

GRADO EN INGENIERÍA EN TEGNOLOGÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de los parámetros principales de la tecnología LoRa para el despliegue de redes e implementación de servicios IoT en la CAV-EAE

Alumno/Alumna: Sáenz Esteban, Rubén

Director/Directora: Vélez Elordi, Manuel M^a

Curso: 2017-2018

Resumen Trilingüe

Resumen

El término Internet of Things está llamado a ser una auténtica revolución en el mundo de las telecomunicaciones. Gracias al despliegue masivo de sensores de diversa índole se pueden obtener datos de cualquier tipo de parámetro cuantificable. Esa información que proporcionan los sensores debe ser enviada hacia un punto receptor para posteriormente ser tratada por la aplicación que necesitan hacer uso de esos datos.

Para ello es necesario conocer el tipo de tecnología de transmisión que tienen implementado los sensores. A una vez conocida la configuración necesaria para cada sensor este procedimiento debe ser un proceso generalizado ya que resultaría inviable realizar este proceso uno a uno. Este estudio ha concluido cuales son los parámetros principales de la tecnología LoRa y como afectan a la red. Este estudio se ha realizado tanto de forma teórica como a partir del comportamiento de los módulos RN 2483. Observando la importancia de una correcta configuración general de la red para poder ofrecer un servicio de redes IoT.

Palabras Clave: *Internet of Things, Spread Factor, LoRa, Alcance*

Laburpena

Gauzen Internet terminoa deritzogu telekomunikazioen munduko benetako iraultza izateko bidean dagoen prozedurari. Hainbat motatako sentsoreen hedapen masiboari esker parametro kuantifikagarrien edozein datu lor dezakegu. Sentsoreek emandako informazio hori jasotzeko puntura bidaliko da, datuak edozein motatako aplikazioetan erabil daitezzen zerbikaria batean gorde behar dira, horregatik informazioa uhinen bidez jasotzeko garrantzi handiko prozesua da.

Horretarako, sentsoreek daukaten transmisio-teknologia mota jakin behar da. Beharrezkoa den konfigurazioa ezagutu ondoren, prozedura hau prozesu orokorra izan behar da, prozesu hau sentsoreei banan-banan egitea ezinezkoa izango litzatekelako. Lan honek ondorioztatu du LoRa teknologiaren parametro nagusiak zeintzuk diren eta sarean nola eragiten duten. Azterketa hau RN 2483 moduluen eragiketa teorikoki eta laborategian egin da. Sareko konfigurazio orokorraren garrantzia behatuz IoT sare zerbitzu bat eskaini ahal izateko.

Gakodun-Hitzak: *Internet of Things, Spread Factor, LoRa, Alcance*

Abstract

The Internet of Things is a term that will suppose a revolution in the world of telecommunications. Thanks to the massive deployment of every kind of sensors for many different purposes, it is possible to obtain any quantifiable parameter. That information must be send to a receiving point to be transfer to a server in order to be used by an application who needs that data.

For this reason, it is necessary the knowledge of the technology that sensors are using. When the needed configuration is known it is impossible to apply this set up for each sensor individually, this must be a general process. This report has concluded which are the most important parameters and factors of the LoRa technology and how they affect to the functioning of the network. This study has obtained this conclusion theoretically and with laboratory tests for the commercial RN 2483 devices. Observing the importance of a correct general configuration of the network in order to offer an IoT network service.

Key words: *Internet of Things, Spread Factor, LoRa, Alcance*

Índice

1	Introducción.....	11
2	Contexto	12
3	Objetivos y Alcance.....	13
3.1	Objetivos	13
3.2	Alcance	13
4	Beneficios	14
4.1	Beneficios Técnicos.....	14
4.2	Beneficios Económicos	14
4.3	Beneficios Sociales.....	14
5	Estado del Arte	15
5.1	LoRaWAN.....	15
5.2	LoRa.....	18
6	Análisis de Riesgos	20
6.1	Riesgos	20
6.2	Plan de Contingencias.....	21
7	Solución Propuesta	23
8	Planificación.....	25
8.1	Fases del trabajo	25
8.2	Diagrama de Gantt.....	27
9	Estudio Realizado.....	28
9.1	Cálculos Teóricos	28
9.2	Valores Prácticos.....	42
9.3	Simulación Radio Mobile.....	51
9.4	Mapas de Cobertura.....	55
9.5	Análisis de los resultados.....	60
10	Presupuesto	67
10.1	Desglose	67
10.2	Resumen.....	68

11	Consideraciones finales	69
12	Bibliografía	70
13	Anexos	71
13.1	Anexo I: Kit LoRa.....	71
13.2	Anexo II: Configuración kit LoRa	74
13.3	Anexo III: Validación de Equipos.....	84
13.4	Anexo IV: Red Radio Mobile	90
13.5	Anexo V: Mapas de Cobertura.....	105

Índice de Imágenes

Ilustración 1- Evolución del número de sensores	12
Ilustración 2 - Esquema de una red LoRa	15
Ilustración 3 - Señal Portadora de CSS	19
Ilustración 4- Diferencia de SF y Trama LoRa	19
Ilustración 5 - Diagrama de Gantt	27
Ilustración 6 - Estructura de una trama LoRa	29
Ilustración 7 - Tiempos para el caso critico	32
Ilustración 8 - Comparativa temporal entre estructuras de tramas	32
Ilustración 9 - Comparativa en número de tramas entre estructuras de tramas	33
Ilustración 10 - Comparativa entre alcance y SF en función del entorno	38
Ilustración 11 - Alcance en entorno urbano a máxima potencia	39
Ilustración 12 - Alcance en entorno sub-urbano a mínima potencia	39
Ilustración 13 - Comparativa de alcance en las mismas condiciones según potencia	40
Ilustración 14 - Resumen de características	41
Ilustración 15- Arquitectura de red 1	42
Ilustración 16- Arquitectura de Red 2	43
Ilustración 17 - Arquitectura de Red 3	43
Ilustración 18 - Montaje Real	44
Ilustración 19- Señal de RF LoRa	45
Ilustración 20 - Recepción con atenuadores a odB	46
Ilustración 21 - Recepción con sistema completo	47
Ilustración 22 - Antena y señal de referencia	48
Ilustración 23 - Recepción con atenuación variable	49
Ilustración 24 - Orografía de la red	51
Ilustración 25 - Red a simular	52
Ilustración 26 - Obtención de la altura de las antenas	54
Ilustración 27 - Mapa de Cobertura Teórico: Máxima Potencia	56
Ilustración 28 - Mapa de Cobertura Teórico: Mínima Potencia	57
Ilustración 29 - Mapa Cobertura Practico: Máxima Potencia	58
Ilustración 30 - Mapa Cobertura Practico: Mínima Potencia	59
Ilustración 31 - Comparativa entre potencias	60
Ilustración 32 - Enlace entre RN Ganeta 2 y receptor Ganeta	61

Ilustración 33 - Recepción según posicionamiento a mínima potencia	61
Ilustración 34 - Enlace RN Ganeta2 a receptor Ganeta a máxima potencia	62
Ilustración 35 - Recepción según posicionamiento a máxima potencia	62
Ilustración 36 - Comparativa de alcance teórico y práctico a máxima potencia	63
Ilustración 37 - Comparativa de alcance teórico y práctico a mínima potencia	64
Ilustración 38 - Comparativa de atenuaciones	65
Ilustración 39 - Comparativa de sensibilidades	65
Ilustración 40 - Comportamiento de la trama de información	66
Ilustración 41 - Numero de Tramas sobre SF y CR	66
Ilustración 42 - Modulo LoRa	71
Ilustración 43 - Gateway Utilizado	72
Ilustración 44 - Ventana del programa	72
Ilustración 45 - Direccionamiento IP	75
Ilustración 46 - Re-envío de puertos	75
Ilustración 47- Servidor inicializado	76
Ilustración 48 - Ping del gateway	76
Ilustración 49 - Imagen del servidor cargada	77
Ilustración 50 - Dispositivos conectados a la red	77
Ilustración 51 - Servidor un insertado en la red	77
Ilustración 52 - Reinicio del servidor	78
Ilustración 53 - Servidor listo para la recepción de datos	78
Ilustración 54 - Dirección IP del servidor	79
Ilustración 55 - Gateways insertados en la red	79
Ilustración 56 - Módulos LoRa insertados en la red	80
Ilustración 57 - Configuración de los parámetros de acceso	80
Ilustración 58 - Habilitación del canal de comunicación	81
Ilustración 59 - Envío de mensaje tipo ASCII	81
Ilustración 60- Datos recibidos	82
Ilustración 61 - Desconexión del servidor	82
Ilustración 62- Datos correspondientes al modulo	83
Ilustración 63 - Dispositivos registrados en la BD	83
Ilustración 64- Credenciales de acceso	83
Ilustración 65 - Configuración de red propuesta en el kit	84
Ilustración 66 - Envío de mensaje con SF 12	85

Ilustración 67 - Estadístico del gateway	86
Ilustración 68 - Recepción datos prueba 1	86
Ilustración 69 - Recepción datos prueba 2	87
Ilustración 70 - Recepción de datos prueba 3	88
Ilustración 71 - Recepción de datos prueba 4	89
Ilustración 72 - Carga de mapas	90
Ilustración 73 - Propiedades de la red	91
Ilustración 74 - Topología de red	92
Ilustración 75 - Miembros de la red	93
Ilustración 76 - Modulo a máxima potencia teórico	94
Ilustración 77 - Modulo a máxima potencia practico	94
Ilustración 78 - Modulo a mínima potencia teórico	95
Ilustración 79 - Modulo a mínima potencia practico	95
Ilustración 80 - Gateway a máxima potencia Teórico	96
Ilustración 81 - Gateway mínima potencia teórico	97
Ilustración 82 - Propiedades de las unidades	98
Ilustración 83 - Inserción de coordenadas	98
Ilustración 84 - Configuración cobertura Teórica	99
Ilustración 85 - Rango de colores teórico	100
Ilustración 86 – Enlace 1 teórico a máxima potencia	101
Ilustración 87 - Enlace 2 teórico a máxima potencia	102
Ilustración 88 - Mapa resultante a máxima potencia	102
Ilustración 89 – Enlace 1 teórico a máxima potencia	103
Ilustración 90 - Enlace 2 teórico a mínima potencia	104
Ilustración 91 - Mapa de cobertura resultante	104

Índice de Tablas

Tabla 1- Análisis de Riesgos	21
Tabla 2- Especificaciones de LoRa	28
Tabla 3 - Canales con mayor especificación	29
Tabla 4- SNR según SF	34
Tabla 5 - Sensibilidad teórica según SF	34
Tabla 6- Atenuación soportada según SF	35
Tabla 7 - Alcance según SF a 868.1MHz en entorno urbano	36
Tabla 8 - Alcance según SF a 868.3MHz en entorno urbano.....	36
Tabla 9 - Alcance según SF a 868.5MHz en entorno urbano.....	36
Tabla 10 - Alcance según SF a 868.1 MHz en entorno sub-urbano	37
Tabla 11 - Alcance según SF a 868.3MHZ en entorno sub-urbano.....	37
Tabla 12 - Alcance según SF a 868.5MHz en entorno sub-urbano	38
Tabla 13 - Atenuación soportada medida en laboratorio.....	50
Tabla 14 - Sensibilidad practica según SF	50
Tabla 15 - Coordenadas del emplazamiento de los receptores	53
Tabla 16 - Rango de colores para cada SF	55
Tabla 17 - Presupuesto: Horas Internas.....	67
Tabla 18 - Presupuesto: Amortizaciones.....	67
Tabla 19 - Presupuesto: Gastos Generales	68
Tabla 20 - Presupuesto: Resumen	68

Acrónimos

IoT – Internet of Things

LPWA – Low Power Wide Area

CNAF – Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

CAV/EAE - Comunidad Autónoma Vasca / Euskal Autonomia Erkidegoa

LoRa – Long Range

LoRaWAN – LoRa Wide Area Network

UDP – User Datagram Protocol

TCP/IP – Transport Control Protocol / Internet Protocol

SF – Spread Factor

ISM - Industrial, Scientific and Medical

ABP - Activation by Personazation

OTAA - Over The Air Activation

CSS – Chrip Spread Spectrum

CRC – Cyclic Redundancy Check

MAC – Media Access Control

CR – Code Rate

Memoria

La memoria de este trabajo está dividida en varios apartados. Como punto inicial se ha colocado el interés que presenta este proyecto en el contexto adecuado y las razones por la que es de utilidad. Junto a lo anterior se han analizado las posibles incidencias que pueden suceder durante la ejecución del mismo. Como conclusión se han descrito los dispositivos y programas utilizados para la elaboración del trabajo, así como la solución propuesta.

1 INTRODUCCIÓN

Este documento expone un trabajo fin de grado. En él sea realizado un estudio sobre la tecnología LoRa para un posible despliegue de red bajo esta tecnología en el futuro.

En primer lugar, se ha realizado una labor de documentación acerca de la tecnología LoRa, con el fin de obtener los conocimientos técnicos y teóricos necesarios para poder realizar el trabajo con la mayor eficacia.

Una vez conocido el entorno en que se mueve la tecnología, se ha realizado una serie de estudios teóricos que han permitido obtener las variaciones del comportamiento de la red tanto en términos de cantidad de datos a enviar como de las características más propias del radio enlace necesarias para un funcionamiento óptimo.

Con los valores teóricos obtenidos se ha procedido a realizar una serie de pruebas de laboratorio gracias al kit de desarrollo LoRa del que se dispone. En dichas pruebas se ha analizado la capacidad que tienen los dispositivos en comunicarse, tanto receptor como transmisor, en función de la atenuación que presente el canal.

A partir de los parámetros obtenidos en los cálculos y medidas se han realizado una serie de simulaciones con el fin último de conocer el comportamiento de la red en un entorno concreto. Comparando a su vez las diferencias entre los valores teóricos y prácticos, extrayendo los parámetros de configuración más importantes, así como la necesidad de una correcta planificación de red que permita la recepción de información

2 CONTEXTO

Las tecnologías LPWA nacen con el propósito de ser las tecnologías que se utilicen para el despliegue de las redes de sensores y dispositivos. Cada una de ellas enfocada a un tipo de uso determinado, permitiendo así la recepción de cualquier tipo de dato. El IoT tiene como gran ventaja el poder de enviar y almacenar cualquier tipo de información proveniente de cualquier lugar y propósito dando lugar al Big Data. Como se muestra en la imagen inferior el número de dispositivos conectados está aumentando de forma exponencial, añadiendo nuevas funcionalidades y servicios al término global de IoT y Big Data.

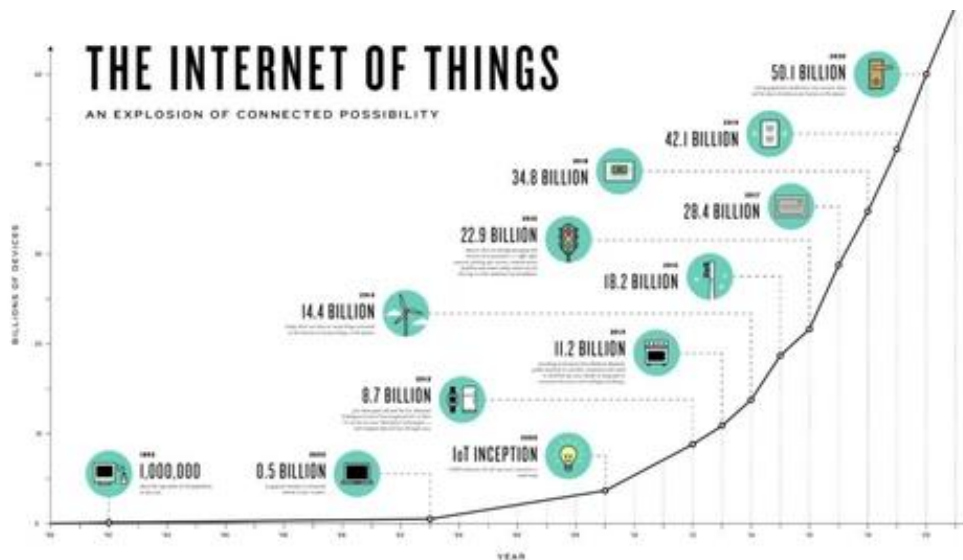


Ilustración 1- Evolución del número de sensores

Con la adopción de esta solución surgen nuevos problemas al tener un número masivo de dispositivos conectados a una misma red y en la gran mayoría de los casos utilizando el mismo canal de transmisión, el espectro radio-eléctrico.

Existen multitud de factores que pueden imposibilitar el correcto funcionamiento de la red de obtención de datos. Unos ejemplos que pueden ocurrir si se realiza una mala planificación, dimensionamiento y diseño son:

- Una disminución de la potencia de transmisión del sensor puede hacer no sea posible la recepción de la información al haber tenido en cuenta las situaciones críticas de funcionamiento de los dispositivos
- Además, puede ocurrir el caso contrario el uso de una modulación que permita una gran inmunidad conlleva una bajada de la tasa binaria y un aumento de la energía necesaria disminuyendo así la vida útil.

Es por lo que se hace necesario un estudio previo de las características de los dispositivos que conformarán la futura red y las diferentes configuraciones posibles que podrán ser utilizadas para un correcto funcionamiento de la misma. Se debe de conocer que, aparte de las limitaciones técnicas, estos dispositivos de envío están sujetos a una serie de limitaciones legales.

Las limitaciones técnicas residen en la potencia de transmisión, el ancho de banda, el número de mensajes a enviar al día, la robustez frente al ruido, etc. En cuanto a las limitaciones legales se debe tener en cuenta el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [1] que limita las bandas de uso del espectro, así como el tipo de servicio que puede hacer uso que se le puede dar a cada banda o el tiempo de uso.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

Los objetivos y el alcance de este trabajo se han descrito en las líneas inferiores.

3.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es realizar una planificación de la configuración mínima que deben presentar los módulos LoRa presentes en los dispositivos finales de una red IoT que se pretendan desplegar en un emplazamiento concreto de la CAV.

En conjunto con un estudio de la importancia de una correcta elección de los parámetros necesarios se han realizado una serie de simulaciones tomando como puntos de recepción los centros de radiodifusión de Itelazpi, cada uno de ellos con unas características concretas que los hacen de interés para este estudio. El objetivo último de las simulaciones es conocer la cobertura existe desde estos puntos.

3.2 ALCANCE

El alcance de este trabajo es conocer cómo afectan al rendimiento de una red de sensores los parámetros más significativos dentro las posibles configuraciones existentes para futuros despliegues de una red LoRa.

El trabajo además ha permitido verificar la validez de los módulos RN 2483[2] para ofrecer este tipo de servicio mediante pruebas en una red IoT básica compuesta por: Sensor, Gateway y servidor. También se han realizado una serie de plantillas de cálculo que permiten conocer las limitaciones de envío de información que se tienen en función de la cantidad de datos que se quieran enviar de cada sensor.

4 BENEFICIOS

Los beneficios que aporta la realización de este proyecto se han clasificado de 3 formas distintas. Esta clasificación es técnica, económica y social.

4.1 BENEFICIOS TÉCNICOS

Este proyecto estudia el protocolo LoRaWAN en general y el análisis de cobertura de dispositivos bajo tecnología LoRa en el territorio de la CAV-EAE en particular. Bajo criterios técnicos este trabajo ofrece un estudio y análisis de dispositivos concretos y reales. El estudio de como los parámetros más significativos afectan al alcance y rendimiento de los dispositivos finales puede servir como base para una correcta planificación de la red de sensores según las necesidades concretas a las que ese pretenda dar servicio.

También es destacable la configuración y diseño de una red dentro del programa de simulación Radio Mobile que permite obtener a partir de las características de los dispositivos receptores y transmisores un mapa de cobertura mostrando la configuración necesaria que garantice la recepción de datos durante toda la vida útil de los dispositivos finales.

Adicionalmente este trabajo puede servir de ayuda para posteriores despliegues de redes de sensores que utilicen la tecnología LoRa

4.2 BENEFICIOS ECONÓMICOS

En términos económicos el beneficio en este proyecto se obtiene en la diversificación de los servicios ofrecidos por parte de un operador de redes de telecomunicación. Además, gran parte de la red troncal puede ser utilizada para la implementación completa de una red IoT. El uso de bandas ISM disminuye considerablemente el coste de implementación al no ser necesario una licencia de uso. Por último, características del protocolo LoRaWAN como ser un estándar abierto permiten a cualquier entidad desplegar su propia red.

4.3 BENEFICIOS SOCIALES

Gracias a las redes IoT se obtienen una serie de beneficios sociales. La captación masiva de datos permite tener una capacidad de análisis mayor. Esto hace posible un mayor conocimiento del entorno. A mayor conocimiento de las causas que provocan cualquier suceso, la acción llevada a cabo para subsanarlo o impedirlo a es más ágil, rápida y eficiente mejorando directa o indirectamente el día a día de la sociedad en su conjunto.

5 ESTADO DEL ARTE

5.1 LORAWAN

Este es el término usado por la alianza para referirse a los diferentes protocolos [3] y técnicas de las que se hace uso en lo que se podría llamar como la capa de enlace de este estándar de LPWA [4]. En él se define la arquitectura de red que se debe de seguir para poder proveer un servicio de IoT usando este estándar, los tipos de dispositivo que se pueden utilizar como módulos, los tipos de acceso que se pueden utilizar, la seguridad que se implementa y las funciones que debe de realizar cada elemento de la red.

5.1.1 Arquitectura de Red

La red debe de estar estructurada con una topología en estrella. La razón principal es debido a que los dispositivos finales o módulos tienen una comunicación P2P con los Gateways o pasarelas. Todas ellas se comunican con el servidor que almacena los datos obtenidos por los módulos. Diversas aplicaciones pueden hacer uso de la información alojada en los servidores.

