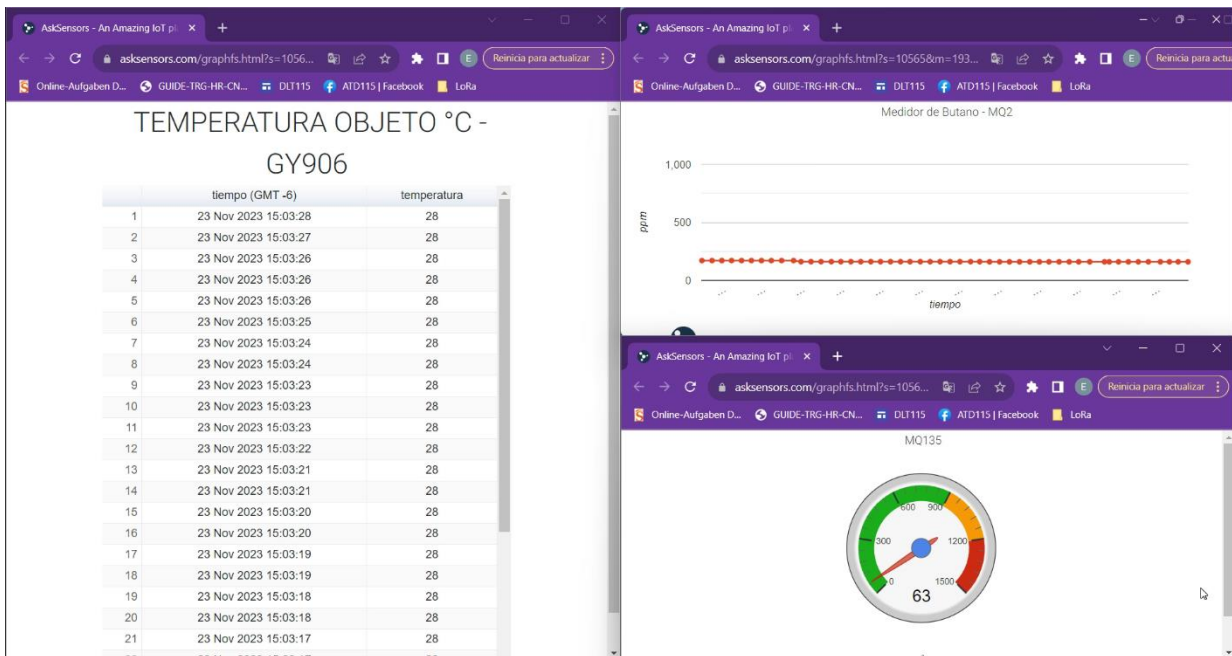


Figura 205: Segunda toma de datos realizada a los sensores en ubicación 3.

## MEDICIÓN 4

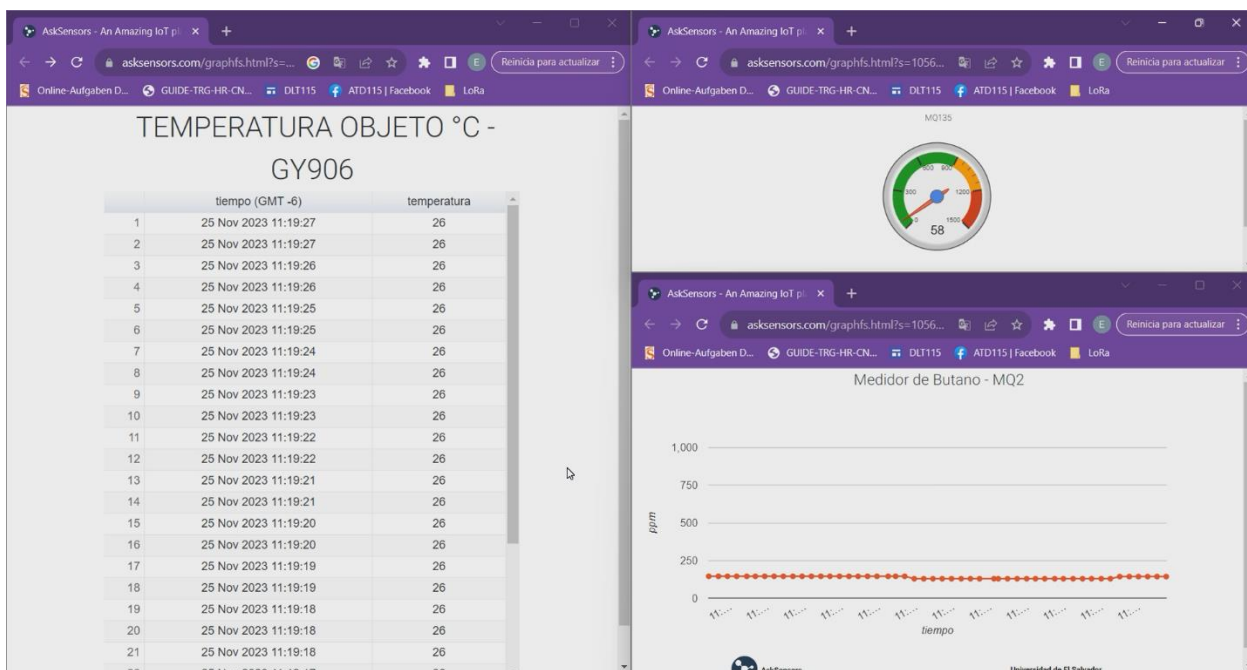


Figura 206: Primera toma de datos realizada a los sensores en ubicación 4.

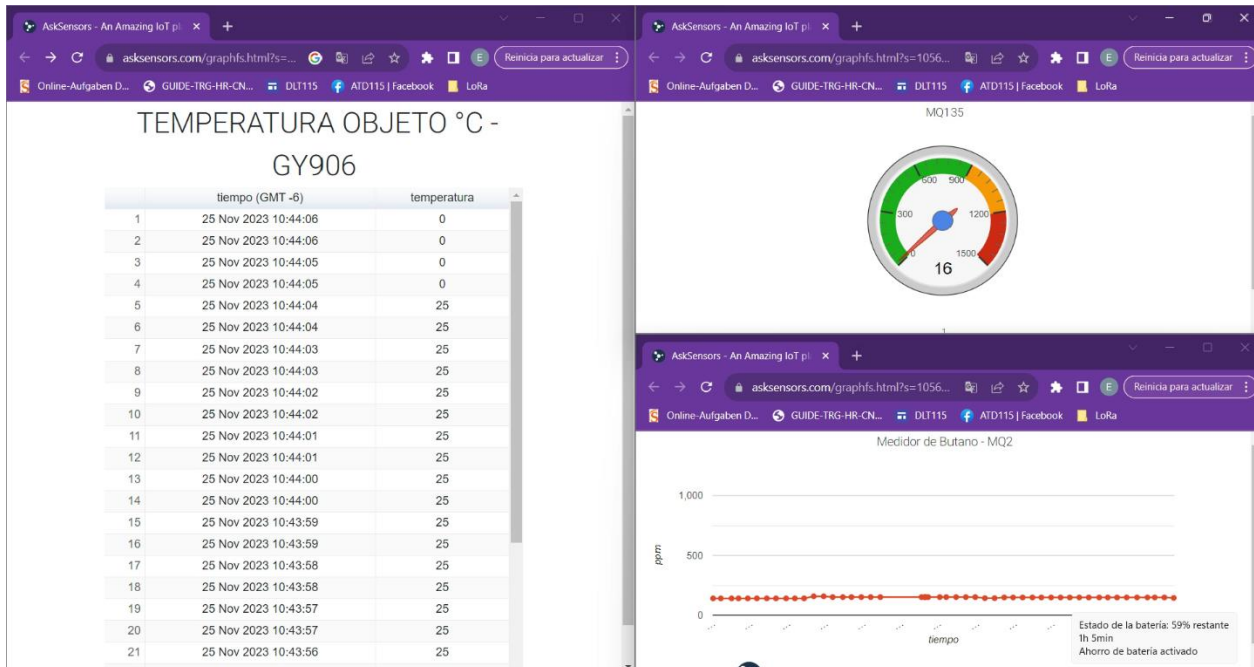


Figura 207: Segunda toma de datos realizada a los sensores en ubicación 4.