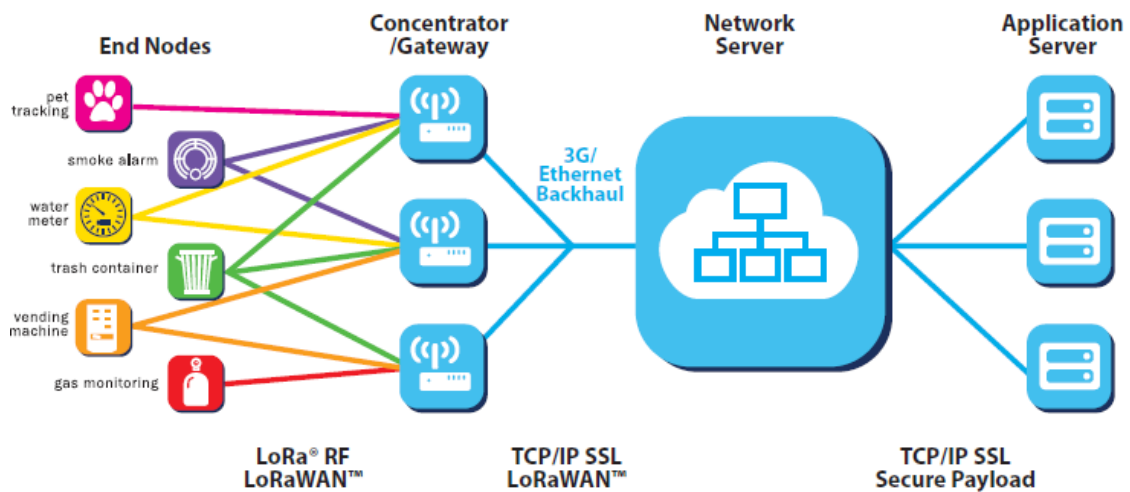


Ilustración 2 - Esquema de una red LoRa

La imagen superior muestra que la información enviada desde un módulo puede ser captada por más de una pasarela. Estas envían la información recibida al servidor por el medio que tengan asignado, ya sea vía clave o por redes móviles. El servidor es el encargado de verificar que la información no este repetida y almacenar solo una vez ese dato. Una vez que el dato está correctamente almacenado en el servidor, este envía un ACK a la pasarela por donde ha recibido el dato que ha almacenado para que lo trasmita al módulo para conformar la correcta recepción de la información que había enviado previamente. En el momento en el que la aplicación del servidor necesite cierta información este le proporcionara la información necesaria.

Esta arquitectura de red se establece de esta forma para alcanzar los siguientes objetivos:

- Los dispositivos finales no necesitan ni comunicación ni sincronización entre ellos
- La optimización en el consumo de batería
- Concentrar la complejidad del sistema en pocos dispositivos físico

Como se observa en la arquitectura existen cuatro tipos de dispositivos en los que cada uno tiene sus propias funciones.

5.1.1.1 Sensores/Modulo

También conocidos como dispositivos finales o módulos, son los encargados de enviar la información que se encargan de detectar los sensores que tiene integrados, existen infinidad de sensores: Luminosidad, temperatura, humo, etc. El envío de la información puede ser periódica, en el momento que se produce una variación en el entorno o por petición del servidor. Dependiendo del tipo de información que necesitemos y de la cantidad de la misma se necesitara dispositivos finales de diferentes clases.

5.1.1.2 Gateway/Pasarela

Estos dispositivos tienen como función realizar un trasvase entre dos redes de diferente arquitectura, como sea explicado en líneas superiores la pasarela se puede comunicar con el servidor por diversas técnicas mientras que la comunicación con los módulos es únicamente siguiendo el estándar de la alianza LoRa. La configuración más extendida es en la que la pasarela realiza la conversión de LoRa al protocolo de transporte UDP de la arquitectura TCP/IP en sentido ascendente y la conversión inversa en sentido descendente.

5.1.1.3 Servidor

La función principal es la recibir la información procedente de las pasarelas y filtrarla de forma adecuada para después almacenarla en una base de datos con la cual se dará servicio en y la información requerida por la aplicación final

5.1.1.4 Aplicación

Es el elemento final de la red y es quien provee los servicios al usuario final o a la máquina que actuará en función de los datos obtenidos desde el servidor-

5.1.2 Acceso a la red LoRa

Para que un módulo pueda formar parte de la red LoRa y sea capaz de enviar mensaje hasta el servidor. Existen 2 técnicas que regulan el acceso:

- Activation by Personalization (ABP): Este mecanismo de acceso existen tres identificadores, la clave de sesión de red (*Network Session Key*), la clave de sesión de aplicación (*Application Session Key*), y el tercero es la dirección del nodo (*DevAddr*) que desea acceder a la red. Estos tres identificadores son conocidos tanto por el servidor como por el modulo, esta situación permite que el acceso a la red por parte del módulo sea instantáneo, así como la transmisión de paquetes.
- Over The Air Activation (OTAA), a diferencia del proceso anterior el modulo y el servidor tiene que negociar una serie de claves para poder acceder a la red. El modulo informa al servidor sobre dos identificadores; Dispositivo y aplicación. Además, envía la clave de la aplicación a la que pretende dar servicio. Tras recibir y procesar esta información el servidor envía al módulo que desea acceder la *Network Session Key* y *Application Session Key* necesarias. En este caso el intercambio de información no se produce hasta este proceso se haya realizado por completo.

5.1.2.1 Seguridad

Al utilizar un canal de transmisión compartido como es el espectro radioeléctrico es necesario que la señal que es enviada por dicho interfaz tenga una cierta seguridad, en LoRa se implementan varias capas de cifrado valiéndose del algoritmo de cifrado AES128 que se aplica en las siguientes comunicaciones:

- Device Address (*DevAddr*), es la dirección de 32 bits del dispositivo y puede ser leído por cualquiera de los elementos que conforman la red. Su única función es la de diferenciar unos equipos de otros.
- Network Session Key (*NwkSKey*), es un identificador de 128 bits único para cada dispositivo final, su función es cifrar las comunicaciones entre el modulo y el servidor en al que se envía la información. Se utiliza en cualquiera de los mecanismos de acceso vistos.
- Application Session Key (*AppSKey*), tiene la misma funcionalidad que el anterior solo que está destinado a proteger las comunicaciones entre los dispositivos finales y la aplicación que hará uso de esos datos.
- Application Key, solo se aplica para los accesos vía OTAA y realiza una función similar que la *AppSKey*.

5.1.3 Clases de Dispositivos

Dentro de los dispositivos finales que pueden formar la red, no todos van a tomar en consideración los mismos parámetros ni tampoco van a ofrecer el mismo servicio. En aras de optimizar la variedad de aplicaciones que se pueden ofrecer, LoRaWAN utiliza tres clases de dispositivos. Diferenciados en función de su latencia de comunicación y durabilidad de la batería, aunque todos comparten una comunicación bidireccional:

- **Clase A**, estos dispositivos una vez que realizan una transmisión en el canal de subida abren dos ventanas para la escucha del canal de bajada por un corto periodo de tiempo.
- **Clase B**, se le añaden funcionalidades en el momento en el que el dispositivo envía información por el canal de subida, como la sincronización con los concentradores, lo que permite a los servidores de red saber cuándo el dispositivo espera una respuesta por parte de ellos.
- **Clase C**, A diferencia de las dos clases anteriores esta clase tiene la ventana para la recepción de información desde el canal de baja siempre abierto, que únicamente se cierra cuando el dispositivo tiene información para mandar al concentrador.

5.2 LORA

El término LoRa es el nombre que se le asigna a la capa física que se utiliza en el estándar de LPWA que ha propuesto LoRa Alliance. Está desarrollado por la empresa Semtech, proporcionando las características de modulación, así como las especificaciones que se deben de cumplir para poder realizar una emisión en función de la región en la que nos encontremos. Por ejemplo, en el entorno europeo la transmisión se realiza en la banda ISM de 868MHz.

5.2.1 Modulación

LoRa utiliza la técnica de modulación CSS, Chirp Spread Spectrum, este tipo de modulación utiliza como portadora una señal sinusoidal que aumenta su frecuencia a medida que pasa el tiempo. Es una modulación sencilla haciendo posible que las tramas a enviar sean robustas al ruido y puedan alcanzarse grandes distancias de recepción.

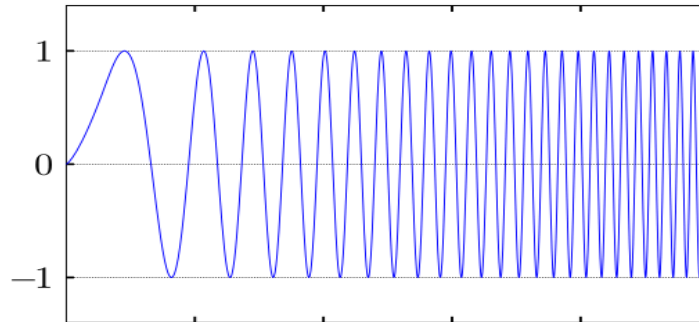


Ilustración 3 - Señal Portadora de CSS

Un parámetro importante que afecta a la modulación es el Spread Factor, con él se configura la duración de cada símbolo y el “ensanchamiento” que se le otorga. Siendo de mayor inmunidad el SF de mayor valor. por el contrario, este posee una tasa binaria menor al poder ser enviados con un SF menos más símbolos en el mismo periodo. [5]

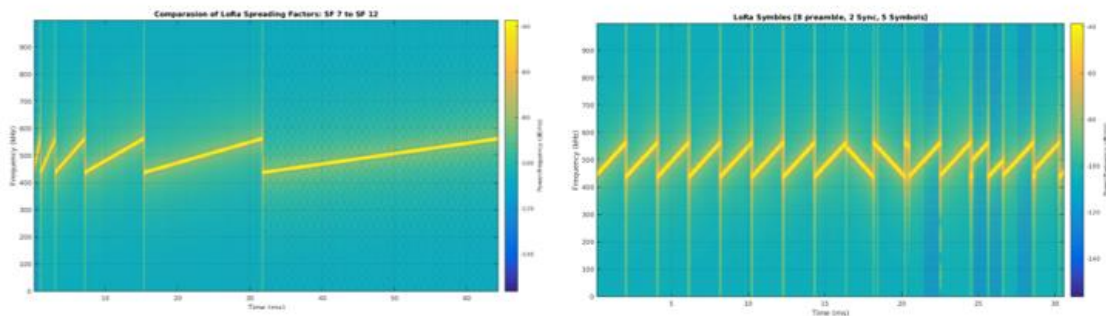


Ilustración 4- Diferencia de SF y Trama LoRa

En la imagen superior se observa la comparativa de los diferentes SF utilizados para un mismo símbolo. Se aprecia que el ancho de banda para todos ellos es el mismo 125kHz. También se obtiene de forma clara la diferencia entre un tipo de SF u otro en la duración final de los símbolos. En la segunda imagen se observa una trama LoRa en la que se diferencian claramente el preámbulo, los símbolos de sincronización y los datos.

6 ANÁLISIS DE RIESGOS

Este apartado analiza los posibles riesgos que pueden llegar a ocurrir durante la ejecución del proyecto. A todos ellos se les ha asignado una probabilidad de impacto (0.25, 0.5, 0.75, 1) y una probabilidad de aparición con el mismo rango. El producto de dichos valores se ha ubicado en su correspondiente posición en la matriz.

6.1 RIESGOS

Los posibles riesgos que pueden ocurrir a lo largo del proyecto se han identificado de la siguiente forma:

- **1-Selección de un modelo de propagación incorrecto:** La elección de un modelo de propagación no adecuado a las características del entorno o frecuencia no permitiría obtener que parámetros de configuración son los de mayor relevancia en las redes LoRa.
 - Impacto:0.5
 - Probabilidad de aparición:0.75
- **2-Retraso en la configuración del kit:** Un mal conocimiento de los dispositivos, así como su errónea configuración que permita la realización del trabajo podría suponer la no realización del proyecto a tiempo. Esta situación supondría el peor escenario posible.
 - Impacto: 1
 - Probabilidad de aparición: 1
- **3-Mala implementación del cálculo de tramas LoRa:** En el momento que se programase de forma errónea la plantilla de cálculo de la limitación de envío existente para cada configuración posible supondría un retraso en la obtención de conclusiones de interés.
 - Impacto:0.25
 - Probabilidad de aparición:0,5
- **4-Error en las simulaciones con Radio Mobile:** Una obtención de resultados mediante la utilización de datos de partida falsos no solo daría con simulaciones lejanas a la realidad si no que supondrá la revisión de todos los parámetros y la repetición de todas las simulaciones realizadas.
 - Impacto:0.5
 - Probabilidad de aparición:0.5

Tras la evaluación de los posibles riesgos que pueden llegar a suceder, estos se muestran se forma conjunta en la siguiente matriz de probabilidad impacto. Siendo el eje vertical la probabilidad de aparición en orden ascendente y el horizontal el correspondiente al impacto siguiendo el mismo orden.

	3		
	4		
		1	
			2

Tabla 1- Análisis de Riesgos

6.2 PLAN DE CONTINGENCIAS

Una vez detectados los posibles riesgos que pueden suceder a lo largo del proyecto y su posición en la matriz de probabilidad/impacto se ha decidido llevar a cabo una serie de medidas con el fin de evitar en el mejor de los casos o por lo menos minimizar el impacto de cualquiera de las incidencias en la elaboración del trabajo.

Las posibles medidas a llevar a cabo para posibles incidencias

- **Selección de un modelo de propagación incorrecto:** Estudio previo de los diferentes modelos de propagación existentes y aplicar el que más se adecuó a las especificaciones del protocolo LoRaWAN. Con este procedimiento se evita obtener datos erróneos al utilizar un modelo inadecuado.
- **Retraso en la configuración del kit:** La única posibilidad existente para obtener una correcta configuración del kit que permita realizar mediciones de forma ágil es el conocimiento exhaustivo del manual de funcionamiento y reservar tiempo para la realización del método prueba-error hasta obtener resultados satisfactorios.
- **Mala implementación del cálculo de tramas LoRa:** Utilización del SW *LoRa Calculator Tool* que permite comprobar que los datos obtenidos a partir de las expresiones matemáticas utilizadas en la plantilla de cálculo corresponden con lo esperado en el estándar. En caso de error se puede averiguar fácilmente donde se encuentra el fallo y subsanarlo rápidamente.

- **Error en las simulaciones con Radio Mobile:** Estudio previo del modo de funcionamiento del entorno de simulación, así como de los parámetros necesarios para una correcta simulación. Es recomendable además realizar simulaciones de prueba y comprobar que los datos obtenidos se asemejan a los esperados antes de realizar todas las simulaciones necesarias. En caso de obtener simulaciones erróneas la única solución es volver a repetir las lo más rápido posible.

7 SOLUCIÓN PROPUESTA

Para la obtención de los objetivos plasmados en este proyecto se ha dividido el trabajo a realizar en cuatro puntos fundamentales.

- **1.Cálculos Teóricos:** En este apartado se han realizado una serie de cálculos en función de los criterios establecidos en el estándar LoRaWAN o especificaciones técnicas de la región en la que nos encontramos. Además, se ha calculado el alcance de los dispositivos LoRa a partir de las especificaciones del fabricante para diferentes entornos y configuraciones, más detalle en el punto 9.1
- **2.Estudio Prácticos:** Tras la obtención de los valores teóricos, se ha utilizado el kit LoRa R *Technology Evaluation Kit – 800*, anexo 1
 - . Dicho kit ha sido configurado, anexo2, para la recepción de datos proporcionados por los sensores en el servidor y poder ser visualizados en la aplicación de usuario.
 - Se ha verificado que el funcionamiento de los diferentes dispositivos se corresponde con lo visto en la teoría, anexo3.
 - Montaje de una red en laboratorio y medición de la atenuación soportado y así obtener la sensibilidad de los equipos, punto 9.2
- **3.Simulaciones en Radio Mobile:** Con el fin de obtener el comportamiento de los equipos en un entorno real se han realizado un aserie de simulación con el software Radio Mobile en el punto 9.3, con una configuración de red expuesta en el anexo 4.
- **4.Mapas de Cobertura:** Una vez obtenido un resultado global de la red se ha realizado la simulación concreta para los cuatro puntos receptores en las situaciones más dispares, recepción a máxima y mínima potencia, anexo 5.

Metodología

En este apartado se describen como se han llevado a cabo los pasos seguidos para elaborar este documento que expone un trabajo fin de grado.

Como punto de partida se han realizado una serie de cálculos teóricos a partir de las expresiones matemáticas aportadas por los fabricantes y junto con las características técnicas definidas en el estándar. Con ellos se han obtenido una serie de parámetros clave para el dimensionamiento, despliegue y diseño de una red de IoT bajo esta tecnología. También se ha realizado un estudio del tipo de propagación que presentan estas redes, una vez obtenido el adecuado se han utilizado las expresiones matemáticas del mismo para calcular el alcance máximo para variedad de configuración de red y diversidad de entornos en la que puede estar presente.

Como para la realización de este trabajo se dispone de un kit de desarrollo para poder estudiar de forma correcta las posibilidades que ofrece la tecnología LoRa. En primer lugar, se elabora un procedimiento que permite realizar de forma sencilla y la correcta configuración de una estructura de red básica, formada por: Módulo, Pasarela y Servidor.

Tras la realización de este procedimiento se realizará la validación de los equipos suministrados en el kit, con el objetivo de verificar que el funcionamiento de los mismos corresponde con las características técnicas definidas en el estándar LoRaWAN y lo visto en la parte teórica de este trabajo.

Al comprobar que los equipos son válidos para las pruebas de laboratorio que se pretenden realizar. Se procederá a la realización de una serie de medidas con el objetivo de comprobar que el comportamiento teórico que se ha definido para estos dispositivos es el correcto.

Por último, con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se realizarán una serie de simulaciones. Estas simulaciones se realizarán con las diferentes configuraciones de interés que soporta la tecnología, así como en diferentes entornos.

8 PLANIFICACIÓN

Este apartado expone las diferentes tareas y fases en las que se ha organizado el proyecto incluyendo también un diagrama de Gantt que relaciona todas las tareas entre sí.

8.1 FASES DEL TRABAJO

- **T1: Coordinación y gestión:** Esta tarea consiste en las reuniones entre el director del proyecto y el alumno que lo realiza en las que se hará un seguimiento, resolución de dudas y consideración de alternativas del trabajo realizado. **Duración: 122 días**
- **T2: Documentación:** Se realiza una búsqueda de información del estándar de LoRaWAN, estudio de los diferentes dispositivos que incorporan la tecnología, así como de sus hojas de especificaciones. **Duración: 15 días**
- **T3: Cálculos Teóricos:** Conocido el comportamiento del estándar se ha procedido a una serie de cálculos teóricos cuyo objetivo es conocer los parámetros que en mayor medida influyen al comportamiento de la red de sensores tanto en lo que se refiere al alcance como a la cantidad de información a enviar.
 - T3.1 Numero de tramas:** Estudio de la tasa binaria a utilizar en función de diversos parámetros y configuración. **Duración: 15 días**
 - T3.2 Alcance:** Conocimiento de que parámetros afectan en mayor medida alcance de la red. **Duración: 20 días**
- **T4: Pruebas de Laboratorio:** Mediciones realizadas en laboratorio con el kit de desarrollo disponible.
 - T4.1 Configuración de la red:** Puesta en marcha de la red LoRa de acuerdo al manual. **Duración: 20 días**
 - T4.2 Validación de Equipos:** Comprobación de que el funcionamiento de los equipos es el esperado. **Duración: 5 días**
 - T4.3 Mediciones del alcance:** Estudio de la atenuación de canal soportada para cada configuración. **Duración: 30 días**
- **T5: Simulaciones:** Simulaciones realizadas a partir de los datos teóricos y prácticos obtenidos para obtener diferentes mapas de cobertura en función del SF.
 - T5.1 Teóricas:** A partir de los datos obtenidos en los cálculos teóricos. **Duración: 20 días**

T5.2 Practicas: A partir de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.
Duración: 15 días

- **T6: Análisis de los resultados:** Estudio de los resultados obtenidos y extracción de las conclusiones de interés. **Duración: 5 días**
- **T7: Redacción del documento final:** Redacción del documento final a entregar cumpliendo los requisitos de la normativa en el que se añadirán cada uno de los apartados según se vayan finalizando. **Duración: 7 días**