## MEDICIÓN 5

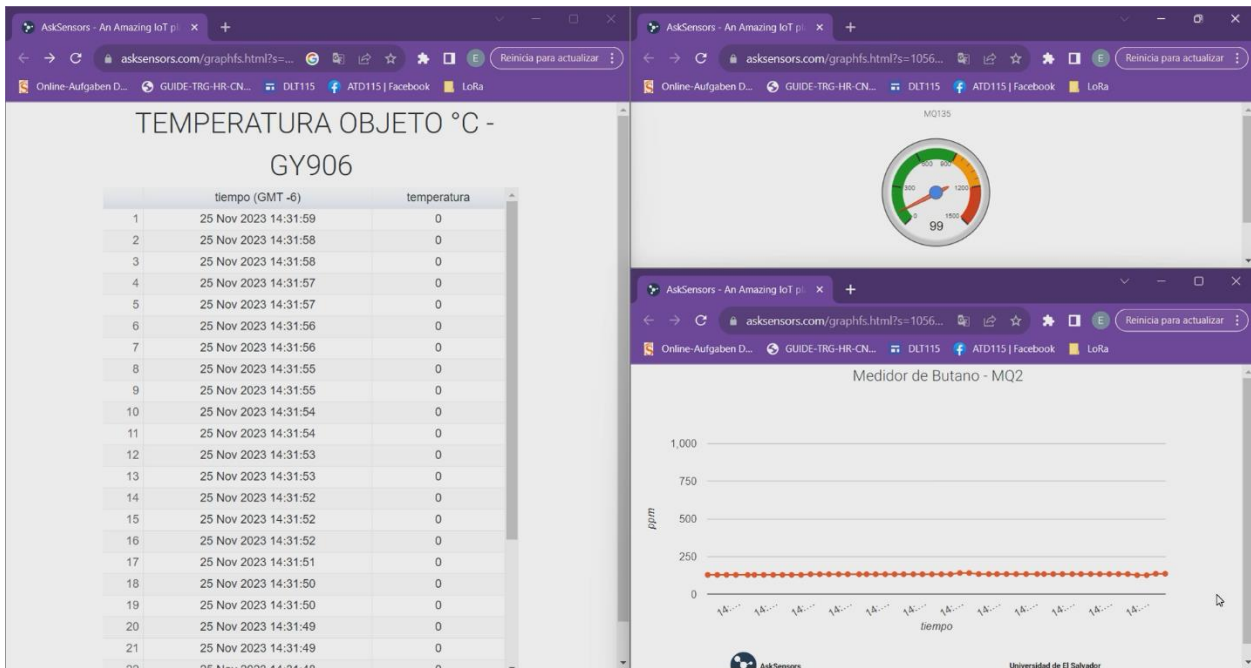


Figura 208: Primera toma de datos realizada a los sensores en ubicación 5.

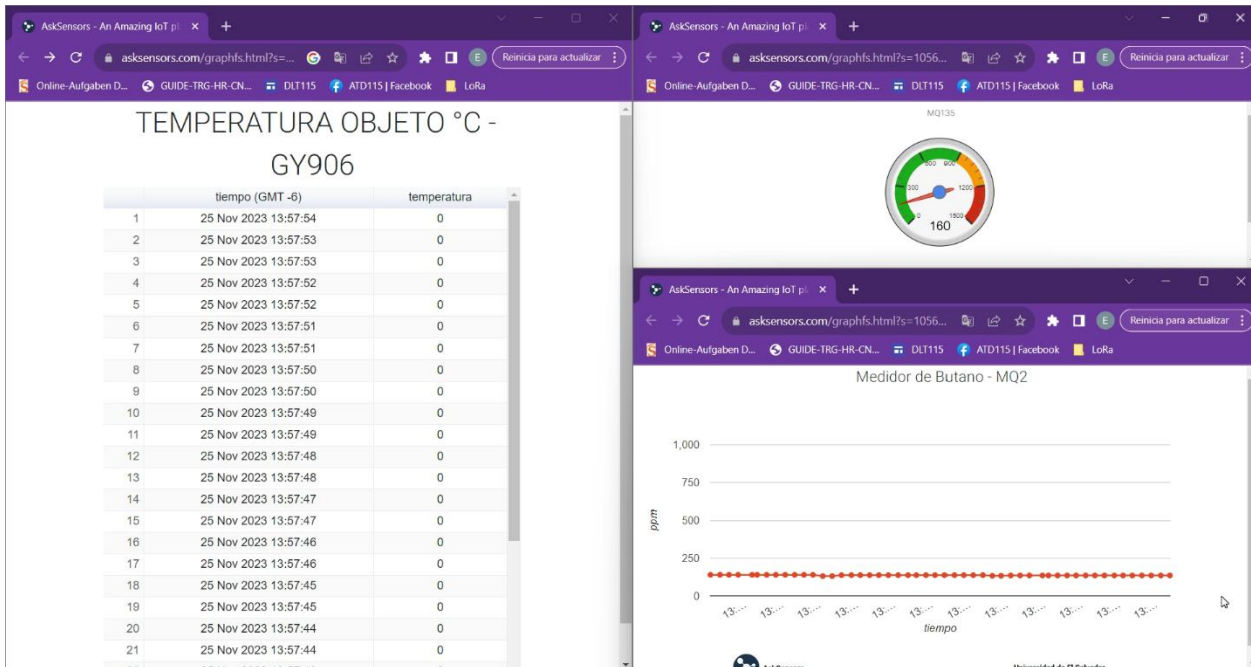


Figura 209: Segunda toma de datos realizada a los sensores en ubicación 5.

En todos los puntos escogidos dentro de la de la facultad, salvo por uno (Punto GY906-E), se mostraron resultados positivos en el envío, recepción y subida a la página IOT de los datos medidos por los sensores. el resumen de resultados se muestra en la tabla 16.

Otra observación para destacar del proceso de pruebas es que el alcance máximo medido entre dos dispositivos fue de aproximadamente 350 metros, difiriendo significativamente con respecto a los valores descritos por el fabricante y los estándares de la tecnología LoRa. Esto se debe en gran medida a la ganancia de la antena con la que viene integrada la placa TTGO LoRa 32, la cual posee una ganancia de 2 dBi solamente.

Algo importante a destacar es que el punto donde la conexión entre dispositivos falló es debido a que el vano atraviesa dos edificios de concreto de un grosos considerable. Al utilizar lenguaje de programación Arduino, la placa TTGO hace una opción muy versátil para ser conectado con cualquier sensor que utiliza este tipo de lenguaje, pudiéndole dar una infinidad de aplicaciones como en ámbitos de seguridad, geolocalización, control de parámetros físicos, salud, entre muchas más.

*Tabla 15: Resumen de resultados de la prueba realizada al prototipo de red.*

<b>Sensor</b>	<b>MQ135</b>	<b>MQ2</b>	<b>GY906</b>
<b>Coordenadas A</b>	13.7201/- 89.2010	13.7199/- 89.2008	13.7197/- 89.2009
Descripción del vano	Presencia de árboles en trayectoria	no hay línea vista directa en el trayecto.	Presencia de árboles y esquina de edificio en trayecto
Observaciones	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema
<b>Coordenadas B</b>	13.7206/- 89.2004	13.72/-89.2005	13.7203/- 89.2004
Descripción del vano	Presencia de árboles y edificio C sin línea vista	Presencia de árboles sin línea vista	Presencia de árboles sin línea vista
Observaciones	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema
<b>Coordenadas C</b>	13.7207/- 89.2007	13.7206/- 89.2013	13.7208/- 89.2009

Descripción del vano	Presencia de árboles y edificio C sin línea vista	Presencia de árboles sin línea vista	Presencia de árboles en trayectoria
Observaciones	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema
<b>Coordenadas D</b>	13.7197/ - 89.2018	13.7205/- 89.2017	13.7201/- 89.2021
Descripción del vano	Presencia de árboles y auditorio en la trayectoria	Presencia de árboles y edificio administrativo en la trayectoria	Presencia de árboles en la trayectoria
Observaciones	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema
<b>Coordenadas E</b>	13.7204/- 89.2010	13.7202/- 89.20073	13.7203/- 89.20072
Descripción del vano	ubicado justo abajo del gateway	presencia de árboles y a un costado de edificio C	Ancho del edificio C y una parte del edificio B
Observaciones	Se envían paquetes sin problema	Se envían paquetes sin problema	No se envían paquetes al gateway