8.2 DIAGRAMA DE GANTT

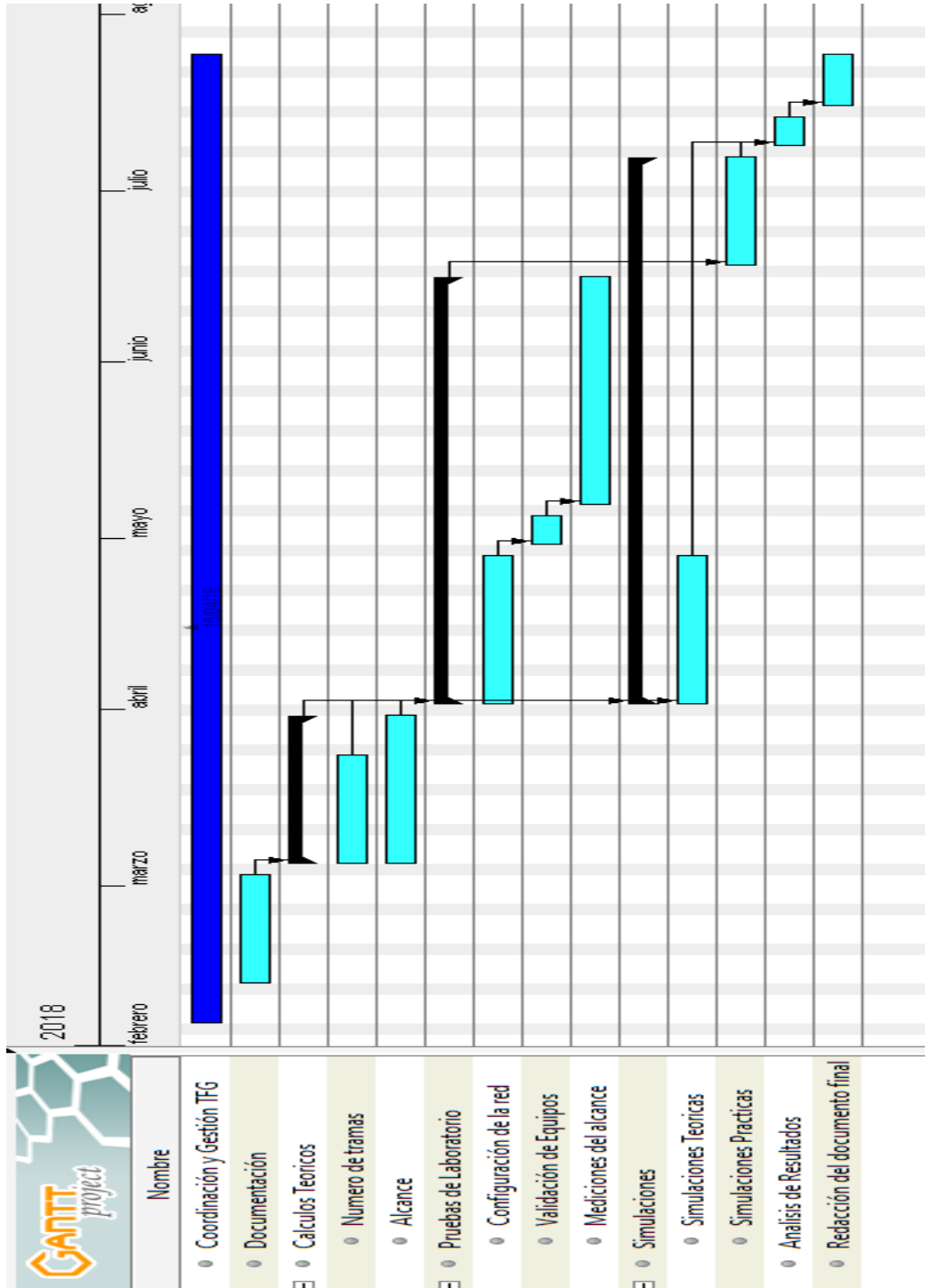


Ilustración 5 - Diagrama de Gantt

9 ESTUDIO REALIZADO

9.1 CÁLCULOS TEÓRICOS

Como ya se ha mencionado anteriormente en la descripción general de las tecnologías LPWA utilizan bandas no licenciadas para uso. En el caso del continente europeo hacen uso de la banda de 868MHz. Esta banda de acuerdo con el CNAF se divide en 10 sub-bandas o canales. De acuerdo con la normativa esta banda presenta para cada dispositivo un ciclo de trabajo inferior al 1%.

Sumado a esta situación regulatoria se debe tener en cuenta el *TTN Fair Access Policy* que recomienda el uso más limitado del espectro debido a la masiva cantidad de dispositivos finales que se espera que estén en activo sea de 30 segundos distribuidos durante 24 horas. Estas dos restricciones juntas hacen necesario el estudio del tiempo que una trama está en el aire y como afectan las diferentes configuraciones a ese tiempo. Con este estudio se podrá planificar en un futuro la cantidad de sensores y módulos LoRa que serán necesarios para ser capaces de enviar la cantidad de datos que la aplicación necesito en el otro extremo de la red.

9.1.1 Especificaciones

Las especificaciones del protocolo LoRaWAN varia significativamente dependiendo de la región en la que nos encontremos, actualmente solo están definidos de forma completa las especificaciones que debe cumplir las redes diseñadas bajo LoRa en Europa y Norte-América.

	Europa	Norte-América
Banda de Frecuencias	867-869MHz	902-928MHz
Canales	10	64+8+8
Ancho de Banda (UP)	125/250kHz	125/500kHz
Ancho de Banda(Down)	125kHz	500kHz
Potencia Uplink	14dBm	20dBm
Potencia Downlink	14dBm	27dBm
SF	7-12	7-10
Tasa de Datos	250bps-50kbps	980bps-21.9kbps
Margen del enlace	155dB	154dB

Tabla 2- Especificaciones de LoRa

En el caso europeo se describen 10 canales que pueden soportar diferentes tasas binarias, oscilando entre 250bps-5.5kbps, además se puede utilizar un único canal de 11kbps y otro con FSK a una velocidad de 50kbps. De esos canales existen 3 que tienen una mayor profundidad en los valores permitidos.

Canal	Frecuencia	Ancho de Banda	Ciclo de Trabajo	Tasa Binaria
1	868.1MHz	125kHz	1%	0.3-5kbps
2	868.3MHz	125kHz	1%	0.3-5kbps
3	868.5MHz	125kHz	1%	0.3-5kbps

Tabla 3 - Canales con mayor especificación

9.1.1.1 Estructura de una trama LoRaWAN

Al ser un protocolo de nivel de enlace se debe estructurar que formato van a tener los dispositivos para poder comunicarse entre los diferentes dispositivos de la red. De acuerdo con la documentación acerca de la estructura de la trama, esta está formada por tres grandes sub-bloques: Preámbulo, cabecera y carga útil.

Quedando la trama enviar de la siguiente forma



Ilustración 6 - Estructura de una trama LoRa

Cada parte de la trama tiene su propia función

- **Preámbulo**, esta parte de la trama tiene como función principal la de sincronismo en el esquema de modulación de la trama o mensaje que se envía. Los datos proporcionados por el preámbulo además proporcionan una funcionalidad adicional al permitir definir esos datos de modulación de forma individualizada para cada dispositivo. El ultimo byte informa sobre la red a la que se encuentra conectado el dispositivo permitiendo a las pasarelas diferenciar entre su propia red y otras que estén emitiendo en la misma frecuencia.
- **Cabecera**, este es un elemento opcional a configurar, su función es la de añadir más información sobre la trama y control de errores. Su función principal es la de informar del número de bytes que tiene la carga útil, informar de la existencia de CRC para la carga útil y el código CRC propio de la cabecera.
- **Carga Útil**, es el elemento donde se encuentra los datos proporcionados por los sensores y que se pretenden enviar hacia el servidor. De acuerdo con el estándar LoRaWAN 1.1 la longitud máxima de esta parte de la trama en número de bytes depende del tipo de configuración de SF que se utilice.
 - Este campo conocido como campo de datos de la capa física, es la trama MAC y está compuesta por 3 partes: La cabecera MHDR, la parte de datos MAC y el campo de integridad MIC.

- La cabecera MAC es un conjunto de información en la que se muestra el tipo de mensaje que se envía dentro de un conjunto de 8. Este tipo de mensaje se pueden diferenciar en mensaje de tipo Join (solicitud de acceso a la red LoRa) y del tipo de envío de datos, Data.
 - El código MIC del final de la trama es calculado a partir de diferentes parámetros de la trama LoRa completa con el fin de garantizar la integridad y autenticidad del mensaje.
 - Dentro de la parte de datos MAC tenemos a su vez 3 sub-apartados, el de la cabecera, el puerto y el campo de datos FRM.
 - La cabecera FHDR contiene la información que diferencia a un dispositivo final del resto de los miembros de la red, DevAddr. Además de incorporar ciertos campos de control y gestión.
 - El campo FPort contiene el puerto desde el que el dispositivo está transmitiendo el modulo LoRa del sensor hacia el servidor que almacena la información.
 - El campo de datos FRMPayload contiene tanto información de control para la gestión completa de la red como los datos obtenidos de los sensores de los que se desea obtener cierta información. Este campo de transmite encriptado mediante las claves NwkKey y AppKey con el objetivo de garantizar la confidencialidad de la información enviada por un canal compartido como es el espectro radioeléctrico.

9.1.2 Número de tramas máximas

Para el cálculo del tiempo que un mensaje de LoRa está en el aire y el tiempo mínimo que este va estar en reposo hasta poder volver a enviar información se han utilizado las siguientes expresiones matemáticas proporcionadas por Semtech [6] en su guía de diseño.

$$T_{aire} = T_{preambulo} + T_{cargaUtil} \quad (1)$$

$$T_{preambulo} = (N_{preambulo} + 4,25) * T_{Simbolo} \quad (2)$$

$$T_{cargaUtil} = NumeroSimbolosCargaUtil * T_{Simbolo} \quad (3)$$

$$NumeroSimbolosCargaUtil = 8 + \max(\text{redondeo}\left(\frac{8*PL-4*SF+28+16-20*H}{4*(SF-2*DE)}\right) * (CR + 4); 0) \quad (4)$$

$$T_{Simbolo} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (5)$$

Las iniciales utilizadas son:

- SF: Factor de ensanchamiento
- PL: Numero de bytes de la carga útil
- H: Inserción de la cabecera opcional en la trama
- DE: Utilización del optimizado de tasa
- CR: Code Rate

Para conocer los límites de capacidad de envío de la red se utilizan los valores máximos de tamaño del a trama que permite el estándar. De acuerdo con el estándar de LoRaWAN 1.1 esos valores son:

1. 255 Bytes de carga Útil
2. La inserción de la cabecera opcional
3. Un preámbulo de 8 bytes de acuerdo con EU 863-870MHz ISM Band
4. Sin optimización de LowRate
5. Un Code Rate de $\frac{1}{2}$

Con estos valores se obtiene la trama de mayor tamaño soportada por el estándar de esta forma se puede averiguar el número máximo de tramas por día para cada SF. Al usar este caso límite toda combinación de los distintos parámetros que se haga será de un tamaño menor por lo que el número máximo de paquetes a enviar será mayor. Además, con la realización de estos cálculos teóricos se puede obtener el alcance máximo al que se podría dar un servicio garantizando la recepción de los paquetes de datos a enviar por parte de los sensores independientemente de la configuración que se elija para los mismos o los cambios que se realicen a posteriori de forma remota.

En la tabla inferior se puede apreciar en número de paquetes máximos a enviar en cada configuración de SF:

SF	T Reposo (ms)	T Aire (ms)	T Símbolo (ms)	Bit Rate (bps)	Tramas diarias TTN Fair Access
7	61256,45	618,75	1,024	3417,97	48
8	107914,75	1090,05	2,048	1953,13	27
9	193121,28	1950,72	4,096	1098,63	15
10	347314,18	3508,22	8,192	610,35	8
11	629747,71	6361,09	16,384	335,69	4
12	1155686,40	11673,60	32,768	183,11	2

Ilustración 7 - Tiempos para el caso crítico

Analizando los resultados se puede apreciar de manera clara que a medida que se aumenta el valor de SF, disminuye el número de paquetes que está permitido enviar al día. Esta diferencia es considerable ya que límite de paquetes a enviar varía desde 48 paquetes, 2 a la hora, a 2 paquetes, 0.083 a la hora. Es por ello que posee especial relevancia conocer el tipo de aplicación a la que queremos prestar servicio con cada sensor, así como la cantidad de información se quiere obtener de él.

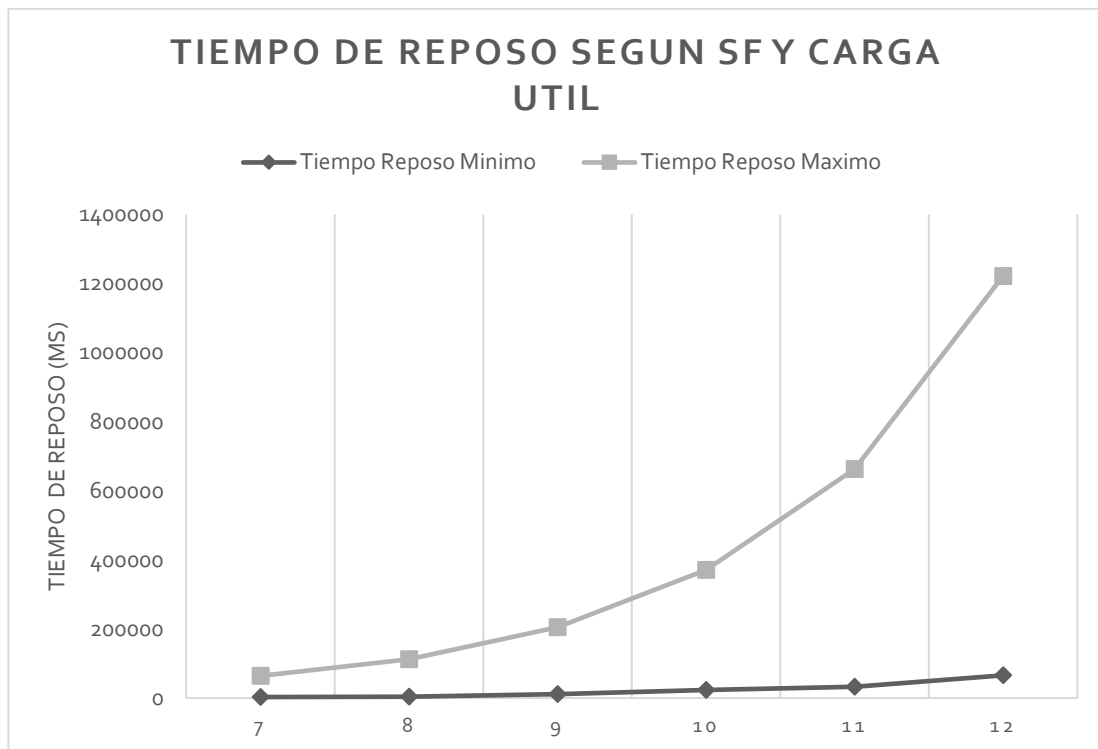


Ilustración 8 - Comparativa temporal entre estructuras de tramas

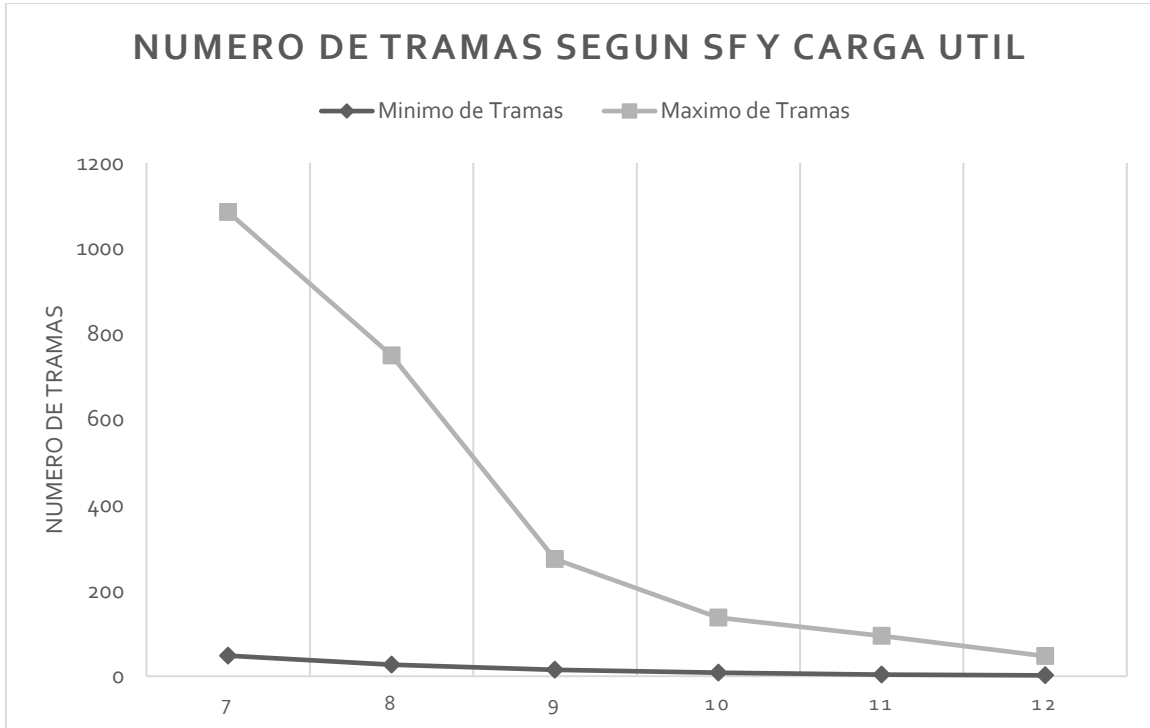


Ilustración 9 - Comparativa en número de tramas entre estructuras de tramas

Gráficamente se aprecia de forma clara la relación inversa que existe entre el tiempo de transmisión de cada trama, que sigue una distribución exponencial, con el número de tramas máximas diaria. Siguiendo esta última una distribución anti-exponencial. Es por ello que se requiere una relación de compromiso entre la cantidad de información a enviar y el SF utilizado para dar robustez a la señal.

9.1.3 Alcance de cada SF

El objetivo del SF es la variación de la robustez que presenta la trama enviada por el sensor. Es por ello que es lógico pensar que cuanto más próximos estén los sensores a los puntos de recepción el SF que estos utilizarán para poder comunicarse con la pasarela será menor, ocurriendo el caso contrario para los sensores ubicados en posiciones más alejadas. De acuerdo con las expresiones teóricas proporcionadas para el conocimiento del alcance de la trama LoRa para cada SF es el siguiente:

$$Sensibilidad_{RX} = -174 + 10 \log_{10} BW - NF + SNR \quad (6)$$

NF: 7dB como valor típico proporcionado por el fabricante

BW: Ancho de banda utilizado (125kHz)

SNR: Relación señal a ruido soportada por el receptor para cada configuración de SF.

SF	SNR (dB)
7	-7.5
8	-10
9	-12.5
10	-15
11	-17.5
12	-20

Tabla 4- SNR según SF

Con los datos y la expresión de cálculo proporcionados por el fabricante se obtiene la sensibilidad del receptor para cada tipo de SF.

SF	Sensibilidad (dBm)
7	-124
8	-126
9	-129
10	-131
11	-134
12	-136

Tabla 5 - Sensibilidad teórica según SF

Gracias al valor de potencia mínima que puede ser captada por el receptor LoRa se posible conocer la atenuación provocada por el enlace radio. La atenuación total del canal se obtiene a partir de la expresión:

$$L(\text{dB}) = PIRE - P_{RX} \quad (7)$$

<i>SF</i>	<i>Atenuación Canal</i>
7	138
8	140
9	143
10	145
11	148
12	150

Tabla 6- Atenuación soportada según SF

La tecnología LoRa permite la recepción de información sin necesidad de existir visión directa entre el dispositivo final emisor y la pasarela receptora. Es por ello que las pérdidas del canal no se deben únicamente a las pérdidas producidas en el espacio libre, es necesario otro método para obtener los resultados del alcance en distancia. Debido a la frecuencia de trabajo de trabajo es sub-GHz y al ser de esperar que las pasarelas se encuentren a una mayor altura que los dispositivos finales emisores se hace uso del modelo de Okumura-Hata [7] para ciudades medianas/Pequeñas. La expresión matemática del modelo es la siguiente:

$$L(dB) = 69.55 + 26.16 * \log_{10}(f) - 13.82 * \log_{10}(h_t) - a(h_m) + (44.9 - 6,55 * \log_{10}(h_t)) * \log_{10} d \quad (8)$$

f = Frecuencia de trabajo en MHz

h_t = Altura de la pasarela=30m

h_m = Altura del dispositivo final=0m

Esta es la expresión general de este modelo de propagación, al estar en una ciudad de tamaño medio/pequeño se debe introducir el siguiente factor de corrección:

$$a(h_m) = -(1.56 * \log_{10}(f) - 0.8) \quad (9)$$

9.1.3.1 Alcance a distintas frecuencias

Dentro de las especificaciones expuestas en líneas superiores dentro de las 10 canales disponibles para el uso, 3 de ellos son los que tiene unas restricciones mayores y tengan mayormente definidos. Es por ello que se ha calculado el alcance para los canales de 868.1, 868.3, 868.5MHz tanto para un entorno urbano como sub-urbano.

9.1.3.1.1 Entorno Urbano

9.1.3.1.1.1 868.1MHz

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	3,020	28,64
8	3,556	39,72
9	4,187	55,07
10	4,930	76,36
11	5,805	105,88
12	6,836	146,81

Tabla 7 - Alcance según SF a 868.1MHz en entorno urbano

9.1.3.1.1.2 868.3MHz

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	3,019	28,63
8	3,555	39,70
9	4,186	55,05
10	4,929	76,34
11	5,804	105,85
12	6,835	146,76

Tabla 8 - Alcance según SF a 868.3MHz en entorno urbano

9.1.3.1.1.3 868.5MHz

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	3,019	28,63
8	3,554	39,69
9	4,186	55,04
10	4,929	76,31
11	5,804	105,81
12	6,834	146,72

Tabla 9 - Alcance según SF a 868.5MHz en entorno urbano

9.1.3.1.2 Entorno Sub-Urbano

Al ser el modelo Okumura-Hata para entornos urbanos se debe añadir a la expresión anterior el factor de corrección propio para entorno sub-urbanos que propone el modelo:

$$L_{SB}(dB) = L(dB) - 2 * \left[\log_{10} \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5.4 \quad (10)$$

Dando como resultados los siguientes alcances para cada uno de los factores de ensanchamiento de los que dispone la tecnología.

9.1.3.1.2.1 868.1MHz

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	5,748	103,81
8	6,769	143,93
9	7,970	199,58
10	9,385	276,73
11	11,052	383,71
12	13,014	532,04

Tabla 10 - Alcance según SF a 868.1 MHz en entorno sub-urbano

9.1.3.1.2.2 868.3MHz

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	5,748	103,78
8	6,768	143,90
9	7,969	199,53
10	9,384	276,66
11	11,050	383,61
12	13,012	531,91

Tabla 11 - Alcance según SF a 868.3MHz en entorno sub-urbano

9.1.3.1.2.3 868.5MHz

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km2)
7	5,747	103,75
8	6,767	143,86
9	7,968	199,48
10	9,383	276,59
11	11,049	383,52
12	13,010	531,78

Tabla 12 - Alcance según SF a 868.5MHz en entorno sub-urbano

Tras la obtención de los alcances en función de la frecuencia de transmisión a diferentes entornos. Se afirma que la afección que podría tener el uso de diferentes frecuencias de trabajo en el alcance es un valor despreciable. Por lo que de ahora en adelante se ha utilizado el canal central de 868.3MHz.

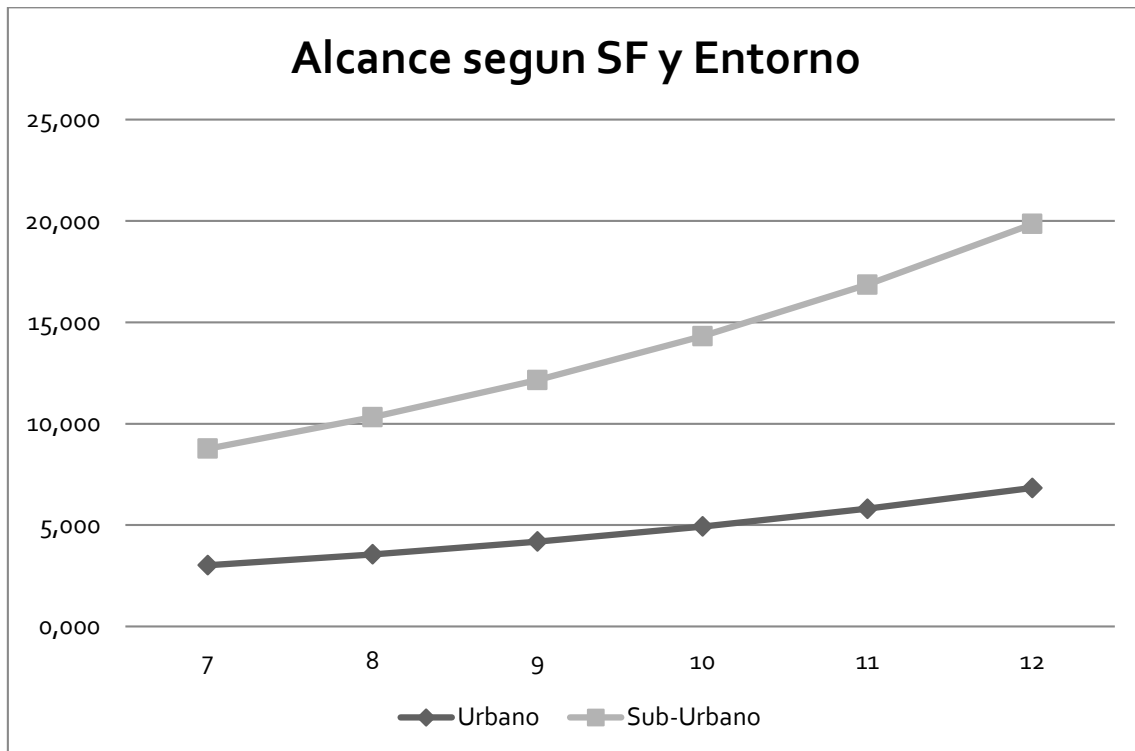


Ilustración 10 - Comparativa entre alcance y SF en función del entorno

En esta segunda grafica se aprecia como los parámetros más influyentes en el alcance vistos hasta ahora son el lugar donde se despliegue la red y el valor de SF con el que se parametricen los dispositivos finales.

9.1.3.2 Alcance según potencia

Los cálculos que se han realizado hasta ahora han sido planteados con una potencia de transmisión máxima de 14dBm. En este apartado se ha estudiado como afecta al alcance una transmisión en a la potencia más baja que permite el estándar, -3dBm.

9.1.3.2.1 Entorno Urbano

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	0,994	3,10
8	1,170	4,30
9	1,378	5,96
10	1,622	8,27
11	1,911	11,47
12	2,250	15,90

Ilustración 11 - Alcance en entorno urbano a máxima potencia

9.1.3.2.2 Entorno Sub-Urbano

SF	Alcance(km)	Área de Cobertura(km²)
7	1,892	11,24
8	2,228	15,59
9	2,623	21,62
10	3,089	29,97
11	3,637	41,56
12	4,283	57,63

Ilustración 12 - Alcance en entorno sub-urbano a mínima potencia

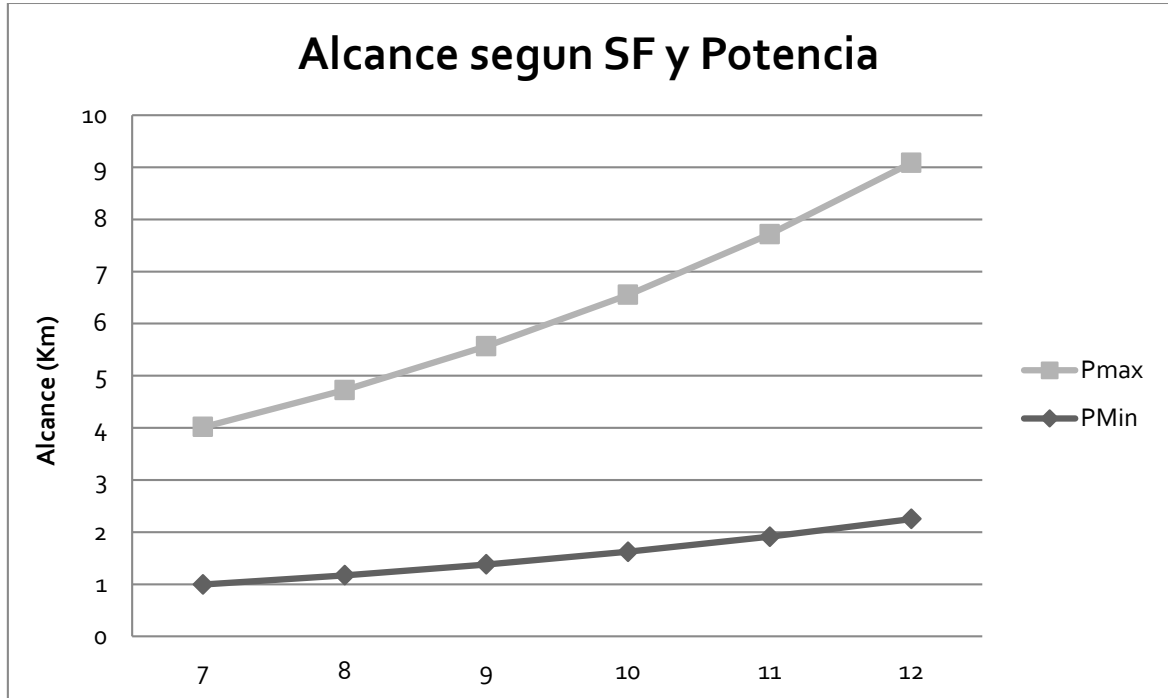


Ilustración 13 - Comparativa de alcance en las mismas condiciones según potencia

Al mostrar en una única grafica los valores del alcance para una misma configuración del módulo y un mismo entorno

9.1.4 Resumen de los resultados

A la vista de los resultados obtenidos se obtienen las siguientes conclusiones:

1. A menor SF mayor tasa binaria
2. El alcance depende del SF, entorno y potencia de transmisión
3. Un mayor SF hace un uso mayor del trasmisor, lo que supone una menor vida útil del dispositivo final.

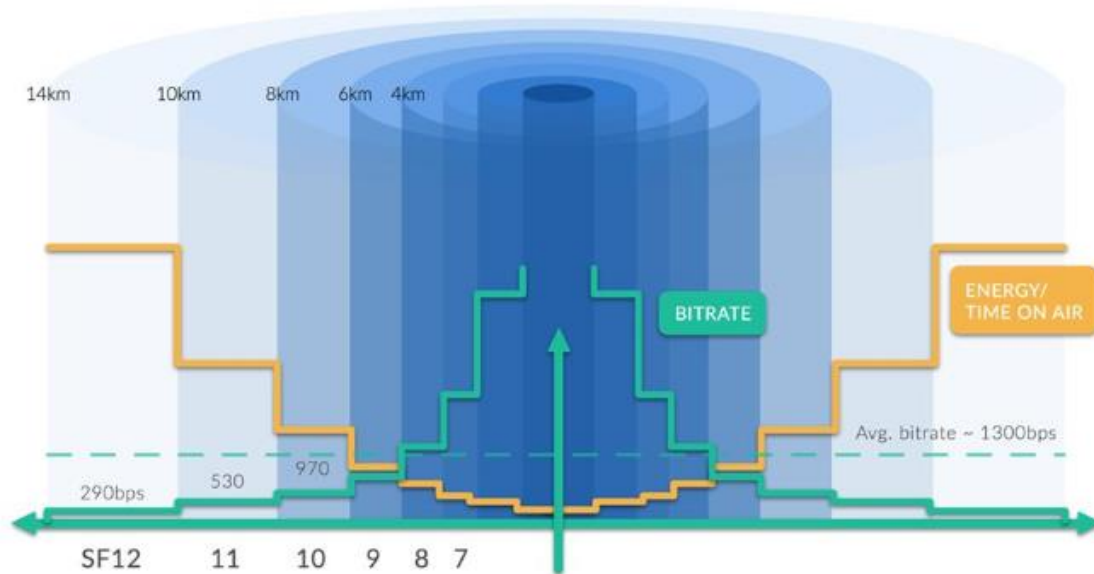


Ilustración 14 - Resumen de características

En la imagen superior se puede apreciar en un único gráfico la relación que existe entre el SF y los diferentes parámetros que deben tenerse en consideración a la hora de dimensionar una red LoRa. Cuanto mayor es el SF mayor es el alcance, disminuye la tasa binaria al tener cada símbolo un tiempo diferente, al tener una mayor modulación el tiempo de cómputo es mayor para el módulo lo que influye en el consumo de energía disminuyendo la vida útil.

Una vez obtenidos los valores teóricos a partir de las expresiones matemáticas y datos proporcionados por el fabricante, así como expresiones teóricas propias de la teoría de radioenlaces se hace necesario comprobar que los dispositivos que se vayan a utilizar en la futura red de LoRa presentan un comportamiento acorde con los resultados teóricos obtenidos.

9.2 VALORES PRÁCTICOS

Este apartado tiene como objetivo ratificar y validar los parámetros que se proporcionan por parte del fabricante en la hoja de especificaciones. Para ello se ha creado un entorno controlado en el que se ha medido la atenuación de canal soportada por parte de los módulos RN2483, así como la sensibilidad del dispositivo que actúa como receptor.

Para la realización de las pruebas dentro del laboratorio se ha hecho uso del LoRa R *Technology Evaluation Kit – 800*, el kit se ha implementado de diversas formas con el fin de verificar y validar el comportamiento de los diferentes dispositivos.

El primer montaje tiene como objetivo demostrar que la comunicación entre los sensores y la pasarela se hace a través de un radio enlace LoRa. Además, este montaje inicial ha sido el utilizado para comprobar la atenuación soportada por el enlace. Con los datos obtenidos se han realizado una serie de simulaciones con el objetivo de comprobar la afección de los parámetros de mayor importancia al alcance de la red.

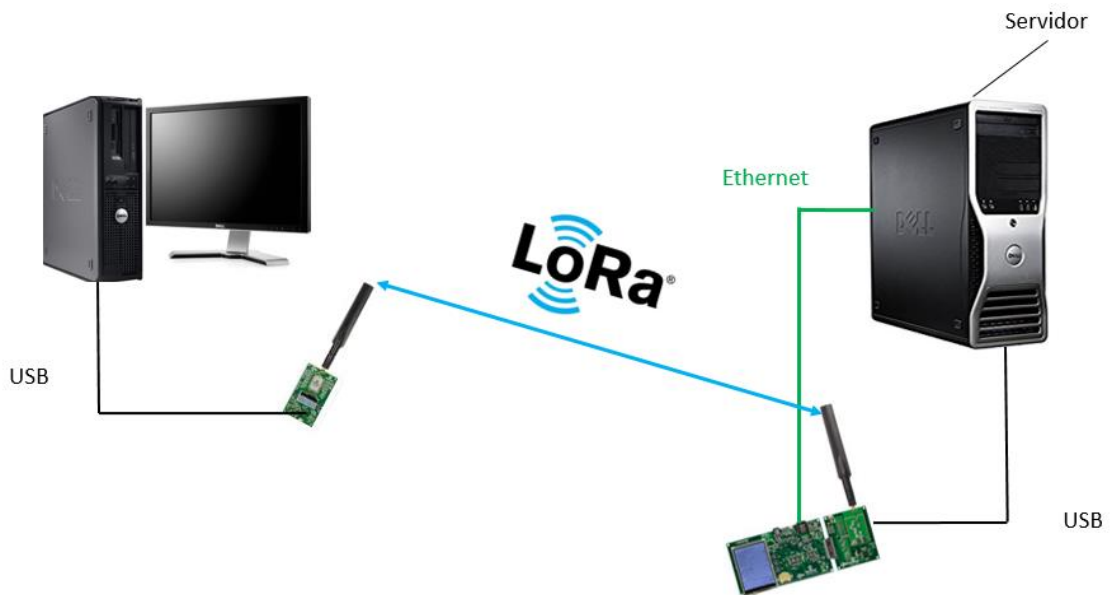


Ilustración 15- Arquitectura de red 1

El propósito del segundo montaje es comprobar el funcionamiento de la pasarela. Es decir, que esta capta los mensajes desde la tarjeta de comunicación radio y realiza la conversión de los datos para ser transportados a través de una red TCP/IP. Con el fin de simplificar este montaje se ha hecho uso de un enlace directo a través de un cable Ethernet entre la pasarela y el servidor.



Ilustración 16- Arquitectura de Red 2

El último montaje se ha implementado para observar la escalabilidad de la red y la seguridad en el acceso de la misma. Con ese fin se ha insertado un nuevo sensor en la red con el que se ha enviado información sin registro previo y posteriormente registrado.

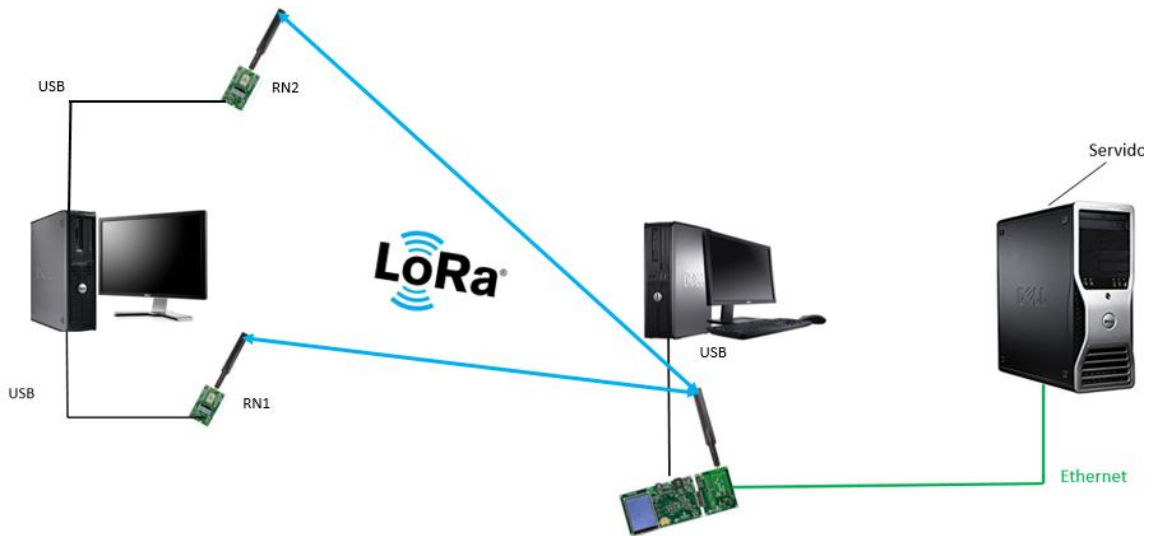


Ilustración 17 - Arquitectura de Red 3

El montaje realizado para la obtención de los valores prácticos en cuanto al alcance de la tecnología LoRa se muestra en la siguiente fotografía y corresponde con la arquitectura de red 1.



Ilustración 18 - Montaje Real

9.2.1 Potencia Transmitida

Como primera prueba se ha validado que la potencia máxima transmitida por parte del módulo RN 2483 es de 14dBm como afirma el fabricante y la potencia de trabajo por defecto. Para ello se conecta la salida RF del módulo al analizador de espectros, a través de una transición SMA-N y un clave coaxial.

La potencia recibida es de 13,4 dBm, teniendo en cuenta las posibles desadaptaciones de las transiciones utilizadas como la atenuación provocada, se puede afirmar que una potencia de transmisor de 14dBm es un valor correcto.

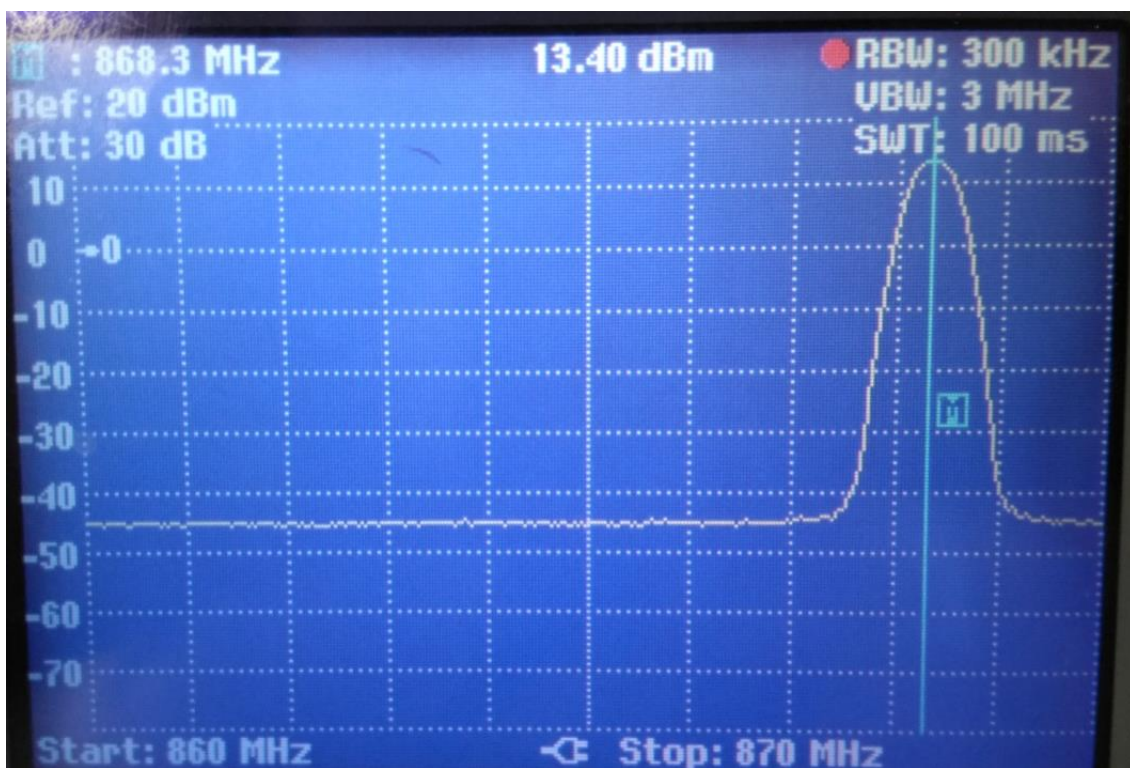


Ilustración 19- Señal de RF LoRa

9.2.2 Atenuación de paramenta

Para conocer la atenuación provocada por la paramenta utilizada para la realización de las pruebas, se ha hecho un montaje con todas ellas siendo el valor de los atenuadores variables o dB.