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES

- Si bien es cierto que para la predicción teórica de cobertura de redes LoRa existen diversas aplicaciones de softwares disponibles en la web, buena parte de ellas (especialmente las de uso libre), no ofrecen la precisión requerida, especialmente en entornos urbanos con vegetación densa, en donde el error de predicción con respecto a medidas reales puede alcanzar valores superiores a los 10dB.
- En nuestro país, el despliegue de redes bajo tecnología LoRa sigue siendo limitado, al igual que tecnologías como LTE-M, sin embargo, en el corto plazo consideramos que se convertirán en las redes de soporte principales para aplicaciones IoT, tomando en consideración las ventajas que estas ofrecen. Hasta que esa condición se alcance, la alternativa es la implementación de redes propias basadas en tecnologías como LoRa.
- La comprobación de cobertura de redes LoRa usando instrumentos como analizadores de espectro en tiempo real, es en definitiva la opción más exacta. No obstante, el uso de estos equipos elevaría sustancialmente los costos (alrededor de un 300%), por lo cual, es un factor importante a tomar en cuenta al momento de seleccionar la alternativa de diseño más adecuada para una aplicación en particular.
- Si bien las especificaciones que los fabricantes proporcionan para la tecnología LoRa indican un alcance de 1 a 10 km, eso depende de las características de radiación de energía desde cada uno de los nodos, así como del entorno en el cual se implementen este tipo de redes. En cuanto a las características de radiación, uno de los aspectos más importantes es la ganancia del sistema de antenas que se utilice, lo cual puede variar desde los 2dBi hasta 10dBi; para el caso del presente estudio, las antenas empleadas son de baja ganancia, por lo cual, el alcance obtenido no superó los 400 metros en un entorno urbano; lo anterior se podría mejorar empleando antenas de mayor ganancia (de 5.8 a 7 dBi) y con ello es altamente probable alcanzar la cobertura indicada por los fabricantes.
- La computación en la nube y la tecnología LoRa son complementarias y pueden ser utilizadas conjuntamente para potenciar aplicaciones IoT. La computación en la nube proporciona la infraestructura necesaria para el manejo de gran cantidad de datos recogidos no solo por sensores, sino por una gran cantidad de dispositivos pertenecientes a la tecnología LoRa, permitiendo así, el almacenamiento, procesamiento y análisis eficientes de datos. La combinación de ambas tecnologías impulsa gran variedad de soluciones en diferentes áreas como la monitorización remota, agricultura inteligente, ciudades conectadas, etc. Para aplicaciones pequeñas (que no superen una cantidad de 100 nodos) el costo aproximado de los servicios de computación en la nube es de \$10, sin embargo, si se pretende realizar aplicaciones más grandes, el precio aumenta significativamente, ya que, aquellas aplicaciones que posean una cantidad de 1000 nodos o más, deben contar con servidores de red centralizados, los cuales, requieren de la compra de servicios en planes (usualmente mensuales), con costos arriba de los \$200 para planes básicos y de más de \$1000 para planes de mayor capacidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de ElectroDaddy: <https://www.electrodaddy.com/lorawan-internet-de-las-cosas/>
- AMERICA, TES. (2023). *ATDI HTZ Communication*. Obtenido de tesamerica: <https://www.tesamerica.com/htz-communications/>
- Andres Montes, L. C. (s.f.). *Telemetría a través de redes de área extensa de baja potencia (LPWA) y en coexistencia con el internet de las cosas (IoT)*. Recuperado el 1 de septiembre de 2023, de udistrital.
- Anónimo. (2022). *LoRaWAN e Internet de las Cosas*. Obtenido de ElectroDaddy: <https://www.electrodaddy.com/lorawan-internet-de-las-cosas/>
- Anónimo. (s.f.). *Comunicaciones IoT. LTE-M, NB-IoT y 5G*. Obtenido de Wordpress: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2023/02/26/comunicaciones-iot-lte-m-nb-iot-y-5g/#comments>
- Arduino. (s.f.). *Arduino MKR WAN 1300 (LoRa® connectivity)*. Obtenido de Arduino Official Store: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mkr-wan-1300-lora-connectivity>
- Bassi, A. (03 de junio de 2021). *Intro a la tecnología de 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](https://www.gotoiot.com/pages/articles/lora_intro/content.html#:~:text=La%20historia%20de%20LoRa%20comenzó,convertir%20la%20idea%20en%20realidad)
- Becolve Digital. (21 de julio de 2020). *LPWAN: qué son y para qué se utilizan*. Obtenido de Becolve Digital: <https://becolve.com/blog/lpwan-que-son-y-para-que-se-utilizan/>
- Becolve Digital. (16 de junio de 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/>
- Behrtech Co. (s.f.). *LPWAN TECHNOLOGY FOR IOT*. Obtenido de behrtech: <https://behrtech.com/lpwan-technology/>
- Bullian, L., & Urbina, C. (2018). *Implementación de una red LoRa en el ámbito de la Universidad Nacional de San Martín*. Buenos Aires: Universidad Nacional de San Martín.

- CENOS. (s.f.). *Simulaciones 3D de radiofrecuencia potentes pero asequibles para pymes*. Obtenido de Platform-CENOS: <https://www.cenos-platform.com/es/radio-frequency-simulation-software-for-hardware-sme>
- Cloud RF. (18 de febrero de 2021). *Getting started with Cloud-RF*. Obtenido de cloudrf: <https://cloudrf.com/docs/getting-started-with-cloud-rf/>
- cloudflare. (s.f.). *cloudflare*. Obtenido de ¿Qué es el modelo OSI?
- Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo. (s.f.). *Guía para: CALIDAD DEL AIRE AMBIENTAL INMISIONES ATMOSFÉRICAS*. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.
- 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 2024
- Desconocido. (Diciembre de 2007). Recuperado el 19 de agosto de 2023, de The U.S. Coast Guard has started working with International Standards Organization (ISO): [https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/compendium/0902.00-0928.00\\_01MAR14.pdf](https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/compendium/0902.00-0928.00_01MAR14.pdf)
- desconocido. (2014). *Rak IoT Made Easy*.
- Dragino. (enero de 2013). *dragino*. Obtenido de LG01-N -- Single Channel LoRa IoT Gateway.
- Dragino. (23 de septiembre de 2023). *DRAGINO SX127X*. Obtenido de Dragino Store: <https://www.dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html>
- Dragino. (10 de noviembre de 2023). *LG01-N -- Single Channel LoRa IoT Gateway*. Obtenido de Dragino Store: <https://www.dragino.com/products/lora/item/143-lg01n.html>
- Dragino. (27 de noviembre de 2023). *LG308N -- LoRaWAN Gateway*. Obtenido de Dragino Store: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/229-lg308n.html>
- Echostar Mobile. (2022). *LoRa® basado en satélite desbloquea el IoT en toda Europa*. Obtenido de Echostarmobile.com: <https://www.echostarmobile.com/wp-content/uploads/2022/05/Remote-Monitoring-of-Renewable-Energy-Sites-Echostar-Mobile-Whitepaper-Spanish.pdf>
- Froehlich, A. (02 de septiembre de 2020). *LoRa vs. 5G: ¿Pueden coexistir para la conectividad de red IoT?* Obtenido de Computer Weekly:

<https://www.computerweekly.com/es/respuesta/LoRa-vs-5G-Pueden-coexistir-para-la-conectividad-de-red-IoT>

Hernández, R. (22 de enero de 2019). *¿Qué es la tecnología LoRa y por qué es importante para IoT?* . Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-la-tecnolog%C3%ADa-lora-y-por-importante-para-iot-hern%C3%A1ndez>

Ibarra, L. (07 de julio de 2019). *LA RED DE LAS COSAS COMIENZA A TOMAR FORMA EN EL SALVADOR*. Obtenido de La Prensa Gráfica: <https://blogs.laprensagrafica.com/litoibarra/?p=5002>

International Labour Organization. (2018). *BUTANO (gas licuado)*. Ginebra: INSST.

IOTConsulting. (6 de septiembre de 2020). *iotconsulting.tech*. Obtenido de Pruebas de LoRa sin línea de vista : <https://iotconsulting.tech/pruebas-de-lora-sin-linea-de-vista/>

Israel M. Zamora, M. M. (s.f.). Recuperado el 10 de octubre de 2023, de slideshare: <https://es.slideshare.net/nica2009/lecture-4-analisis-radioprop-p2>

ITU-T Y.4480. (noviembre de 2021). *Low power protocol for wide area wireless*. Obtenido de SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS, NEXT-GENERATION NETWORKS, INTERNET OF THINGS AND SMART CITIES.