Ilustración 20 - Recepción con atenuadores a dB

Con el sistema de cables, atenuadores y transiciones completo utilizado la potencia recibida es de 11.48dBm. Por lo que la atenuación provocada por el equipamiento es:

$$A(\text{dB}) = 13,4 - 11,48 = 1,6\text{dB} \text{ (11)}$$

Adicionalmente se incorporará un repartidor de potencia para poder recibir las tramas tanto en el analizador de espectros como en la entrada RF de la pasarela. Es por ello que es preciso conocer la atenuación adicional que incorpora este elemento para realizar unas mediciones correctas. El valor de potencia recibido con el montaje completo es el siguiente:

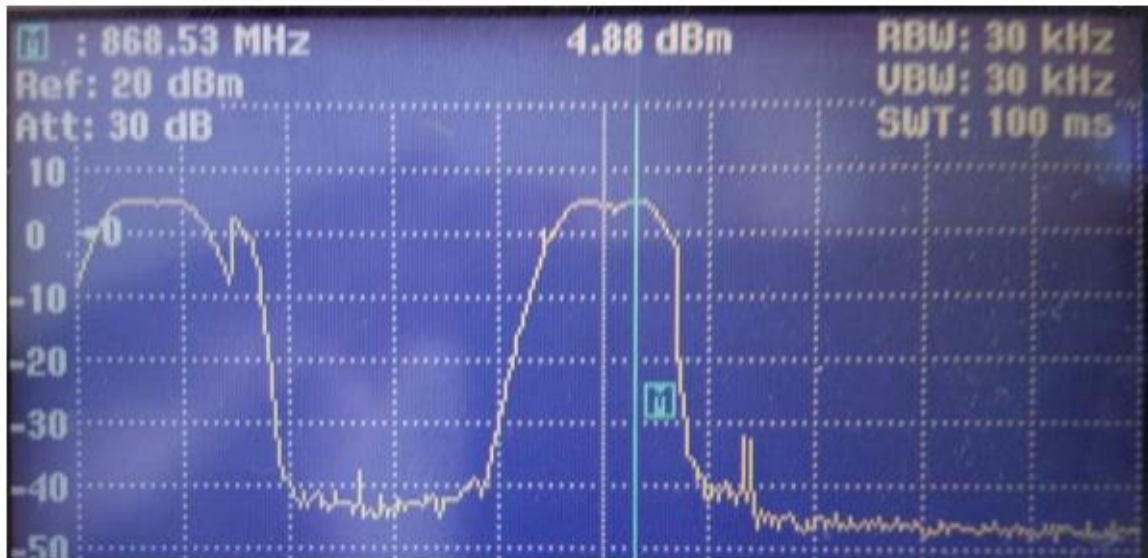


Ilustración 21 - Recepción con sistema completo

Al añadir el divisor de potencia la potencia recibida disminuye a los 4,88dBm. Por lo que la atenuación provocada por este elemento es:

$$A_{\text{Repartidor}}(\text{dB}) = 11,48 - 4,88 = 6,6\text{dB} \quad (12)$$

9.2.2.1 Balance de Potencia

Recogiendo todos los datos anteriores el canal resultante con el que se realizaran las pruebas se expresa de la siguiente forma:

$$P_{RX} = P_{Tx} - 1,6 - 6,6 - A(\text{Variable}) \quad (13)$$

$$\text{Atenuacion}_{\text{canal}}(\text{dB}) = 8,2 + A(\text{Variable}) \quad (14)$$

9.2.2.2 Atenuación Variable

Dado que los atenuadores variables que se han utilizado no muestran la atenuación que provocan de una forma fácilmente visible es necesario obtener el valor del atenuador a partir de la potencia recibida en el analizador de espectros. Con este fin se ha utilizado uno de los dipolos que incorpora el kit para la recepción de una señal de telefonía móvil entorno a los 810MHz.

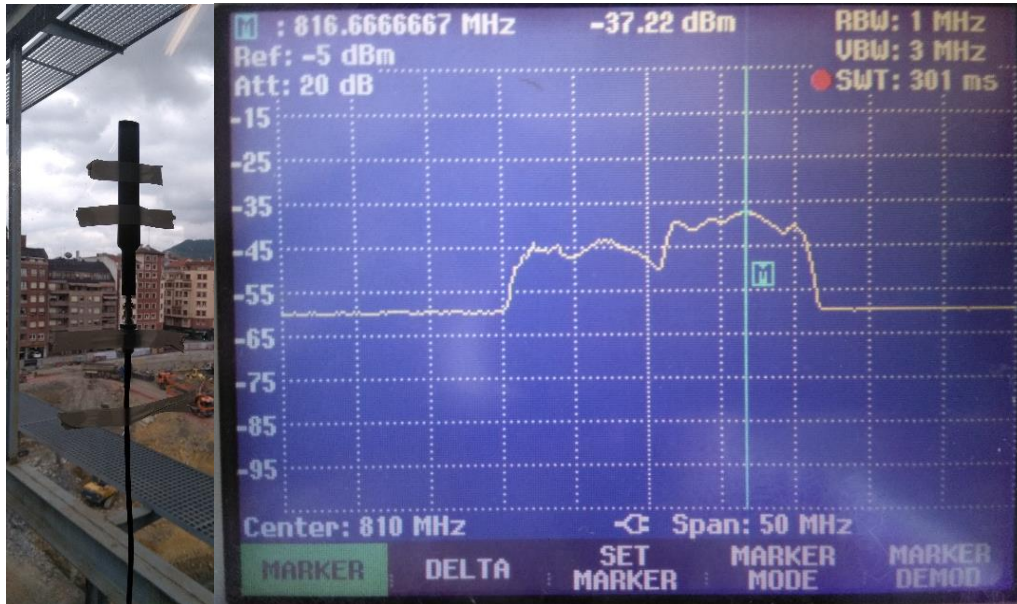


Ilustración 22 - Antena y señal de referencia

Esta señal se ha tomado como referencia para el cálculo de la atenuación, una vez captada la señal se introduce el atenuador al que se le ha variado su valor hasta que el mensaje no haya podido ser recibido por el receptor.

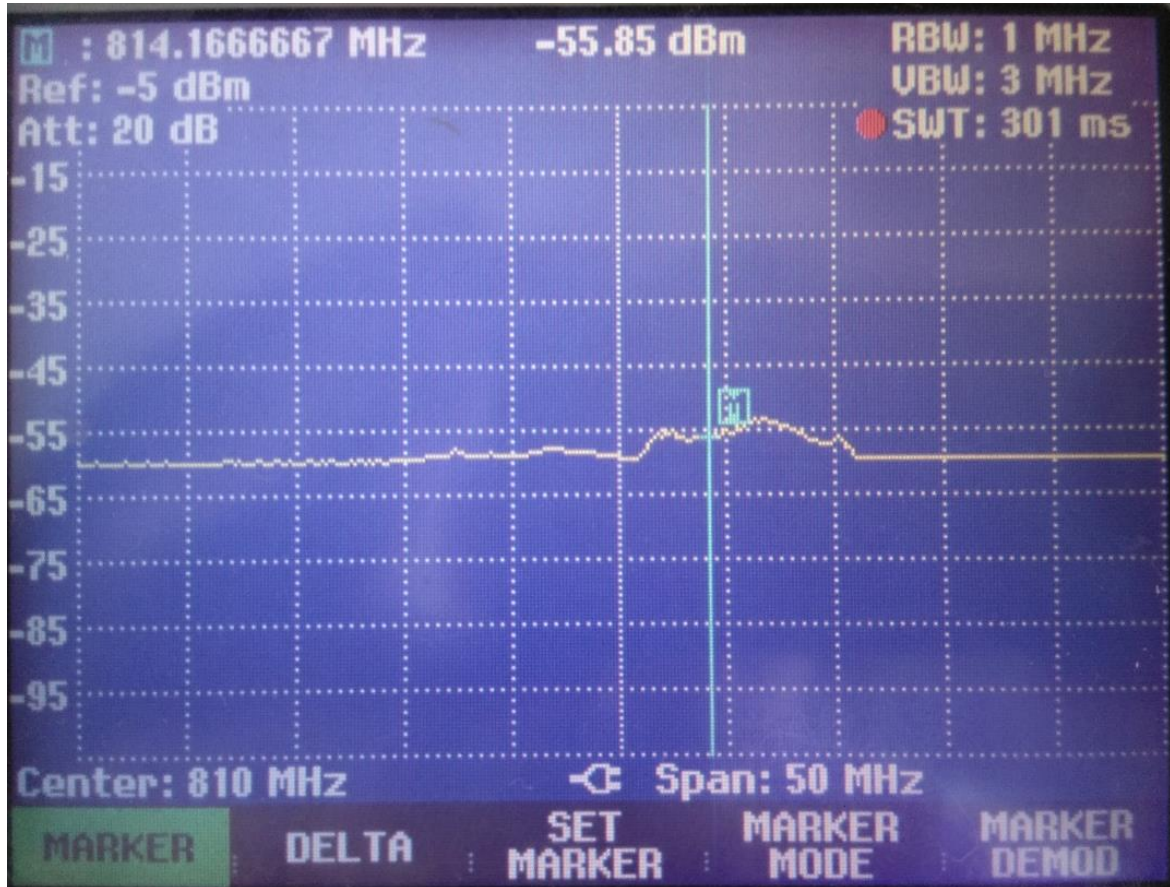


Ilustración 23 - Recepción con atenuación variable

La diferencia de potencia recibida entre los dos casos es el que se ha tomado como el valor de atenuación del último miembro de la cadena de atenuadores.

9.2.3 Medidas

Los valores de atenuación de canal soportados para las distintas configuraciones son las siguientes:

SF	Atenuación Canal
7	137,05
8	138,62
9	141,74
10	142,64
11	145,15
12	147,73

Tabla 13 - Atenuación soportada medida en laboratorio

Para la obtención de la sensibilidad del dispositivo receptor se utilizará un balance de potencia en su forma más simple.

$$L(dB) = P_{Tx} - P_{RX} \quad (15)$$

$$P_{RX} = P_{Tx} - L(dB) \quad (16)$$

SF	Sensibilidad (dBm)
7	-123,71
8	-125,28
9	-128,4
10	-129,3
11	-131,81
12	-134,39

Tabla 14 - Sensibilidad practica según SF

Con los valores de sensibilidad obtenidos se realizarán los mapas de cobertura con el mismo procedimiento que el caso de los valores obtenidos de forma teórica.

9.3 SIMULACIÓN RADIO MOBILE

El modelo de propagación de Okumura-Hata está diseñado para estimar el alcance de comunicaciones inalámbricas para entornos urbanos de grandes dimensiones. Si se observa el emplazamiento en el que se van a encontrar nuestros receptores LoRa, se concluye que no nos encontramos ante un entorno puramente urbanos y de grandes dimensiones; si no en un entorno con una orografía montañosa con tres núcleos urbanos.

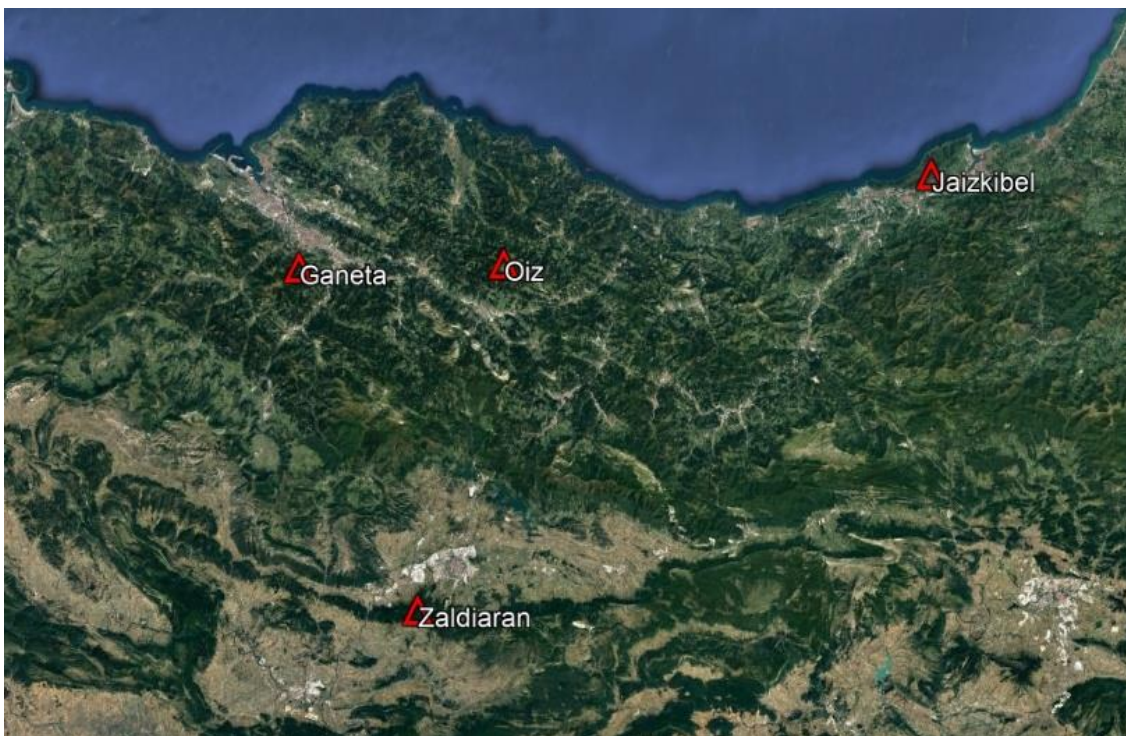


Ilustración 24 - Orografía de la red

El modelo de propagación con el que se ha calculado el alcance ha servido para ratificar los datos teóricos que proporciona el estándar. Este modelo está además diseñado para el estudio de la propagación en redes donde los nodos transmisores presentan una complejidad HW y SW mayor que los dispositivos receptores, como son las redes de telefonía móvil. En el caso de las redes LoRa ocurre la situación contraria, el número de elementos transmisores es mayor que los receptores y estos últimos son más complejos que los otros. Además, al encontrarnos en un entorno montañoso estos puntos de recepción serán colocados en los puntos con más altura posible permitiendo en muchos casos la visión directa, lo que aumenta el alcance.

Es por ello que se va hacer uso del modelo de propagación Longley-Rice. Este es un modelo que hace uso de diferentes elementos para el cálculo del alcance y características de

recepción: Teoría del electromagnetismo, análisis estadístico de la orografía del terreno, parámetros del radio enlace y predicción de la atenuación media provocada por un entorno topográfico irregular. Su banda de funcionamiento abarca desde 20 MHz a 20 GHz para alcances de entre 1 km y 2000 km

Para el cálculo del mapa de cobertura se hará uso del SW Radio Mobile [8], [9] y Google Earth. El primero de ellos para la obtención del mapa de cobertura y características de un radioenlace entre un punto transmisor y otro receptor. El Google Earth se usará para la obtención de coordenadas, estudio inicial del emplazamiento y estudio del mapa de cobertura obtenido.

A partir de los resultados obtenidos tanto teórica como en las pruebas de laboratorio se ha diseñado una red con los siguientes elementos:

- 4 Estaciones Receptoras
- 8 Dispositivos transmisores

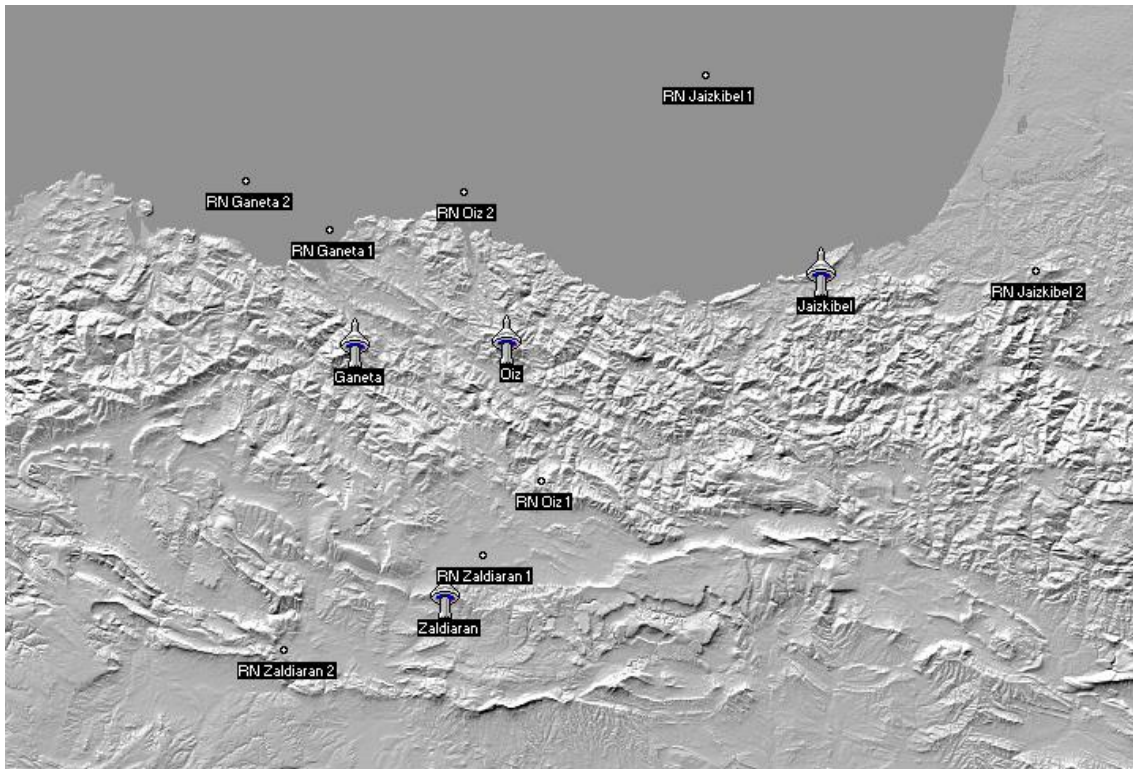


Ilustración 25 - Red a simular

Ganeta	Oiz	Jaizkibel	Zaldiaran
43°13'17.71" N	43°13'42.22" N	43°20'33.73"N	42°47'40.75"N
2°56'52.40" O	2°35'41.67"O	1°51'34.72" O	2°44'11.15"O

Tabla 15 - Coordenadas del emplazamiento de los receptores

9.3.1 Puntos de recepción

Nuestra red LoRa tendrá en un principio cuatro puntos de recepción, estos puntos corresponden a los cuatro centros principales de la red de difusión de Itelazpi [10]: Ganeta, Oiz, Jaizkibel y Zaldiaran.

9.3.1.1 Ganeta

Este punto se encuentra en el territorio histórico de Bizkaia y provee servicios al área de Bilbao, siendo el punto más alto de la villa (685m), lo que permite su uso para la difusión entre otros servicios de la televisión digital. Este emplazamiento es de interés al ser un punto elevado cercano a una zona densamente poblada como es el Gran Bilbao, además es visible desde puntos de la costa

9.3.1.2 Oiz

Al igual que el punto anterior Oiz se encuentra en Bizkaia, se presenta como un punto de interés no solo por ser el punto que más altura presenta, 1026m, sino también por encontrarse en un entorno poco poblado y bastante montañoso.

9.3.1.3 Jaizkibel

Ubicado en Guipúzcoa, este punto presenta también unas características que lo hacen interesante. Su proximidad con la costa donde las pérdidas por propagación se pueden considerar equivalentes al espacio libre es la más destacable de este emplazamiento.

9.3.1.4 Zaldiaran

El último punto a estudio de nuestra red se encuentra en Araba, el interés de este punto se presenta al ser el punto más alto de su área (978m) y al estar rodeada de dos llanuras en sus dos vertientes; Llanura alavesa en el norte y Treviño al sur.

9.3.2 Altura de las antenas receptoras

Para el posicionamiento de las antenas receptoras se ha utilizado una imagen 3D de un centro emisor. Al estar las antenas de UHF (300MHz-3GHz) que proporcionan servicios de televisión digital se utilizara esta posición para las antenas de nuestros receptores ya que operan en bandas similares

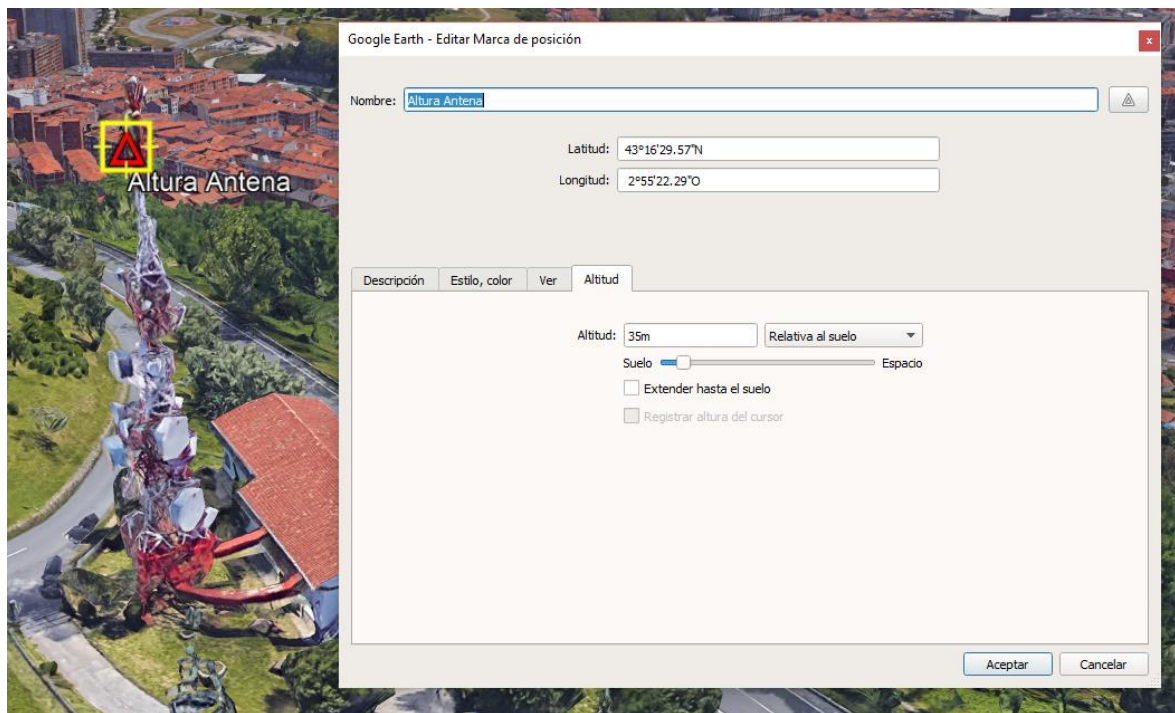


Ilustración 26 - Obtención de la altura de las antenas

El hecho de que este tipo de antenas se coloquen en esta posición es de interés, ya que al aumentar la altura de recepción el alcance de la red se verá posiblemente mejorado.