LiLYGO. (s.f.). Obtenido de <https://www.lilygo.cc/products/lora32-v1-0?variant=42341146067125>

LILYGO. (2023). *LoRa32 V1.0*. Obtenido de LILYGO Official Store: <https://www.lilygo.cc/products/lora32-v1-0>

LoRa Antenna. (abril de 2022). *Planes y regulaciones de frecuencia de LoRaWan por región de país*. Obtenido de Loraantenna.com: <https://www.loraantenna.com/es/lorawan-frequency-plans-by-country-region/>

McKinsey&Company. (junio de 2015). *mckinsey*. Obtenido de The Internet of things: Mapping the value beyond the hype : [https://www.mckinsey.com/~/\\_media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking\\_the\\_potential\\_of\\_the\\_internet\\_of\\_](https://www.mckinsey.com/~/_media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking_the_potential_of_the_internet_of_)

*Modelo OSU, ISO/IEC 7498-1:1994*. (s.f.). Obtenido de <https://ipmoguide.com/modelo-osi-iso-iec-7498-11994/>

- Moko LoRa. (17 de Agosto de 2021). *Comprensión completa de LoRa y LoRaWAN*. Obtenido de Moko LoRa: <https://www.mokolora.com/es/full-understanding-of-lora-and-lorawan/>
- Moko LoRa. (s.f.). *Aplicaciones LoRaWAN*. Obtenido de Moko LoRa: <https://www.mokolora.com/es/lorawan-applications/>
- mokolora. (14 de septiembre de 2021). *mokolora*. Obtenido de Comparacion entre LoRa y otras tecnologías inalámbricas .
- Morales, I. (2023). *EVALUACIÓN DE USO DE MINIVNA TINY COOL PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES DE EIE*. San Salvador.
- Naylamp Mechatronics. (s.f.). *SENSOR MQ-135 GAS CALIDAD DE AIRE*. Obtenido de [naylampmechatronics.com](https://naylampmechatronics.com): <https://naylampmechatronics.com/sensores-gas/73-sensor-mq-135-gas-calidad-aire.html>
- Nayland Mechatronics. (s.f.). *SENSOR MQ-2 GAS GLP/GNV*. Obtenido de [naylandmechatronix](https://naylandmechatronix.com): <https://naylampmechatronics.com/sensores-gas/71-sensor-mq-2-gas-glp-gnv.html>
- Pathloss. (2022). *Pathloss Version 5.1*. Obtenido de Pathloss: [https://www.pathloss.com/p5/docs/pl5\\_white\\_paper.pdf](https://www.pathloss.com/p5/docs/pl5_white_paper.pdf)
- Pickering, P. (29 de julio de 2017). *Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance*. Obtenido de DigiKey: <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>
- Quistial, A., Lupera Mortillo, p., Tipantuña, C., & Carvajal, J. (2018). *Modelo Matemático Adaptado para el Cálculo de Pérdidas de propagacion 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
- Rábanos, J. M. (2008). *Transmisión por Radio* . Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces.
- Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (octubre de 2015). *La internet de las cosas- una breve reseña*. Recuperado el octubre de 2023, de Internet Society: <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/09/report-InternetOfThings-20160817-es-1.pdf>

Salvador, H. S. (21 de 09 de 2018). *¿Cuál es la frecuencia oficial de The Things Network en El Salvador*. Obtenido de thethingsnetwork: <https://www.thethingsnetwork.org/community/san-salvador/post/cual-es-la-frecuencia-oficial-de-the-things-network-en-el-salvador>

SIGET. (febrero de 2017). *CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCION DE FRECUENCIAS - CNAF*. Recuperado el 13 de junio de 2023, de SIGET: <https://www.siget.gob.sv/wp-content/uploads/download-manager-files/Cuadro%20Nacional%20de%20Atribucion%20de%20Frecuencias%20-%20CNAF%202017.pdf>

superseding (Ed.). (17 de noviembre de 2021). Obtenido de dla: <https://quicksearch.dla.mil/Transient/69D9790F7C184F8DA723CCCB62E0007C.pdf>

Tektronix. (s.f.). *SignalVu-PC / Vector Signal Analysis Software*. USA: Tektronix.

Tektronix. (s.f.). *Tektronix RSA306/USB Spectrum Analyzer*. USA: Tektronix.

Telefónica Tech. (03 de diciembre de 2020). *Iot4All:¿Cómo se conectan y comunican los dispositivos?* Obtenido de telefonticatech: <https://telefonticatech.com/blog/iot4allcomo-se-conectan-y-comunican-los-dispositivos>

thethingsnetwork. (s.f.). Obtenido de Pagina oficial de thethingsnetwork: <https://www.thethingsnetwork.org>

UIT-R. (1999). Obtenido de itu.int: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-2-199910-S!!PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-2-199910-S!!PDF-S.pdf)

Unit Electronics. (s.f.). *Sensor de Temperatura infrarrojo GY-906 MLX90614*. Obtenido de uelectronics: <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-temperatura-infrarrojo-gy-906-mlx90614/>

United States Department of Commerce. (diciembre de 2007). *902-928 MHz*. Obtenido de National Telecommunications and Information Administration: [https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/compendium/0902.00-0928.00\\_01MAR14.pdf](https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/compendium/0902.00-0928.00_01MAR14.pdf)

Xirio. (s.f.). *COST 231*. Obtenido de Xirioonline: [https://www.xirioonline.com/web/help/es/cost\\_231.htm](https://www.xirioonline.com/web/help/es/cost_231.htm)

Xirio. (s.f.). *OKUMURA-HATA*. Obtenido de Xirioonline: <https://www.xirioonline.com/web/help/es/okumura-hata.htm>

Xirio. (s.f.). *REC. UIT-R P.1147*. Obtenido de Xirioonline: [https://www.xirioonline.com/web/help/es/rec\\_1147.htm](https://www.xirioonline.com/web/help/es/rec_1147.htm)

Zabeu, S. (06 de Octubre de 2023). *Los conjuntos de chips LoRa ya predominan en LPWAN*. Obtenido de network-king.net: <https://network-king.net/es/los-conjuntos-de-chips-lora-ya-predominan-en-lpwan/#:~:text=Historia%20de%20LoRaWAN,largo%20alcance%20y%20bajo%20consumo>.

Zarate, J. A. (28 de marzo de 2023). Obtenido de Sistema de comunicación en la banda ISM: [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4\\_Sistemas%20de%20comunicación%20en%20la%20banda%20ISM.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4_Sistemas%20de%20comunicación%20en%20la%20banda%20ISM.pdf)

F. Ikegami, T. Takeuchi and S. Yoshida, "Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, no. 3, pp. 299-302, March 1991, 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. Carácas, Venezuela. Recuperado el 22 de Diciembre de 2023

Arevalo Peña, J. F.; García Bernal, E. A. (2019). *Simulación y análisis de protocolos de transmisión para IoT utilizando herramientas de simulación de redes inalámbricas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Recuperado el 10 de Octubre de 2023

## ANEXOS

### ANEXO A: CÓDIGOS IMPLEMENTADOS

#### CÓDIGO DE GEO LOCALIZADOR

```
//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA    //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //
//    BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA        //
//          MODULO GPS                    //

#include <TinyGPS++.h>
#include <SoftwareSerial.h>

#define RX_PIN 16
#define TX_PIN 17

TinyGPSPlus gps;
SoftwareSerial ss(RX_PIN, TX_PIN);

unsigned long lastUpdate = 0;
const int updateInterval = 10000;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  ss.begin(9600);
}

void loop() {
  while (ss.available() > 0) {
    if (gps.encode(ss.read())) {
      // Procesar los datos del GPS, pero no imprimir aquí
    }
  }

  // Imprimir solo una vez por ciclo principal
  if (millis() - lastUpdate >= updateInterval) {
    lastUpdate = millis();

    if (gps.location.isUpdated()) {
      Serial.println("Universidad de El Salvador");
      // Mostrar información de posición
      Serial.print("Latitud: ");
    }
  }
}
```

```

        Serial.println(gps.location.lat(), 6);
        Serial.print("Longitud: ");
        Serial.println(gps.location.lng(), 6);
        Serial.print("Altitud: ");
        Serial.println(gps.altitude.meters());
    }

    if (gps.date.isUpdated()) {
        // Mostrar información de fecha
        Serial.print("Fecha: ");
        Serial.print(gps.date.day());
        Serial.print("/");
        Serial.print(gps.date.month());
        Serial.print("/");
        Serial.println(gps.date.year());
    }

    if (gps.time.isUpdated()) {
        // Mostrar información de tiempo
        int timeZoneOffset = -6;
        Serial.print("Hora: ");
        Serial.print(gps.time.hour() + timeZoneOffset);
        Serial.print(":");
        Serial.print(gps.time.minute());
        Serial.print(":");
        Serial.println(gps.time.second());
        Serial.print("SAT: ");
        Serial.println(gps.satellites.value());
        Serial.println(" ");
        Serial.println(" ");
    }
}
}
}

```

## **CÓDIGO TRANSMISOR PARA ANÁLISIS DE COBERTURA**

```

//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA    //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //
//    BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA        //

```

```
#include <SPI.h>
```

```

#include <LoRa.h>
#include <U8g2lib.h>
// #include <U8x8lib.h>

#define OFF 0 // For LED
#define ON 1

// SPI LoRa Radio
#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST
#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)

// I2C OLED Display works with SSD1306 driver
#define OLED_SDA 4
#define OLED_SCL 15
#define OLED_RST 16

U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_SW_I2C Display(U8G2_R0, /* clock=*/ OLED_SCL,
/* data=*/ OLED_SDA, /* reset=*/ OLED_RST); // Full framebuffer, SW I2C

const int blueLED = LED_BUILTIN;
int counter = 0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Sender");

  Display.begin();
  Display.enableUTF8Print(); // enable UTF8 support for the Arduino
  print() function
  Display.setFont(u8g2_font_ncenB10_tr);

  // Very important for SPI pin configuration!
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

  // Very important for LoRa Radio pin configuration!
  LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

  pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

```

```

if (!LoRa.begin(915E6)) {
  Serial.println("Starting LoRa failed!");
  while (1);
}

LoRa.setSpreadingFactor(7); // ranges from 6-12, default 7 see API docs

LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);

}

void loop() {
  Serial.print("Sending packet: ");
  Serial.println(counter);

  digitalWrite(blueLED, ON); // Turn blue LED on
  // send packet
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("HeLoRa! ");
  LoRa.print(counter);
  LoRa.endPacket();
  digitalWrite(blueLED, OFF); // Turn blue LED off

  // Display Info
  Display.clearBuffer();
  Display.setCursor(0,12); Display.print("LoRa Sender");
  Display.setCursor(0,30); Display.print("Sent Packet:");
  Display.setCursor(0,48); Display.print(" # " + (String)counter);
  Display.sendBuffer();

  counter++;

  delay(5000);
}

```

## **CÓDIGO DE PLACA RECEPTORA PARA ANÁLISIS DE COBERTURA**

```

//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA    //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //

```

```

//      BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA      //

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>      // https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa
#include <U8g2lib.h>   // https://github.com/olikraus/U8g2_Arduino
// #include <U8x8lib.h>

#define OFF 0    // For LED
#define ON 1

// SPI LoRa Radio
#define LORA_SCK 5      // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19   // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27   // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18     // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14    // GPIO14 - SX1276 RST
#define LORA_IRQ 26    // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)

// I2C OLED Display works with SSD1306 driver
#define OLED_SDA 4
#define OLED_SCL 15
#define OLED_RST 16

U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_SW_I2C Display(U8G2_R0, /* clock=*/ OLED_SCL,
/* data=*/ OLED_SDA, /* reset=*/ OLED_RST); // Full framebuffer, SW I2C

const int blueLED = LED_BUILTIN;

String rssi = "";
String packet = "";

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Receiver");

  Display.begin();
  Display.enableUTF8Print();    // enable UTF8 support for the Arduino
  print() function
  Display.setFont(u8g2_font_ncenB10_tr);

  // Very important for SPI pin configuration!
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

```

```

// Very important for LoRa Radio pin configuration!
LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

if (!LoRa.begin(915E6)) {
  Serial.println("Starting LoRa failed!");
  while (1);
}

LoRa.setSpreadingFactor(7); // ranges from 6-12, default 7 see API docs
}

void loop() {
  // try to parse packet
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    // received a packet

    Serial.print("Received packet ");

    digitalWrite(blueLED, ON); // Turn blue LED on

    // read packet
    packet = ""; // Clear packet
    //int packet = 0;
    while (LoRa.available()) {
      packet += (char)LoRa.read(); // Assemble new packet
    }
    rssi = LoRa.packetRssi();

    // Display Info
    Display.clearBuffer();
    Display.setCursor(0,12); Display.print("LoRa Receiver");
    Display.setCursor(0,26); Display.print("Received packet:");
    Display.setCursor(0,42); Display.print(packet);
    Display.setCursor(0,58); Display.print("RSSI " + rssi);
    Display.sendBuffer();

    digitalWrite(blueLED, OFF); // Turn blue LED off

    Serial.println(packet + "' with RSSI " + rssi);
  }
}

```

```
}
```

## CÓDIGO DE RECEPTOR LORA PARA PRUEBA DE PROTOTIPO

```
//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA    //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //
//    BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA        //
//          RECEPTOR LORA              //

//declaracion de variable
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>

#define OFF 0 // para led
#define ON 1

#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST
#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)

const int blueLED = LED_BUILTIN;

String receivedMessage1 = "";
String receivedMessage2 = "";
int MQ135_data = 0;
int mq135ValueFromPlaca1 = 0;
int gy906ValueFromPlaca2 = 0;
int valueFromPlaca3 = 0;
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
//conexion a wifi
const char* ssid = "Galaxy A32E10B"; // Wifi SSID
const char* password = "harrymessi"; // Wifi Password
const char* username = "davicito"; // my AskSensors usernamevvv
```

```

const char* pubTopic = "publish/davicito/yfgsrzU3gf0xxe3fRxBOzkoC0fmS7ktp";
// publish/username/apiKeyIn
const unsigned int writeInterval = 500; // write interval (in ms)
//AskSensors MQTT config
const char* mqtt_server = "mqtt.asksensors.com";
unsigned int mqtt_port = 1883;
WiFiClient askClient;
PubSubClient client(askClient);
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  // Very important for SPI pin configuration!
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

  // Very important for LoRa Radio pin configuration!
  LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

  pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

  if (!LoRa.begin(914E6)) {
    Serial.println("Error inicializando LoRa");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(7);
  LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);

  Serial.println("Esperando mensajes...");

  Serial.println("*****");
  Serial.println("***** Program Start : ESP32 publishes MQ-135n data to
AskSensors over MQTT");
  Serial.print("***** conectando a WIFI : ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.println("->WiFi conectado");
  Serial.println("->direccion IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
  client.setCallback(callback);

```

```

    mlx.begin();
}

void loop() {

    // Recibe el mensaje
    int packetSize = LoRa.parsePacket();
    if (packetSize) {
        // Lee el identificador del remitente
        int senderID = LoRa.read();

        // Lee el resto del mensaje
        String messageFromSender = "";
        while (LoRa.available()) {
            char c = LoRa.read();
            messageFromSender += c;
        }

        digitalWrite(blueLED, ON); // Enciende el LED azul

        if (senderID == 1) {
            // Procesa el valor del sensor MQ135 enviado por la Placa 1
            mq135ValueFromPlaca1 = messageFromSender.toInt();
            Serial.print("Valor del sensor MQ135 recibido de Placa 1: ");
            Serial.println(mq135ValueFromPlaca1);
        } else if (senderID == 2) {
            // Procesa el valor del sensor GY906 enviado por la Placa 2
            gy906ValueFromPlaca2 = messageFromSender.toInt();
            Serial.print("Valor del sensor GY906 recibido de Placa 2: ");
            Serial.println(gy906ValueFromPlaca2);
        } else if (senderID == 3) {
            // Procesa el valor de la Placa 3 (nuevo ID)
            valueFromPlaca3 = messageFromSender.toInt();
            Serial.print("Valor recibido de Placa 3: ");
            Serial.println(valueFromPlaca3);
            // Agrega la lógica necesaria para el nuevo sensor o acción
            // relacionada con Placa 4
        }
        // Agrega la línea de depuración
        Serial.println("Mensaje recibido de LoRa: " + messageFromSender);
        digitalWrite(blueLED, OFF); // Apaga el LED azul
    }

    if (!client.connected()) {