9.4 MAPAS DE COBERTURA

En este apartado se analizarán los diferentes mapas de cobertura que se van a simular en los diferentes emplazamientos. Para la obtención de estos mapas de van tenido en cuenta las siguientes especificaciones.

- ✗ Uso de dipolos a modo de antena
- ✗ Banda de trabajo 868-868,7MHz
- ✗ Altura de los puntos de recepción 35m sobre el suelo
- ✗ 50 km de radio de cobertura
- ✗ Cobertura de 360°
- ✗ Barrido angular de 0,01°
- ✗ Angulo de elevación 0°
- ✗ El alcance de cada SF tiene un color:

SF	Color
7	Verde
8	Azul
9	Naranja
10	Amarillo
11	Rojo
12	Morado

Tabla 16 - Rango de colores para cada SF

9.4.1 Máxima Potencia

El primer caso que se ha estudiado el caso idóneo en el que los sensores emiten sus tramas a través del módulo que llevan incorporado a máxima potencia.

Ese valor máximo es de 14dBm.

9.4.2 Mínima Potencia

En segundo lugar, se observarán los resultados obtenidos para el peor de los casos de funcionamiento de los dispositivos. Con el mapa de cobertura de este caso se pretende conocer el posicionamiento y configuración de los diferentes dispositivos con el que se mantendrán en funcionamiento siempre y cuando no se haya terminado la vida útil del dispositivo o problemas de similar naturaleza.

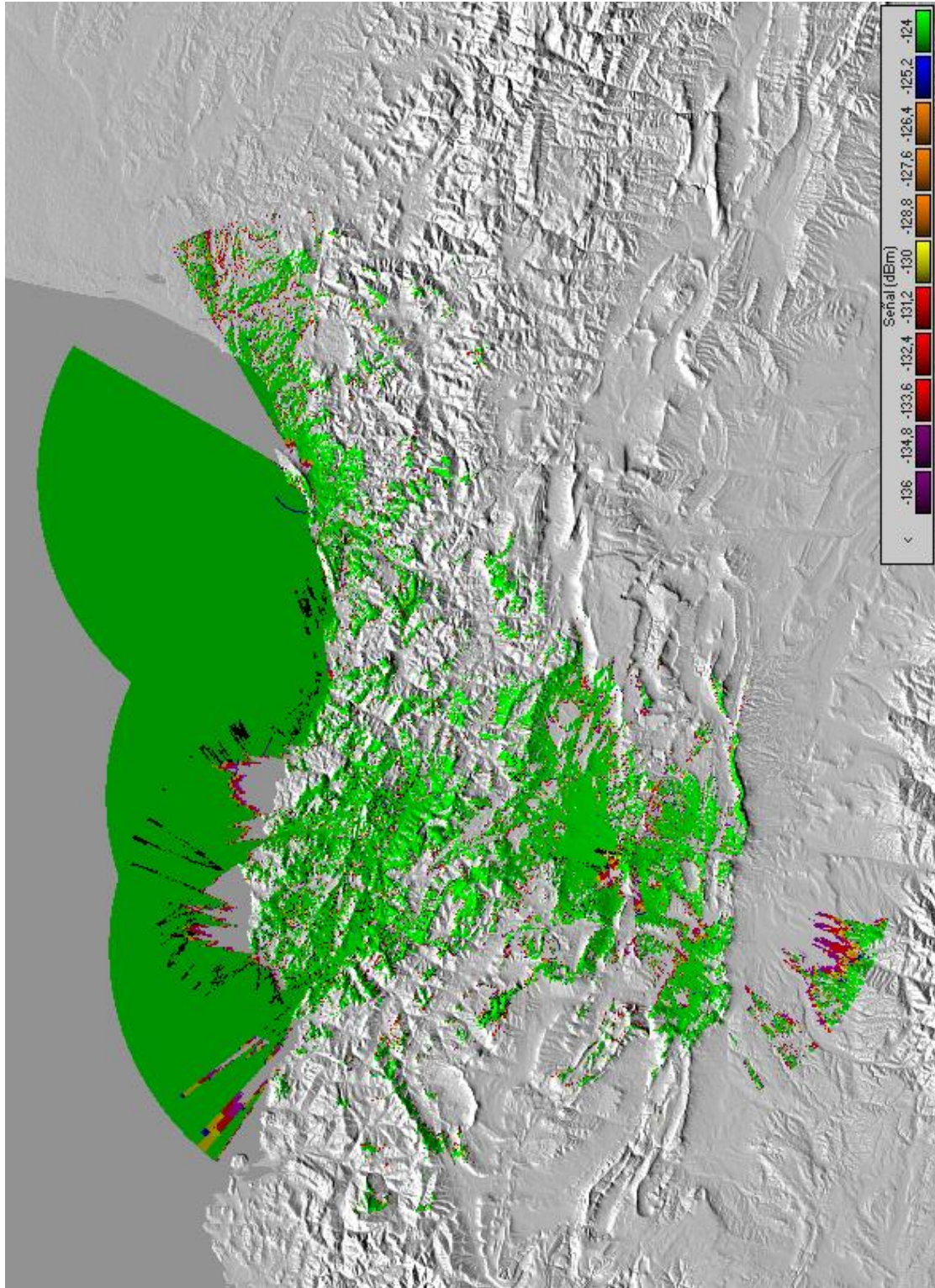


Ilustración 27 - Mapa de Cobertura Teórico: Máxima Potencia

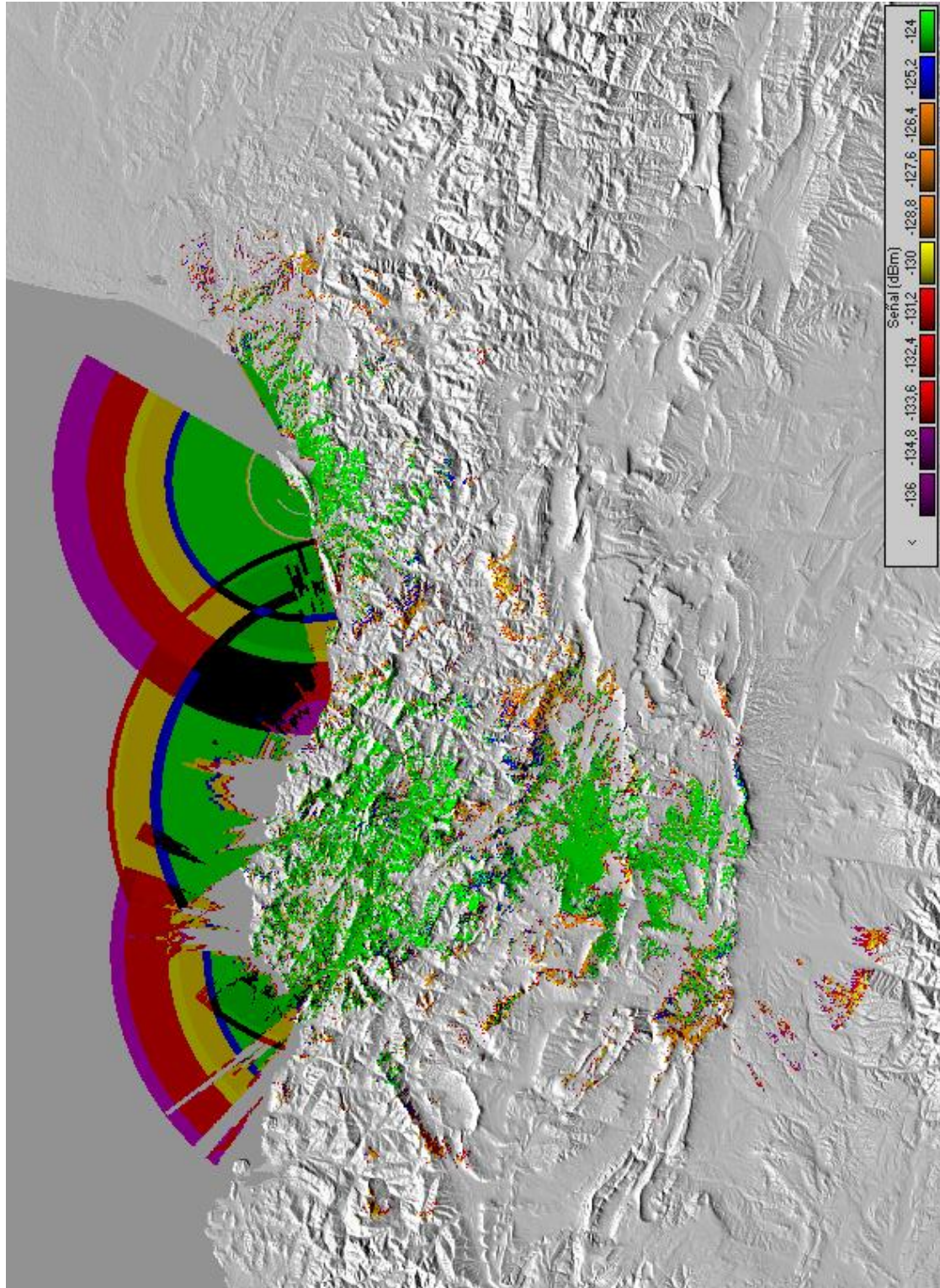


Ilustración 28 - Mapa de Cobertura Teórico: Mínima Potencia

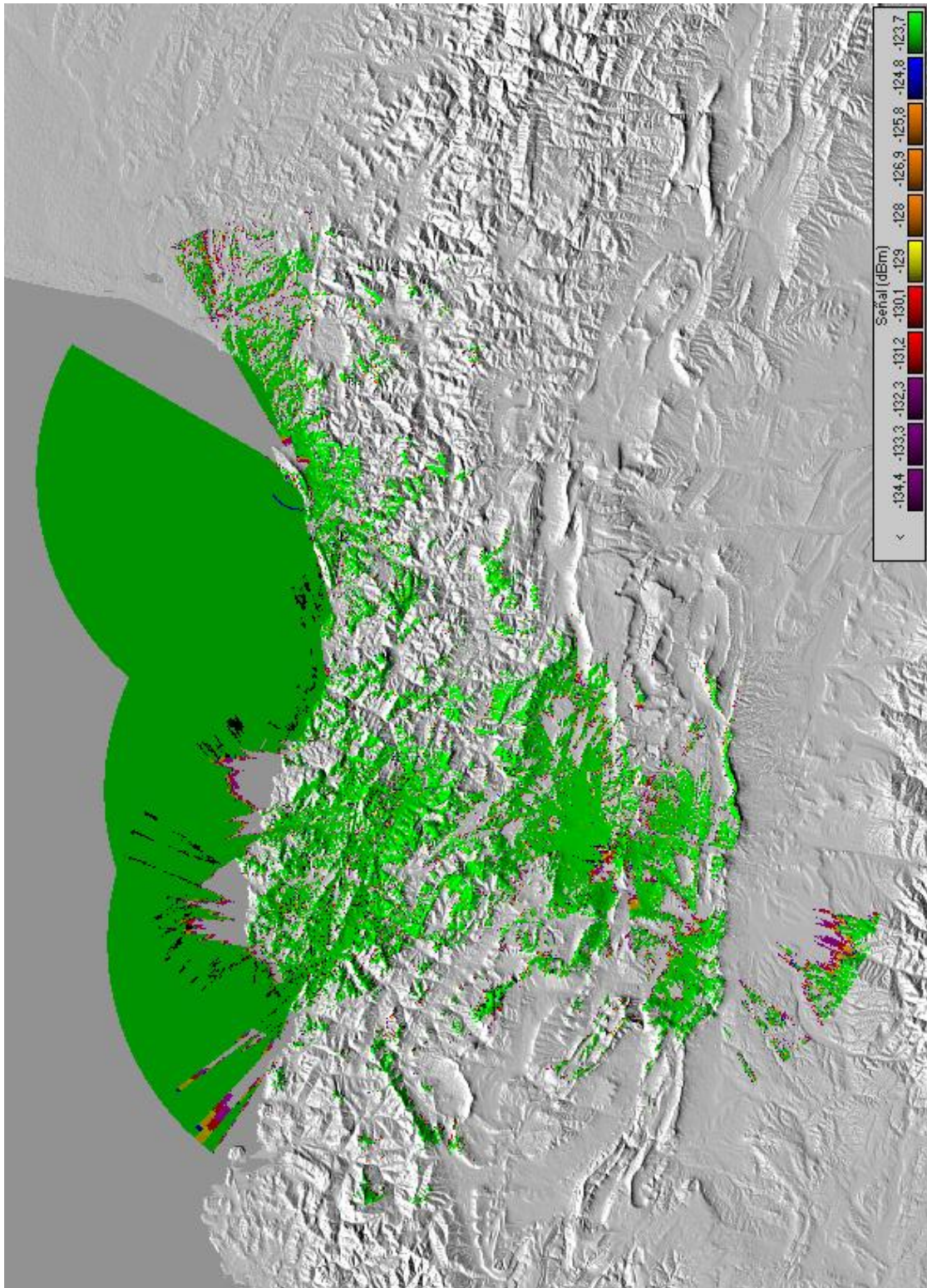


Ilustración 29 - Mapa Cobertura Practico: Máxima Potencia

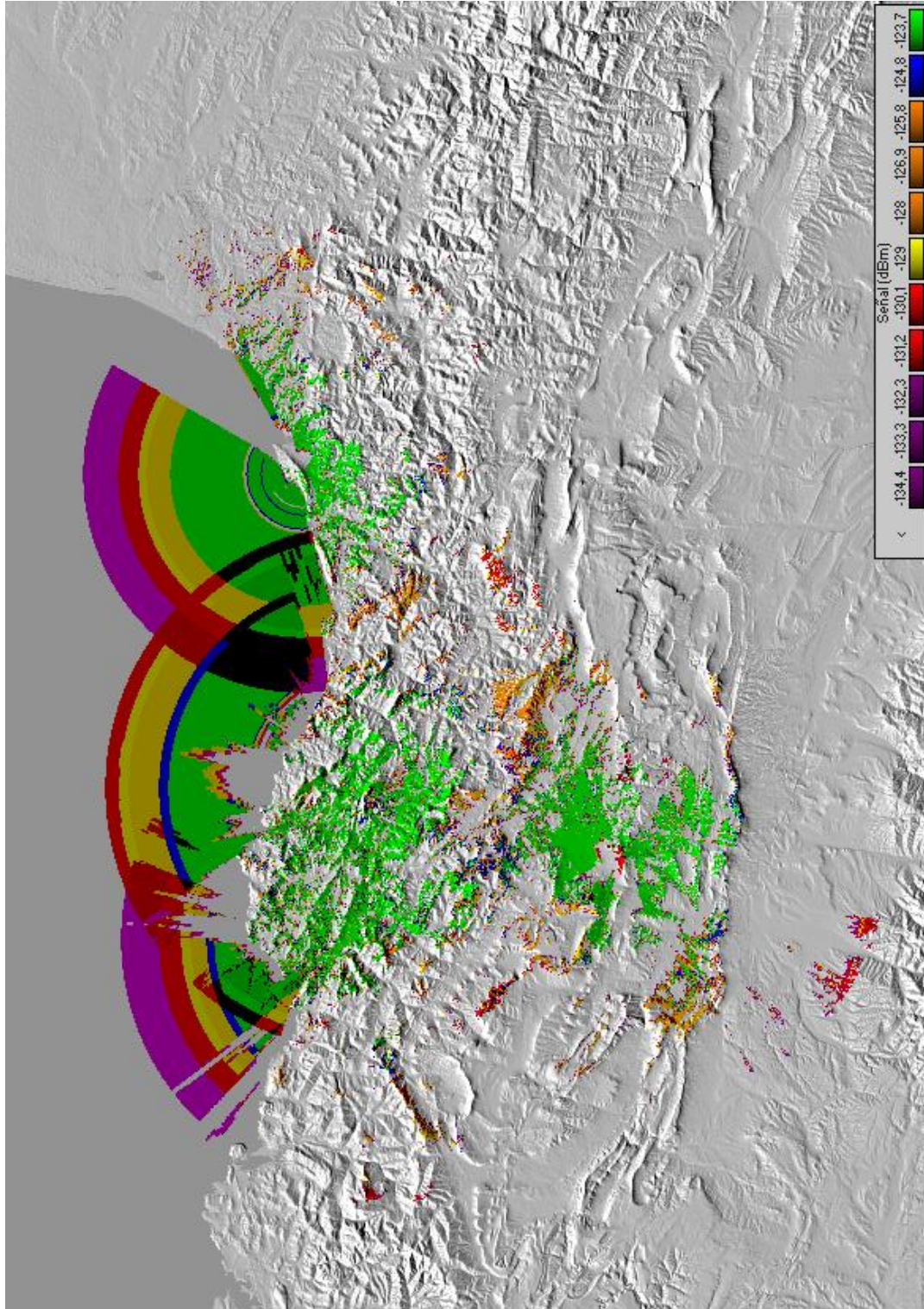


Ilustración 30 - Mapa Cobertura Practico: Mínima Potencia

9.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenidos los mapas de cobertura tanto teóricos como prácticos se aprecia la diferencia del comportamiento de la red si los sensores están transmitiendo a máxima potencia o mínima al variar el color de los mapas varia el SF. Este es el parámetro que configura la modulación y la robustez de la señal, siendo el más importante.

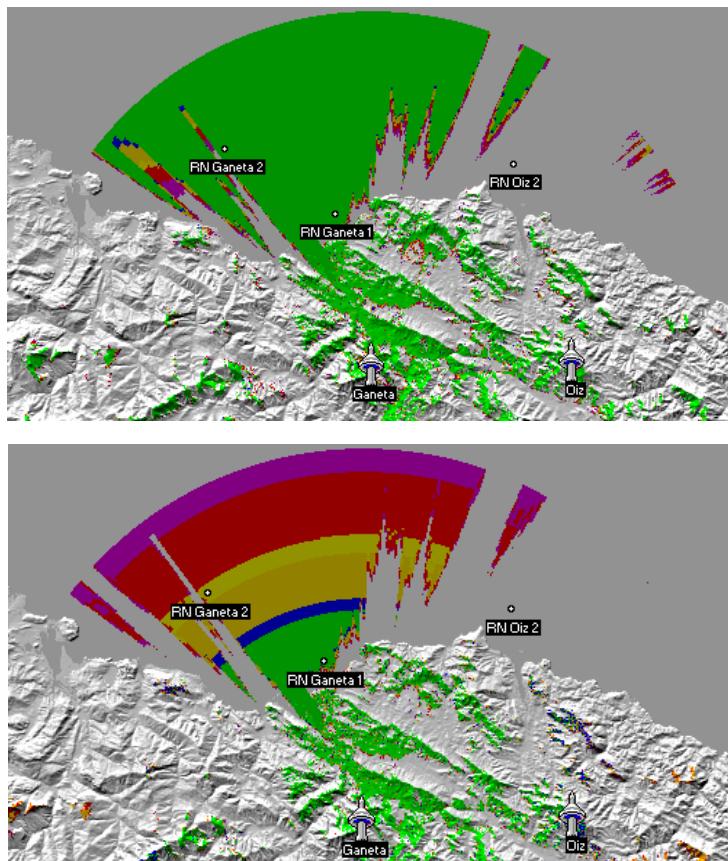


Ilustración 31 - Comparativa entre potencias

Con el estudio del comportamiento crítico de estos módulos LoRa se conoce la configuración que se necesita para poder recibir la información a enviar en todo momento mientras el transmisor se encuentre operativo.

Como se muestra en la imagen superior la diferencia entre una situación y otra es notable, gracias al estudio de la situación crítica, mínima potencia, se obtiene que el transmisor RN Ganeta 1 podrá enviar sus datos con un SF de 7 durante toda subida útil. En el caso contrario RN Ganeta 2 permite la recepción de sus datos con un SF de 7 a máxima potencia mientras este valor debe aumentar a 10 en el caso crítico. De esta forma se concluye que para poder recibir sus datos debe estar configurado con un SF 10.

Observando el mapa de cobertura de aprecia que en puntos más cercanos al receptor no existe cobertura, mientras que en puntos alejados sí. Para el análisis de este suceso se ha obtenido el radio enlace entre RN Ganeta 2 y el receptor Ganeta.

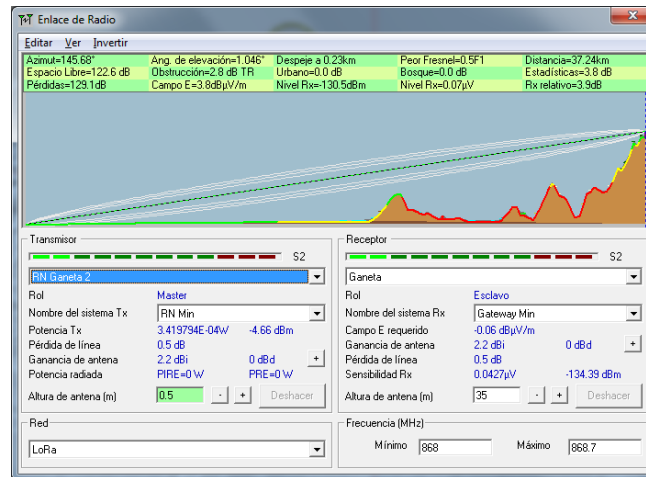


Ilustración 32 - Enlace entre RN Ganeta 2 y receptor Ganeta

En el radio enlace se observa que el punto de transmisión se encuentra en el agua y que no hay ningún elemento orográfico que obstaculice la recepción. A diferencia de lo que ocurre en los puntos cercanos al receptor que presentan una orografía montañosa. Sumada esta situación a que en Ganeta únicamente se ha colocado una antena receptora y que esta antena es un dipolo con una ganancia de 2,21dBi siendo su diagrama de radiación omnidireccional hace que la situación se agrave.