```

```

    reconnect();
}
client.loop();

// Enviar datos a AskSensors en cada iteración del bucle
char mqtt_payload[40] = "";
snprintf (mqtt_payload, 40, "m1=%ld&m2=%ld&m3=%ld",mq135ValueFromPlaca1,
gy906ValueFromPlaca2, valueFromPlaca3);
Serial.print("Mensaje publicado: ");
Serial.println(mqtt_payload);
client.publish(pubTopic, mqtt_payload);

delay(writeInterval); // Retardo opcional para limitar la frecuencia de
envío
}

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
Serial.print("Message arrived [");
Serial.print(topic);
Serial.print("] ");
for (int i = 0; i < length; i++) {
Serial.print((char)payload[i]);
}
Serial.println();
}

void reconnect() {
// Loop until we're reconnected
while (!client.connected()) {
Serial.print("***** Attempting MQTT connection...");
// Attempt to connect
if (client.connect("ESP32Client", username, "")) {
Serial.println("-> MQTT client connected");
} else {
Serial.print("failed, rc=");
Serial.print(client.state());
Serial.println("-> try again in 5 seconds");
// Wait 5 seconds before retrying
//delay(5000);
}
}
}
}

```

## CÓDIGO DEL SENSOR MQ135

```
//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA      //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //
//    BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA        //
//          Sensor MQ135                  //

//se definen variables
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>

#define OFF 0 // For LED
#define ON 1

#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST
#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)

int myID = 1; // Identificador único de cada placa transmisora
const int blueLED = LED_BUILTIN;
String LoRaMessage = "";

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  // Very important for SPI pin configuration!
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

  // Very important for LoRa Radio pin configuration!
  LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

  pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

  if (!LoRa.begin(914E6)) {
    Serial.println("Error inicializando LoRa");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(7);
  LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);
}
```

```

void loop() {
  // String message = "Hola Mundo";
  int MQ135_data = analogRead(34);
  LoRaMessage = String(MQ135_data);
  Serial.print(MQ135_data); // analog data
  Serial.println(" PPM"); // Unit = part per million
  // Envía el identificador del remitente
  digitalWrite(blueLED, ON); // Turn blue LED on
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.write(myID);

  // Envía el mensaje
  LoRa.print(LoRaMessage);
  LoRa.endPacket();
  digitalWrite(blueLED, OFF); // Turn blue LED off

  Serial.println("Mensaje enviado desde ID " + String(myID) + ": " +
  LoRaMessage);

  delay(500); // Espera 5 ms antes de enviar nuevamente
}

```

## CODIGO DEL SENSOR MQ2

```

//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA    //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //
//    BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA        //

#define AO_PIN 34 // ESP32's pin GPIO36 connected to AO pin of the MQ2
sensor
#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>

#define OFF 0 // For LED
#define ON 1

#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST

```

```

#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)

int myID = 3; // Identificador único de cada placa transmisora
const int blueLED = LED_BUILTIN;
String LoRaMessage = "";

void setup() {
  // initialize serial communication
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  // Very important for SPI pin configuration!
  SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

  // Very important for LoRa Radio pin configuration!
  LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

  pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

  if (!LoRa.begin(914E6)) {
    Serial.println("Error inicializando LoRa");
    while (1);
  }
  LoRa.setSpreadingFactor(7);
  LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);

  Serial.println("Warming up the MQ2 sensor");
  delay(20000); // wait for the MQ2 to warm up
}

void loop() {
  int gasValue = analogRead(AO_PIN);
  LoRaMessage = String(gasValue);
  // Envía el identificador del remitente
  digitalWrite(blueLED, ON); // Turn blue LED on

  LoRa.beginPacket();
  LoRa.write(myID);

  // Envía el mensaje
  LoRa.print(LoRaMessage);
  LoRa.endPacket();

  digitalWrite(blueLED, OFF); // Turn blue LED off
}

```

```

    Serial.println("Mensaje enviado desde ID " + String(myID) + ": " +
LoRaMessage);

    Serial.print("MQ2 sensor A0 value: ");
    Serial.println(gasValue);
    delay(500); // delay de 3 segundos
}

```

## CÓDIGO DEL SENSOR GY906

```

//          UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR          //
//  FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  //
//    ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA    //
//    BR. ERNESTO ALONSO ARIAS ARGUETA    //
//    BR. DAVID ISAI OROZCO MEJIA        //

#include <LoRa.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

#define OFF 0 // For LED
#define ON 1

#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK
#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO
#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI
#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS
#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST
#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (interrupt request)

int myID = 2; // Identificador único de cada placa transmisora
const int blueLED = LED_BUILTIN;
String LoRaMessage = "";

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    mlx.begin();
    while (!Serial);

    // Very important for SPI pin configuration!
    SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

```

```

// Very important for LoRa Radio pin configuration!
LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

pinMode(blueLED, OUTPUT); // For LED feedback

if (!LoRa.begin(914E6)) {
  Serial.println("Error inicializando LoRa");
  while (1);
}
LoRa.setSpreadingFactor(7);
LoRa.setTxPower(20, PA_OUTPUT_RFO_PIN);
}

void loop() {
  // String message = "Hola Mundo";
  int GY906_data = mlx.readObjectTempC();
  LoRaMessage = String(GY906_data);
  // Envía el identificador del remitente
  digitalWrite(blueLED, ON); // Turn blue LED on
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.write(myID);

  // Envía el mensaje
  LoRa.print(LoRaMessage);
  LoRa.endPacket();
  digitalWrite(blueLED, OFF); // Turn blue LED off

  Serial.println("Mensaje enviado desde ID " + String(myID) + ": " +
LoRaMessage);

  delay(500); // Espera 5 segundos antes de enviar nuevamente
}

```

## ANEXO B: DATASHEETS

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE PLACAS TTGO ESP32 V1.0

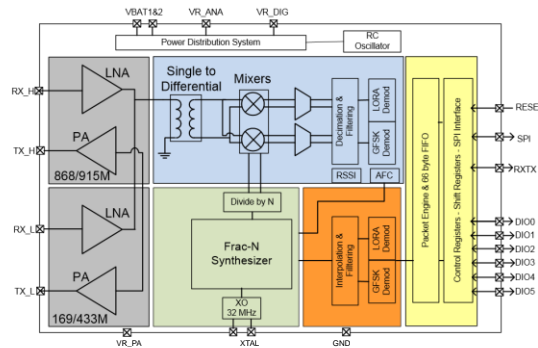
MCU	ESP32
CHIP LORA	SX1276
Memoria Flash	4M
USB to TTL chip	CH910X
Antena	Onboard WiFi 3D antenna IPEX holder LoRa antenna
Pantalla oled	0.96 Inch SSD1306 OLED 128*64
Operación de voltage	3.3V a 7V
Rango de temperatura	-40 ° C to + 90 ° C
Velocidad de datos	150 Mbps @ 11n HT40 72 Mbps @ 11n HT20 54 Mbps @ 11g 11 Mbps @ 11b
Potencia de transmision	19,5 dBm @ 11b 16,5 dBm @ 11g 15,5 dBm @ 11n
sensibilidad del receptor	hasta-98 dBm
Luz roja	Indicador de poder
Luz azul	IO25 control programable

# DATASHEET CHIP LORA SX1276



# SX1276/77/78

## SX1276/77/78 - 137-1050 MHz Ultra Low Power Long Range Transceiver



### GENERAL DESCRIPTION

Semtech's SX1276/77/78 family provides ultra long range while maintaining low current consumption, making it optimal for numerous applications.

With Semtech's patented modulation technique the device can achieve sensitivity of over -140 dBm using a low cost crystal and bill of materials. The high sensitivity combined with the integrated +20 dBm power amplifier creates the highest link budget making it optimal for any application requiring range. This modulation technique also provides significant advantages in blocking and selectivity over FSK.

The devices also support high performance (G)FSK for WMBus, FCC Part 90, 15.4g, and other legacy modes. Semtech's technology overcomes a typical trade-off of performance versus current consumption. The devices deliver exceptional phase noise, selectivity, receiver linearity, and IIP3 for significantly lower current consumption than competing devices.

The devices cover the major ISM bands from 137 MHz to 1050 MHz. For ease of matching, low BOM cost, and higher performance the SX1276/77/78 family offers separate high band and low band support for applications wanting to cover dual bands for world-wide operation, dual band support, or security against future band allocation changes.

### APPLICATIONS

- ⑩ Automated Meter Reading
- ⑩ Wireless Sensor Networks
- ⑩ Home and Building Automation
- ⑩ Wireless Alarm and Security Systems
- ⑩ Industrial Monitoring and Control

### KEY PRODUCT FEATURES

- ⑩ 168 dB maximum link budget
- ⑩ +20 dBm - 100 mW constant RF output vs. V supply
- ⑩ +14 dBm high efficiency PA
- ⑩ Programmable bit rate up to 300 kbps
- ⑩ High sensitivity: down to -146.5 dBm
- ⑩ Bullet-proof front end: IIP3 = -12 dBm
- ⑩ 100 dB blocking immunity
- ⑩ Low RX current of 10 mA, 200 nA register retention
- ⑩ Fully integrated synthesizer with a resolution of 61 Hz
- ⑩ FSK, GFSK, MSK, GMSK, LORA and OOK modulations
- ⑩ Built-in bit synchronizer for clock recovery
- ⑩ Sync word recognition
- ⑩ Preamble detection ⑩ 115 dB+ Dynamic Range RSSI
- ⑩ Automatic RF Sense with ultra-fast AFC
- ⑩ Packet engine up to 64 bytes with CRC
- ⑩ Built-in temperature sensor and Low Battery indicator

### ORDERING INFORMATION

Part Number	Delivery	MOQ / Multiple
SX1276	T&R	3000 pieces
SX1277	T&R	3000 pieces

# DATASHEET SENSOR MQ-135



炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

[www.winsen-sensor.com](http://www.winsen-sensor.com)

## MQ135 Semiconductor Sensor for Air Quality

### Profile

Sensitive material of MQ135 gas sensor is  $\text{SnO}_2$ , which with lower conductivity in clean air. When target pollution gas exists, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit.

MQ135 gas sensor has high sensitivity to ammonia gas, sulfide, benzene series steam, also can monitor smoke and other toxic gases well. It can detect kinds of toxic gases and is a kind of low-cost sensor for kinds of applications.

### Features

It has good sensitivity to toxic gas in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit &etc.

### Main Applications

It is widely used in domestic gas alarm, industrial gas alarm and portable gas detector.

### Technical Parameters Stable.1

Target Gas			ammonia gas, sulfide, benzene series steam
Detection range			10~1000ppm( ammonia gas, toluene, hydrogen, smoke)
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	$V_L$	$\leq 24V$ DC
	Heater Voltage	$V_H$	$5.0V \pm 0.1V$ AC or DC
	Load Resistance	$R_L$	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	$R_H$	$29\Omega \pm 3\Omega$ (room tem.)
	Heater consumption	$P_H$	$\leq 950mW$
	Sensitivity	$S$	$R_S(\text{in air})/R_S(\text{in } 400\text{ppm } H_2) \geq 5$
	Output Voltage	$V_S$	$2.0V \sim 4.0V$ (in 400ppm $H_2$ )
Standard test conditions	Concentration Slope	$\alpha$	$\leq 0.6(R_{400\text{ppm}}/R_{100\text{ppm } H_2})$
	Tem. Humidity		$20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}; 55\% \pm 5\%RH$
	Standard test circuit		$V_L: 5.0V \pm 0.1V$ $V_H: 5.0V \pm 0.1V$
	Preheat time		Over 48 hours

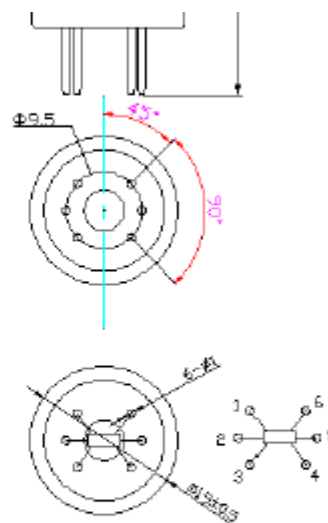


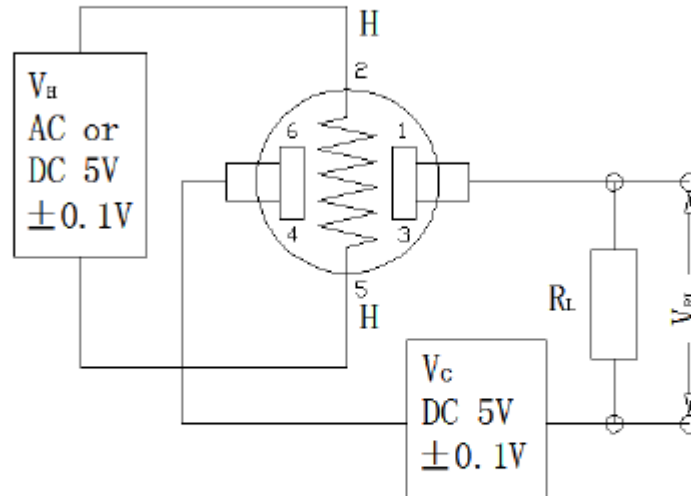
Fig1.Sensor Structure  
Unit: mm

NOTE: Output voltage ( $V_S$ ) is  $V_{RL}$  in test environment.

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

Email: [sales@winsensor.com](mailto:sales@winsensor.com)

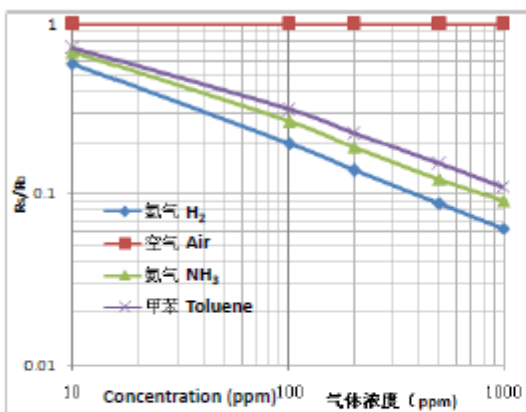
**Basic Circuit**



**Fig2. MQ135 Test Circuit**

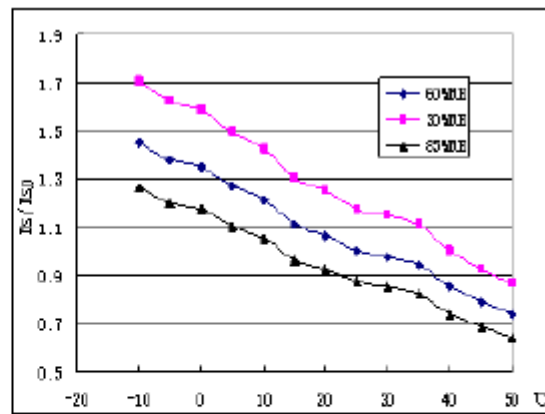
**Instructions:** The above fig is the basic test circuit of MQ135. The sensor requires two voltage inputs: heater voltage ( $V_H$ ) and circuit voltage ( $V_C$ ).  $V_H$  is used to supply standard working temperature to the sensor and it can adopt DC or AC power, while  $V_{RL}$  is the voltage of load resistance  $R_L$  which is in series with sensor.  $V_C$  supplies the detect voltage to load resistance  $R_L$  and it should adopt DC power.

**Description of Sensor Characters**



**Fig3. Typical Sensitivity Curve**

The ordinate is resistance ratio of the sensor ( $R_s/R_0$ ), the abscissa is concentration of gases.  $R_s$  means resistance in target gas with different concentration,  $R_0$  means resistance of sensor in clean air. All tests are finished under standard test conditions.



**Fig4. Typical temperature/humidity characteristics**

The ordinate is resistance ratio of the sensor ( $R_s/R_{s0}$ ).  $R_s$  means resistance of sensor in 400ppm  $H_2$  gas under different tem. and humidity.  $R_{s0}$  means resistance of the sensor in 400ppm  $H_2$  gas under 20°C/55%RH.

# DATASHEET SENSOR MQ-2

## MQ-2 Semiconductor Sensor for Combustible Gas

Sensitive material of MQ-2 gas sensor is SnO<sub>2</sub>, which with lower conductivity in clean air. When the target combustible gas exist, The sensor's conductivity is more higher along with the gas concentration rising. Please use simple electrocircuit, Convert change of conductivity to correspond output signal of gas concentration.

MQ-2 gas sensor has high sensitivity to LPG, Propane and Hydrogen, also could be used to Methane and other combustible steam, it is with low cost and suitable for different application.