Además del radio enlace se obtiene la potencia recibida por el receptor en cada punto lo que ratifica lo observado en el mapa de cobertura.

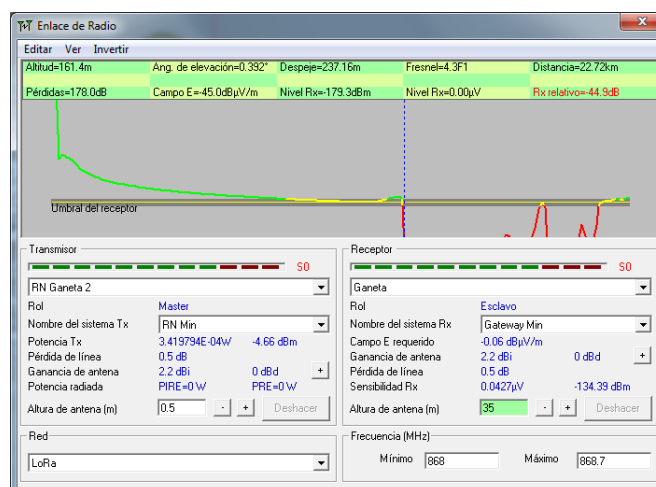


Ilustración 33 - Recepción según posicionamiento a mínima potencia

Una posible solución a este problema puede ser el aumento de la potencia de transmisión de los sensores. Bajo esta situación se ha obtenido la información de este nuevo radio enlace.

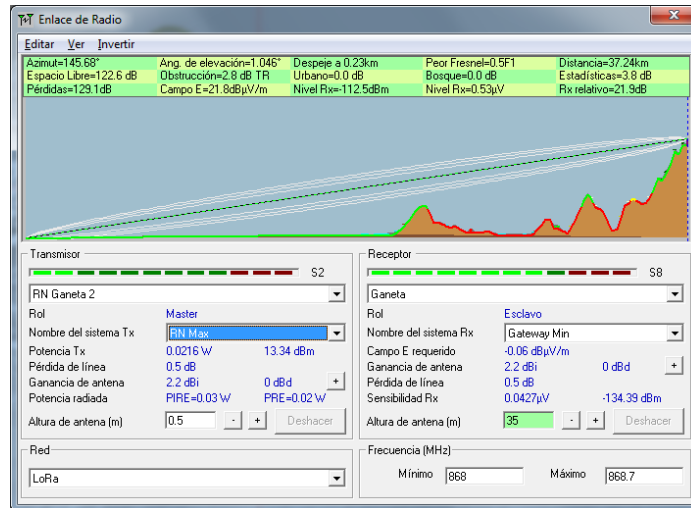


Ilustración 34 - Enlace RN Ganeta2 a receptor Ganeta a máxima potencia

Es cierto que la potencia recibida es mayor, pero el problema de no recibir información en los puntos cercanos no ha mejorado.

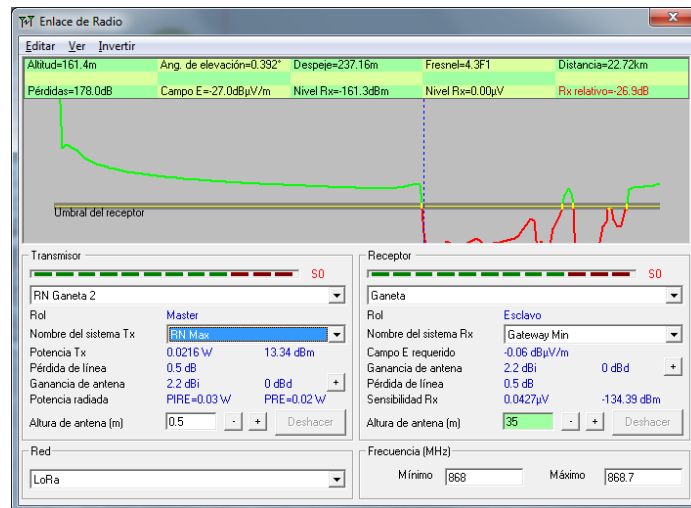


Ilustración 35 - Recepción según posicionamiento a máxima potencia

En esta situación se puede afirmar que para mejorar la situación es necesario el cambio de los elementos radiantes de los puntos receptores. La sustitución del dipolo por antenas sectoriales que permiten su configuración tanto en azimut como elevación permitiría mejorar la cobertura espacial aunque disminuiría el alcance

Otro aspecto a tener en cuenta es la posible diferencia entre los valores teóricos y los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio.

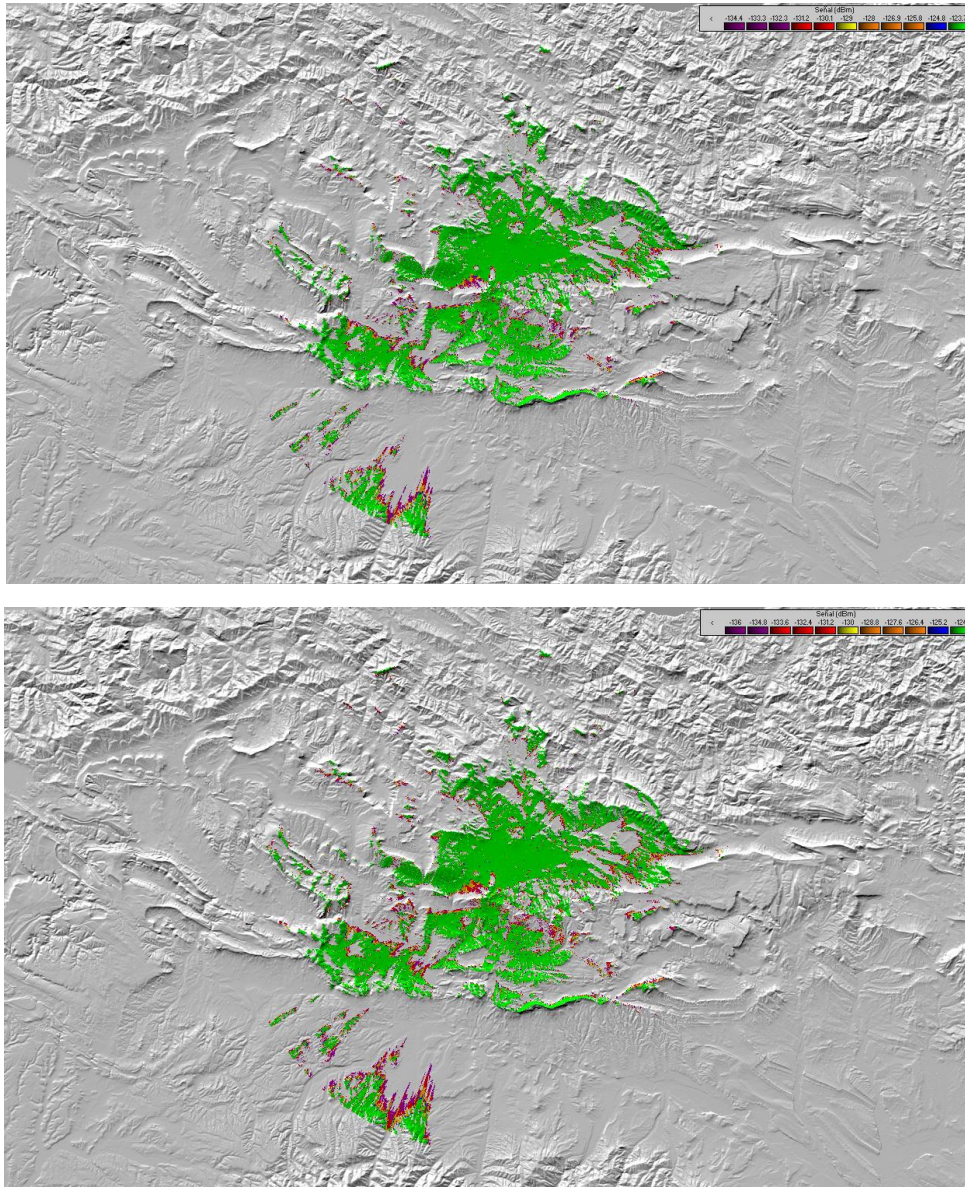


Ilustración 36 - Comparativa de alcance teórico y práctico a máxima potencia

Si los sensores envían sus datos a máxima potencia no se parecía gran diferencia entre unos resultados y otros. Pero el objetivo de este trabajo es conocer la configuración que permita la captación de datos en cualquier circunstancia mientras el dispositivo este operativo, por ello es de interés estudiar el caso crítico de funcionamiento.

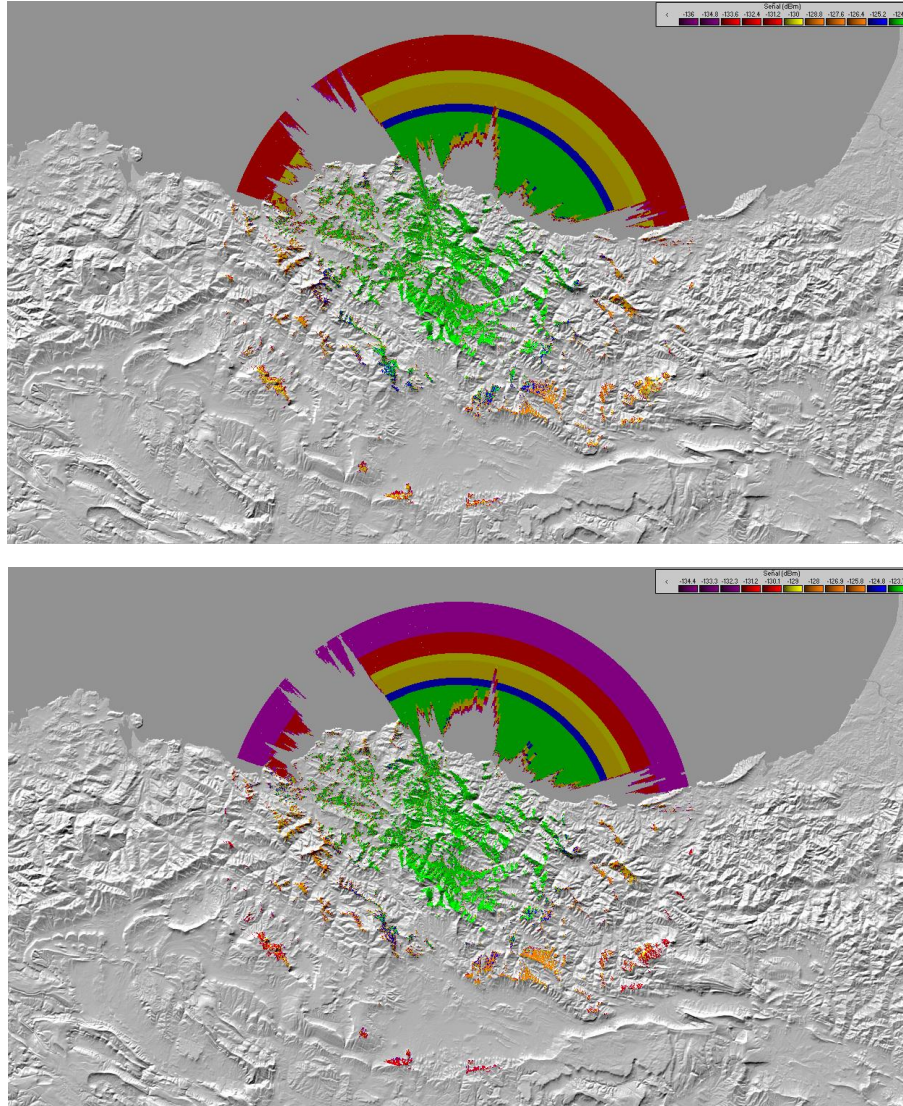


Ilustración 37 - Comparativa de alcance teórico y práctico a mínima potencia

Para este caso se ha utilizado el punto receptor de Oiz Observando estas dos imágenes si se parecía una diferencia entre los valores teóricos y prácticos. Siendo estos últimos los más restrictivos como era de esperar. Gracias a tener un módulo comercial se optimizar los valores teóricos para estos dispositivos en concretos.

También es destacable que depende del entorno en el que se encuentre el receptor la divergencia entre los diferentes valores.

La comprobación uno a uno de cada uno de los dispositivos se hace inviable por lo que es necesario conocer la diferencia entre los valores teóricos y prácticos y comprobar si se invalidan entre ellos o no.

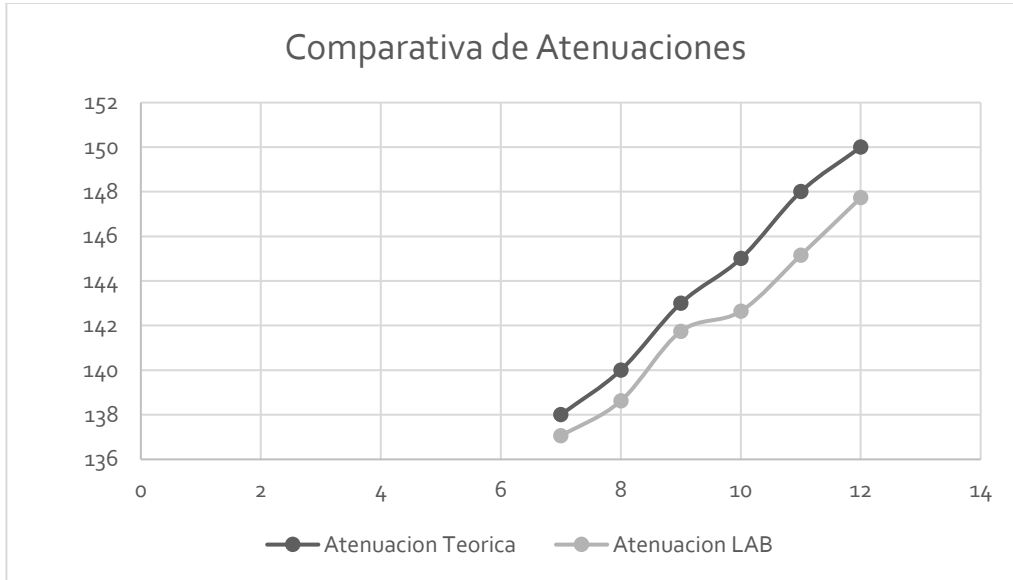


Ilustración 38 - Comparativa de atenuaciones

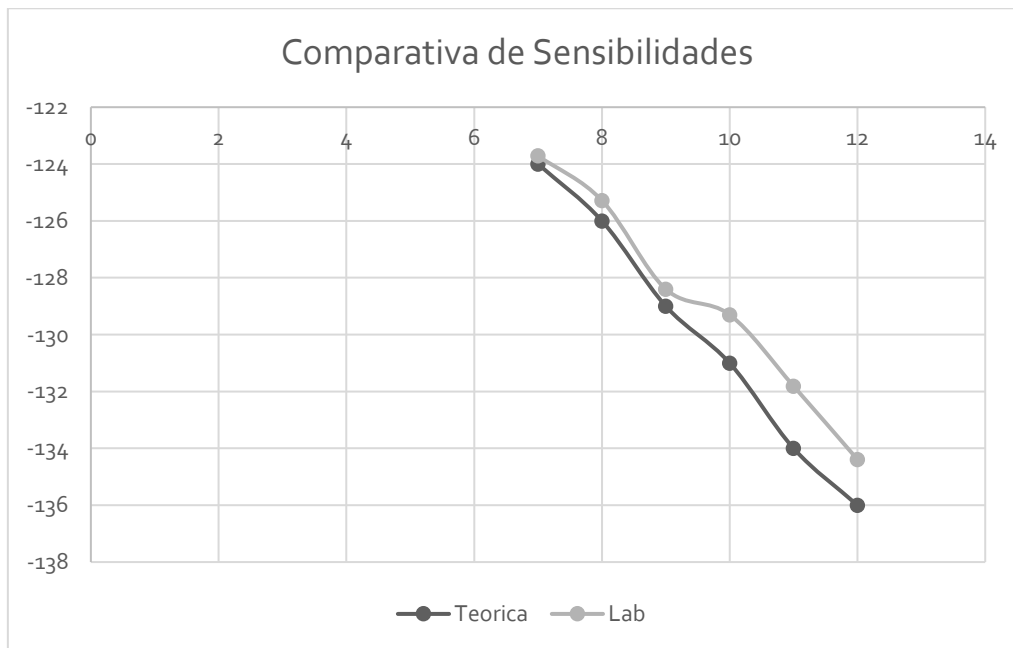


Ilustración 39 - Comparativa den sensibilidades

Analizando las gráficas se observa que, aunque los valores sean dispares la progresión de los mismos es similar por lo que ambos valores son válidos si bien es cierto que es recomendable añadir un margen de seguridad si se utilizan los valores teóricos ya que los experimentales han sido obtenidos a partir de los resultados del comportamiento de los dispositivos reales.

Como punto final a este análisis los cálculos realizados hasta ahora permiten conocer cuál es número máximo de tramas para este tipo de sensores. La placa sobre la que están colocado el módulo LoRa tiene 2 sensores, temperatura y luminosidad. En cada trama que se envía hay 16Bytes de información relativa a estos sensores. Conocida la carga de información y las expresiones matemáticas que rigen el comportamiento del radio enlace nos ha permitido conocer su comportamiento el número máximo de tramas a enviar en un día

SF	T Reposo (ms)	T Aire (ms)	T Símbolo (ms)	Bit Rate (bps)	Tramas diarias TTN Fair Access
7	6107,90	61,70	1,024	3417,97	486
8	10593,79	107,01	2,048	1953,13	280
9	21187,58	214,02	4,096	1098,63	140
10	35887,10	362,50	8,192	610,35	82
11	71774,21	724,99	16,384	335,69	41
12	143548,42	1449,98	32,768	183,11	20

Ilustración 40 - Comportamiento de la trama de información

Para este caso se ha utilizado el CRC de mayor valor, el estándar LoRa permite valores de CR de:

$4/5, 2/3, 4/7$ y $1/2$ una correcta configuración de este parámetro permite el envío de mayor información.

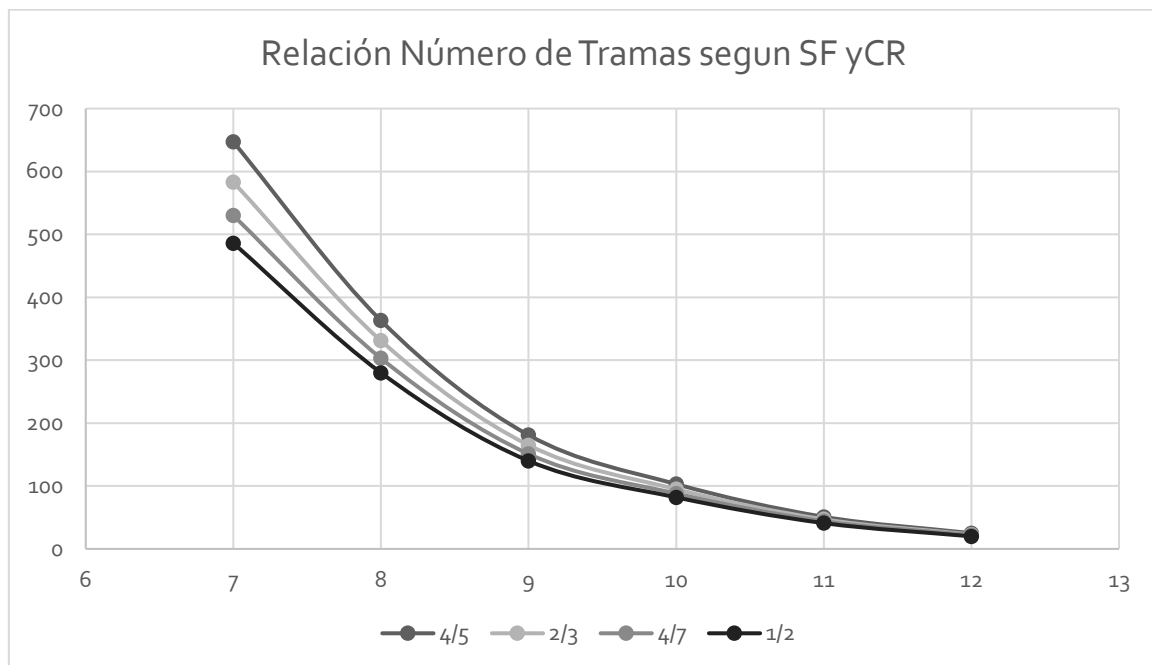


Ilustración 41 - Numero de Tramas sobre SF y CR

Como es previsible a mayor protección menor cantidad de información a enviar

Aspectos Económicos

En este apartado se ha estudiado el coste económico que implica la realización de este proyecto. Con ese fin se ha elaborado el siguiente presupuesto.

10 PRESUPUESTO

El presupuesto expone de forma clara y dividida en diferentes partidas los gastos realizados a lo largo del proyecto permitiendo saber en qué ha sido necesario invertir para llevar a cabo el proyecto.

10.1 DESGLOSE

10.1.1 Horas Internas

Este primer apartado sirve para conocer al mano de obra que ha sido necesaria para llevar a cabo el proyecto. En este apartado se distingue el personal, su cualificación, tasa horaria, tiempo dedicado y coste.