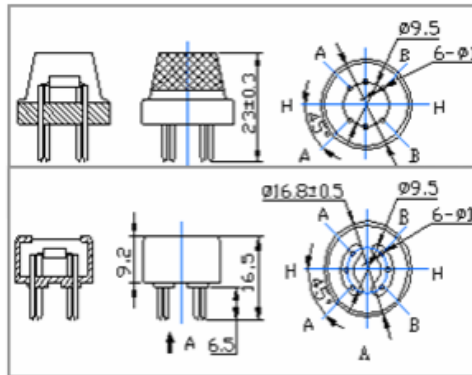
### Character

- \*Good sensitivity to Combustible gas in wide range
- \* High sensitivity to LPG, Propane and Hydrogen
- \* Long life and low cost
- \* Simple drive circuit

### Application

- \* Domestic gas leakage detector
- \* Industrial Combustible gas detector
- \* Portable gas detector

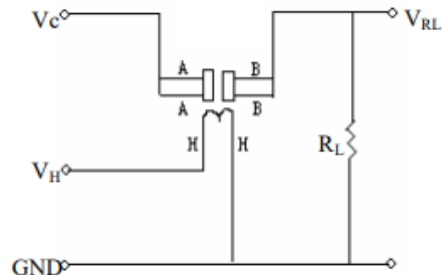
### Configuration



### Technical Data

### Basic test loop

Model No.		MQ-2	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite (Black Bakelite)	
Detection Gas		Combustible gas and smoke	
Concentration		300-10000ppm ( Combustible gas)	
Circuit	Loop Voltage	V <sub>c</sub>	≤24V DC
	Heater Voltage	V <sub>H</sub>	5.0V±0.2V AC or DC
	Load Resistance	R <sub>L</sub>	Adjustable
Character	Heater Resistance	R <sub>H</sub>	31Ω±3Ω ( Room Tem. )
	Heater consumption	P <sub>H</sub>	≤900mW
	Sensing Resistance	R <sub>s</sub>	2KΩ-20KΩ(in 2000ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )
	Sensitivity	S	R <sub>s</sub> (in air)/R <sub>s</sub> (1000ppm isobutane)≥5
	Slope	α	≤0.6(R <sub>5000ppm</sub> /R <sub>3000ppm</sub> CH <sub>4</sub> )
Condition	Tem. Humidity	20℃±2℃: 65%±5%RH	
	Standard test circuit	V <sub>c</sub> : 5.0V±0.1V; V <sub>H</sub> : 5.0V±0.1V	
	Preheat time	Over 48 hours	



The above is basic test circuit of the sensor. The sensor need to be put 2 voltage, heater voltage (V<sub>H</sub>) and test voltage (V<sub>C</sub>). V<sub>H</sub> used to supply certified working temperature to the sensor, while V<sub>C</sub> used to detect voltage (V<sub>RL</sub>) on load resistance (R<sub>L</sub>) whom is in series with sensor. The sensor has light polarity, V<sub>c</sub> need DC power. V<sub>C</sub> and V<sub>H</sub> could use same power circuit with precondition to assure performance of sensor. In order to make the sensor with better performance, suitable R<sub>L</sub> value is needed:  
Power of Sensitivity body(P<sub>s</sub>):  
$$P_s = V_c^2 \times R_s / (R_s + R_L)^2$$

Resistance of sensor( $R_s$ ):  $R_s=(V_c/V_{RL}-1)\times R_L$

**Sensitivity Characteristics**

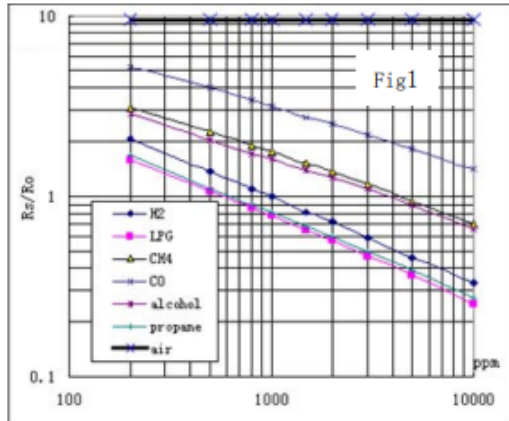


Fig.1 shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-2, ordinate means resistance ratio of the sensor ( $R_s/R_o$ ), abscissa is concentration of gases.  $R_s$  means resistance in different gases,  $R_o$  means resistance of sensor in 1000ppm Hydrogen. All test are under standard test conditions.

**Influence of Temperature/Humidity**

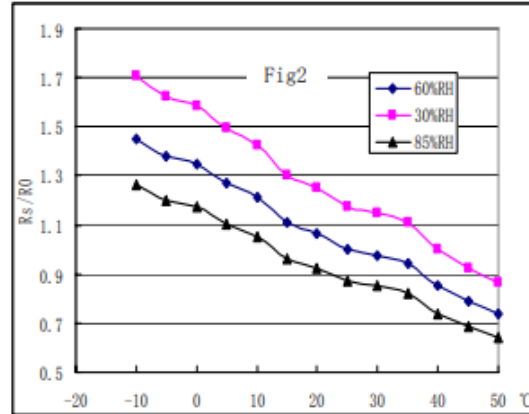
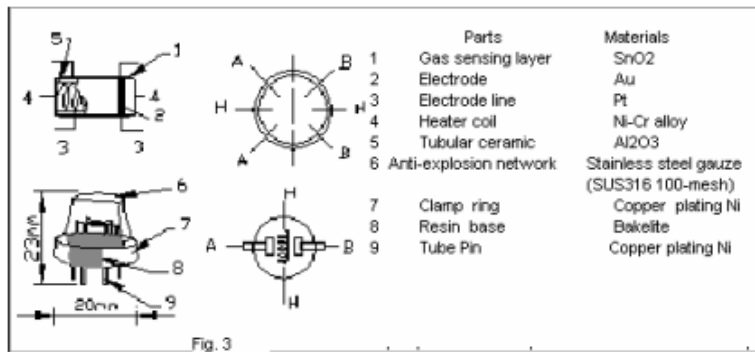


Fig.2 shows the typical temperature and humidity characteristics. Ordinate means resistance ratio of the sensor ( $R_s/R_o$ ),  $R_s$  means resistance of sensor in 1000ppm Butane under different tem. and humidity.  $R_o$  means resistance of the sensor in environment of 1000ppm Methane, 20°C/65%RH

**Structure and configuration**



Structure and configuration of MQ-2 gas sensor is shown as Fig. 3, sensor composed by micro AL2O3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-2 have 6 pin, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

## DATASHEET SENSOR GY906

Specifications	
<b>Power Supply</b>	5V
<b>Model</b>	GY-906
<b>Sensor</b>	MLX90614
<b>Operating Temperature</b>	40°C–125°C
<b>Temperature Sensing Range</b>	70°C–380°C
<b>Measurement Resolution (PWM Output)</b>	0.14°C
<b>Measurement Resolution (TWI Output)</b>	0.02°C
<b>Colour</b>	Blue
<b>Material</b>	Immersion Gold PCB
<b>Weight</b>	3g



### **ARD 2** **Arduino Compatibles** Controllers, Shields, Modules & Sensors

#### **Non-Contact Infrared Temperature Sensor GY-906**

ARD2-2190

- Detect temperatures between 70°C–380°C without contact using infrared light
- Perfect for use with Arduino, Raspberry Pi and other microcontrollers
- Internal 17-bit ADC
- PWM and TWI outputs
- Resolution down to 0.02°C (TWI output)

#### **Description**

A non-contact IR (infra-red) temperature sensor, capable of sensing between 70°C–380°C down to a resolution of 0.02°C. This module is based on the MELEXIS MLX90614ESF-BAA-000-TU-ND temperature sensor.

Possible applications include: temperature sensing for residential, commercial and industrial air conditioning; windshield defogging; home appliances with temperature control; livestock monitoring; and automotive blind angle detection.

Includes unsoldered 4-pin header.



### **Pinout (except Arduino MEGA)**

<b>Module</b>	<b>Arduino</b>	<b>Function</b>
VIN	5V	Power Supply
GND	GND	Ground Connection
SCL	A5	Clock
SDA	A4	Data

### **Pinout (Arduino MEGA)**

<b>Module</b>	<b>Arduino</b>	<b>Function</b>
VIN	5V	Power Supply
GND	GND	Ground Connection
SCL	D21	Clock
SDA	D20	Data