Responsable	Puesto	Tasa Horaria	Horas	Coste(€)
Rubén Sáenz Esteban	Ingeniero Junior	30	300	9000
Manuel M ^a Vélez Elordi	Ingeniero Senior	50	50	2500
Total Horas Internas				11500

Tabla 17 - Presupuesto: Horas Internas

10.1.2 Amortizaciones

Las amortizaciones corresponden los útiles que se encontraban a disponibles para ser usados en este proyecto, pero que no han sido comprados en exclusiva para su realización. Por ello se ha cargado el coste de haber tenido que utilizarlas durante el periodo necesario.

Útil	Coste Adquisición	Vida Útil	Tiempo de Uso	Coste (€)
Ordenador	1500	3 años	5 meses	209
Analizador de espectros	5.178,80	10 años	3 meses	129.47
Atenuador Agilent	853	10 años	3 meses	21,325
Total Amortizaciones				359,79

Tabla 18 - Presupuesto: Amortizaciones

10.1.3 Gastos Generales

Los gastos generales por el contrario si son elementos que se han tenido que comprar para el uso exclusivo del proyecto y que debe imputarse al presupuesto el coste de los mismos en su totalidad.

<i>Concepto</i>	<i>Coste</i>
<i>Kit de desarrollo</i>	521,44
<i>Atenuadores Teles</i>	132.57
<i>Total Gastos</i>	654.01

Tabla 19 - Presupuesto: Gastos Generales

10.2 RESUMEN

Con las diferentes partidas del presupuesto desglosadas en detalle el resumen y coste total del proyecto ha quedado de la siguiente forma:

<i>Concepto</i>	<i>Coste</i>
<i>Horas Internas</i>	11500
<i>Amortizaciones</i>	359,79
<i>Gastos Generales</i>	654.01
<i>Subtotal</i>	12513,8 €

Tabla 20 - Presupuesto: Resumen

El coste total del proyecto ha sido de: **12513,8 €**

Conclusiones

11 CONSIDERACIONES FINALES

Este Trabajo Fin de Grado cuyo título es “Estudio de los parámetros principales de la tecnología LoRa para el despliegue de redes e implementación de servicios IoT en la CAV-EAE” ha obtenido a partir de un estudio teórico-práctico los parámetros principales que afectan al rendimiento de una posible red de tecnología LoRa.

Este estudio ha obtenido en primer lugar la relación entre la configuración utilizada con la cantidad de información que puede ser enviada. Además, se ha podido plasmar como afecta el entorno, potencia y SF al rendimiento y buen funcionamiento de una red LoRa.

La utilización de equipamiento real ha permitido conocer el comportamiento que presentan este tipo de dispositivos con una mayor exactitud que los datos que pueda ofrecer el fabricante. A partir de los cuales puede realizarse un proceso de ingeniería de simulación con el que se puede obtener el comportamiento de la red antes desplegarla. Ya que las pruebas reales son prácticamente inviables al tener una gran cantidad de dispositivos situados en diversos puntos en una geografía accidentada como es la de la CAV-EAE.

Con la realización de este proyecto se ha pretendido comprobar el comportamiento real de este tipo de dispositivos. Gracias a ello se puede apreciar la diferencia entre utilizar un tipo de parámetros teóricos o prácticos a la hora de desplegar una red, sobre todo en las situaciones más críticas. Por estas razones se considera el resultado obtenido como satisfactorio, al ser el comportamiento real similar al teórico presentado los equipos una alta inmunidad al ruido, así como una gran sensibilidad de recepción.

El uso de un programa como Radio-Mobile permite a partir de los sistemas que se han configurado realizar la simulación en cualquier lugar simplemente variando el mapa cartográfico que se le desea aplicar a cada red para la simulación.

Como continuación a este trabajo se puede optar por la optimización de la red con el fin de obtener diferentes objetivos como puede ser la cobertura espacial. Mediante la inserción de antenas sectoriales de mayor ganancia y configurando su tilt con el fin de apuntar a una zona de mayor extensión. Además puede estudiarse diferentes dispositivos de otro fabricante siguiendo la metodología de este trabajo y optar por la utilización de uno u otro en función del tipo de servicio que se pretenda ofrecer.

Fuentes de Información

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] – Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
<http://www.mincotur.gob.es/telecomunicaciones/espectro/Paginas/cnaf.aspx>
- [2] – Especificaciones de RN 248: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>
- [3] – Estándar LoRaWAN y especificaciones:
<https://www.lora-alliance.org/lorawan-for-developers>
- [4] - Low Power Wide Area Networks: An Overview:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7815384/>
- [5] – Características Trama LoRa
<http://www.sghosly.com/p/lor-a-is-chirp-spread-spectrum.html>
- [6] – Guía de diseño
https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide_STD.pdf
- [7] – Modelo de propagación Okumura-Hata
<http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/comunicaciones-moviles/contenidos/capitulo-3.-propagacion-en-comunicaciones-moviles-1>
- [8] – Radio Mobile: <http://www.ve2dbe.com/rmonline.html>
- [9] – Guía Radio Mobile <http://www.ipellejero.es/radiomobile/index.php>
- [10] – Posicionamiento centros Itelazpi:
<http://www.itelazpi.eus/eu/zer-egiten-dugu/broadcast/>
- [11] – Manual Kit LoRa: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001847A.pdf>

13 ANEXOS

13.1 ANEXO I: KIT LORA

El kit proporciona 2 dispositivos RN2483 además de un Gateway. En la página web de Microchip se encuentra disponible tanto los elementos software necesarios como las guías de utilización.

13.1.1 Elementos Hardware

13.1.1.1 Modulo LoRa



El dispositivo RN 2483 es un módulo que tiene implementado la tecnología LoRa. Sus frecuencias de operación son en las bandas 433/868 MHz, por lo que está diseñado para su utilización en Europa. Tiene implementado la pila de protocolos de clase A.

En la placa en la que está integrado se le suman 2 sensores de los que obtiene información, uno térmico y otro de luminosidad. Además, posee una pantalla LCD que facilita la configuración del módulo. Dentro de las posibles configuraciones destaca: El tipo de claves de acceso para acceder a la red ABP u OTAA, el periodo de envío de la información 5/10/30/60 minutos o la tasa binaria que se desea enviar.

Existe un menú que permite la navegar se forma sencilla por las características del chip. En ese menú se permite visualizar diversa información como puede ser el último mensaje enviado, visualizar la información que aportan los sensores, el periodo en el que envía una trama hacia el Gateway, etc. Su potencia de transmisión en RF es de 14dBm, en cumplimiento con las especificaciones descritas anteriormente.

Ilustración 42 - Modulo LoRa

Además, todos los diferentes parámetros que permite la tecnología LoRa son configurables desde el LoRaDevUtility

13.1.1.2 Gateway LoRa

Esta pasarela tiene 2 partes diferenciadas físicamente, el núcleo del dispositivo donde se encuentra la conexión Ethernet y la pantalla LCD que nos muestra información hacer del estado de la conexión y diferentes estadísticas sobre el canal de subida y bajada.

La otra tarjeta es la LoRa radio que permite la comunicación con los diferentes módulos. Que quieran acceder a la red, en este caso esta tanto la banda de 868 como 915MHz.

Se puede alimentar tanto desde la parte radio o core, aunque es recomendable utilizar la misma entrada para la alimentación.

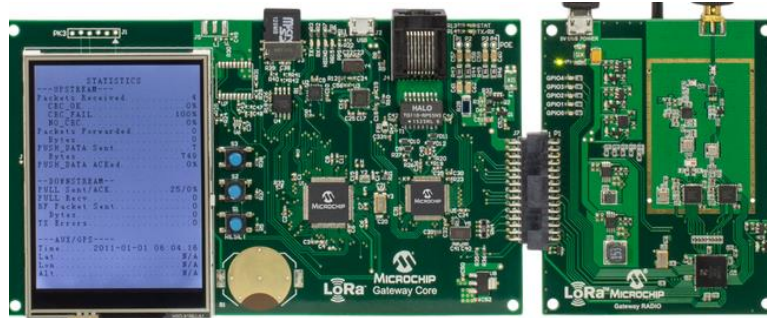


Ilustración 43 - Gateway Utilizado

13.1.2 Aplicación de Usuario LoRa

En los esquemas de la red que se han expuesto en las líneas superiores se observa el bloque servidor. En él se encuentra dentro de una máquina virtual el servidor encargado de la captación y almacenamiento de los datos. Para el visionado de los mismos se ha utilizado el programa apartado por el kit, LoRa Developer Utility.

Este es el programa que permite controlar desde un único punto toda la red LoRa y se utilizará como una aplicación de usuario. Se muestra el número de dispositivos que la conforman como de qué tipo son. Además, seleccionando cada dispositivo los informa y da la posibilidad de variar sus parámetros en función de ante qué tipo de dispositivo nos encontramos.

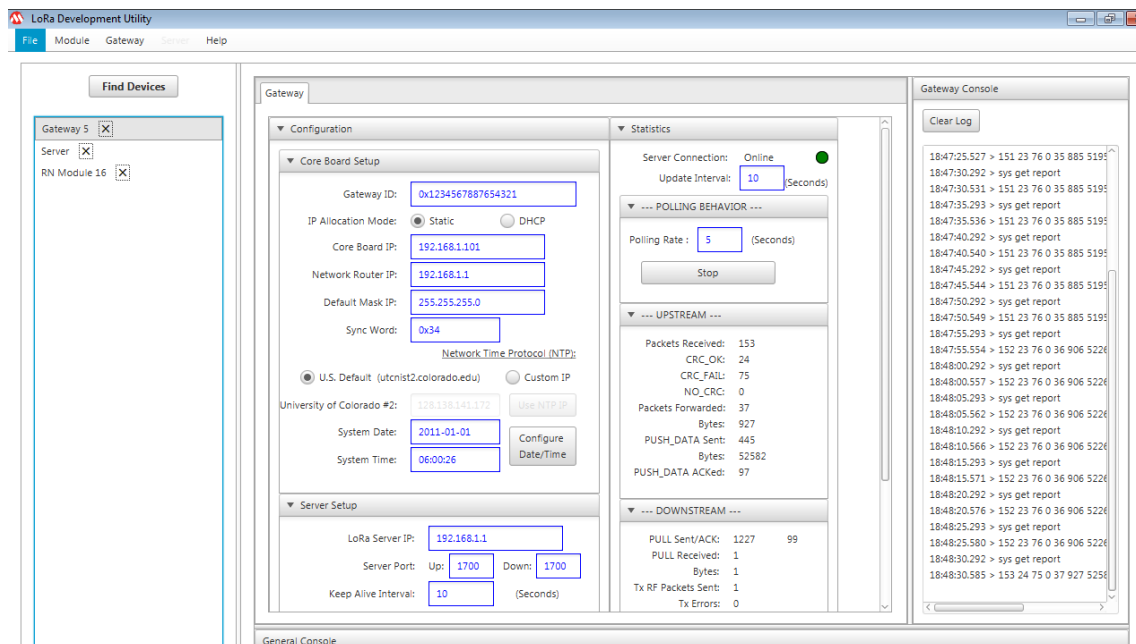


Ilustración 44 - Ventana del programa

En cuanto a los módulos se pueden variar multitud de parámetros: Ancho de banda, SF, canal RF, etc. La configuración de la pasarela consta básicamente las direcciones de red IP que se desean o el periodo en el que actualizara la información enviada al servidor. Por ultimo en los referido al servidor nos permite autorizar la inserción de nuevos módulos a la red por los diferentes mecanismos que existe en la tecnología LoRaWAN además de ofrecernos el tráfico de datos, el número de pasarelas o los módulos que hay conectados y por qué modo de acceso han sido conectados.

Dentro de la ventana la pasarela se muestra la información necesaria para su funcionamiento como un estadístico del tráfico que está soportando, por ejemplo. En cuanto a los parámetros configurables se tiene todo lo relativo a la configuración de la red IP además del periodo en el que se actualizarán y enviarán los datos recibidos al servidor para su almacenamiento en la base de datos.

La información que se proporciona acerca del servidor como es de esperar la información recibida y almacenada en la base de datos, especificando el dispositivo emisor, puerto de recepción y hora. También se muestra la cantidad de dispositivos que se encuentran conectados a la red LoRa, diferenciando el tipo de acceso que tienen, así como es tipo de dispositivo que es.

13.2 ANEXO II: CONFIGURACIÓN KIT LoRa

13.2.1 Requisitos

Este anexo tiene como objetivo servir como guía para una correcta y rápida configuración del kit de evaluación de LoRa. Para el funcionamiento del mismo es necesario [11]:

- Máquina Virtual – [VM Virtual Box](#)
- [Docker Toolbox](#) – Contenedor del servidor
- [LoRa Suite](#) – Entorno para poder configurar la red LoRa
- Ordenador que permita máquinas virtuales de 64 bits (Con permisos de administrador)

La máquina virtual no es necesaria descargarla, en la instalación de Docker Toolbox se descargará automáticamente si no se tiene instalada en el PC.

13.2.2 Proceso de instalación y configuración

13.2.2.1 Instalación

Para la instalación de los diferentes programas es convenientes seguir el siguiente orden:

1. LoRa Suite
 - 1.1. Application
 - 1.2. Java
2. Docker Toolbox
3. Máquina Virtual

Dentro de cada programa se debe realizar lo que se especifica en la guía.

13.2.2.2 Configuración

Para una correcta configuración de la red el importante seguir las siguientes instrucciones.

13.2.2.2.1 Conexión Ethernet

El primer paso es desconectarse de internet, para conectarse a una red local en la que el PC actuará de servidor con la dirección 192.168.1.1.

Obtener una dirección IP automáticamente
 Usar la siguiente dirección IP: _____

Dirección IP:

Máscara de subred:

Puerta de enlace predeterminada:

Ilustración 45 - Direccionamiento IP

13.2.2.2.2 Inicio Máquina Virtual

Antes de poner en marcha hay que asegurarse de que nuestra máquina virtual tenga una red NAT y tenga habilitados para el "port forwarding" los puertos 1500,3306 y 5000.

Nombre	Protocolo	IP anfitrión	Puerto anfitrión
Customer Server Traffic	UDP		5000
Gateway Traffic	UDP		1700
MySQL Traffic	TCP		3306
ssh	TCP	127.0.0.1	50212

Ilustración 46 - Re-envío de puertos

Al dejar las direcciones IP en blanco se habilita a la máquina virtual que permita el acceso de cualquier IP externa de nuestro PC a cualquier IP que tome el servidor. Con el re-envío de puertos habilitado se inicia la máquina virtual. Esperando hasta que en la consola del servidor aparezca lo siguiente.

13.2.2.2.3 Docker Toolbox

A continuación, se procede a iniciar el Docker Toolbox que permite configurar el servidor de una manera más sencilla. Se comprueba que la imagen este “cargada” en el programa.

```

docker is configured to use the default machine with IP 192.168.99.100
For help getting started, check out the docs at https://docs.docker.com

Start interactive shell

U103859+Corky@U103859 MINGW64 ~
$ docker images
REPOSITORY          TAG          IMAGE ID          CREATED
mchplora            1.2         36173b91626b     24 months ago
341MB
U103859+Corky@U103859 MINGW64 ~
  
```

Ilustración 49 - Imagen del servidor cargada

13.2.2.2.4 LoRa Suite

Con este programa se puede configurar y monitorizar de manera sencilla todos los aspectos de nuestra red LoRa. Tanto la pasarela como los módulos deben conectarse vía USB al PC para poder configurarse, si es la primera vez que se van a conectar al PC hay que hacerlo conectados a internet para que puedan instalar los drivers necesarios, de otra forma el programa LoRa Suite no los reconocerá.

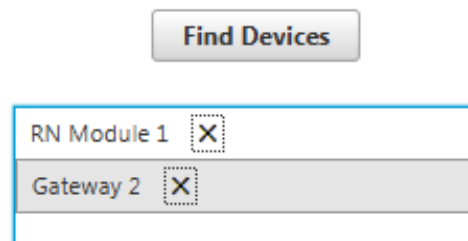


Ilustración 50 - Dispositivos conectados a la red

Es habitual que una vez que se reconozcan tanto el Gateway como el módulo, que el Gateway no se comunique correctamente con el servidor y nos aparezca el siguiente indicativo el estado del servidor.

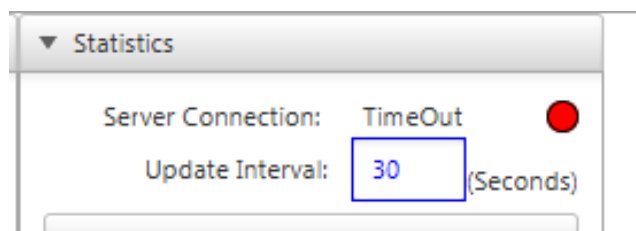


Ilustración 51 - Servidor un insertado en la red

Esto ahora mismo ocurre debido a que no se ha ejecutado la imagen que contiene al servidor LoRa, únicamente se ha ejecutado la máquina virtual y el contenedor, Docker, en el que va a estar almacenado.

13.2.2.2.5 Ejecución de la imagen y actualización de la red

Se vuelve al Docker Toolbox para ejecutar la imagen que se ha creado para almacenar el servidor. Una vez ejecutado debe aparecer el nombre dado al servidor como confirmación de una correcta ejecución.

```
U103859+Corky@U103859 MINGW64 ~  
$ docker restart servidor_lora  
servidor_lora
```

Ilustración 52 - Reinicio del servidor

Al regresar al LoRa Suite sigue apareciendo el TIME-OUT, pero si en la pantalla del Gateway aparece en estado ONLINE es que la conexión con el servidor es correcta. Para cambiar esa situación en el programa y asegurar que todo está en correcto funcionamiento se debe activar el POLLING BEHAVIOR del Gateway que lo habilita para estar a la escucha. En ocasiones también se debe variar el intervalo de actualización de la conexión con el servidor para que se perciba el cambio realizado en el servidor.

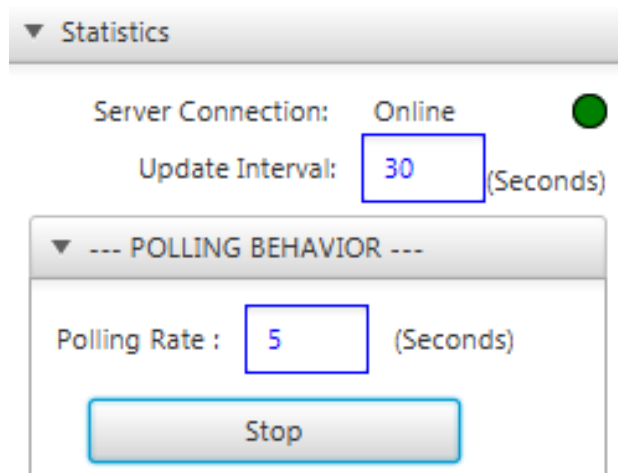


Ilustración 53 - Servidor listo para la recepción de datos

Por último, se añade el servidor a nuestra red en el LoRa Suite y le asignamos la dirección 192.168.1.1. Si la versión del servidor ha variado de Not Connected a R2.2.1 la vinculación al LoRa Suite se ha hecho de forma correcta

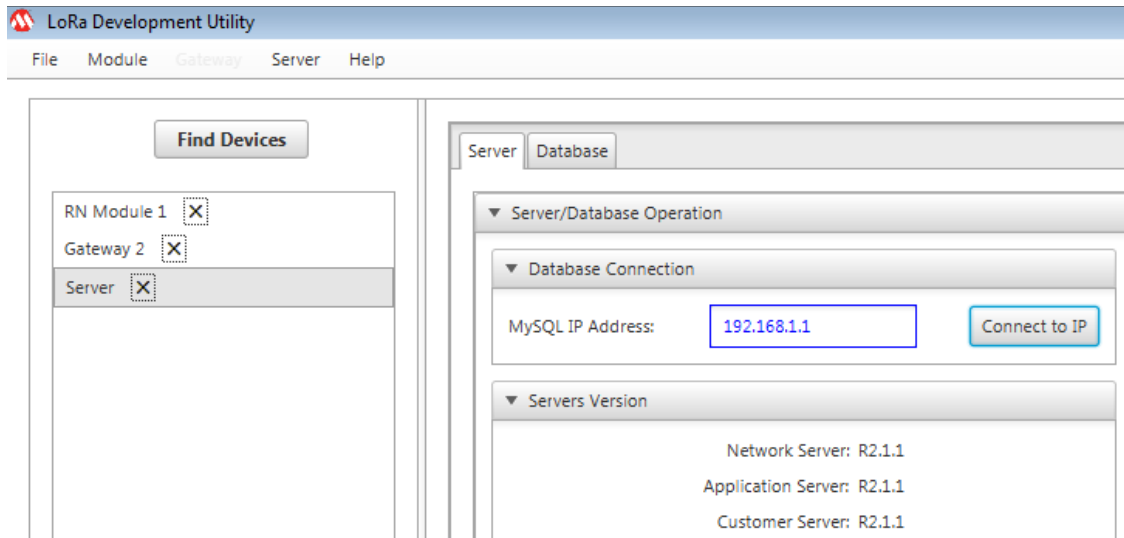


Ilustración 54 - Dirección IP del servidor

13.2.2.3 Envío de un mensaje Modulo-Gateway-Servidor

Si los pasos previos se han realizado de la forma correcta se pueden enviar mensajes desde el modulo hasta el servidor pasando por la pasarela. Antes de enviar cualquier mensaje es recomendable comprobar que el servidor ha detectado que la red está compuesta por un Gateway y un módulo.

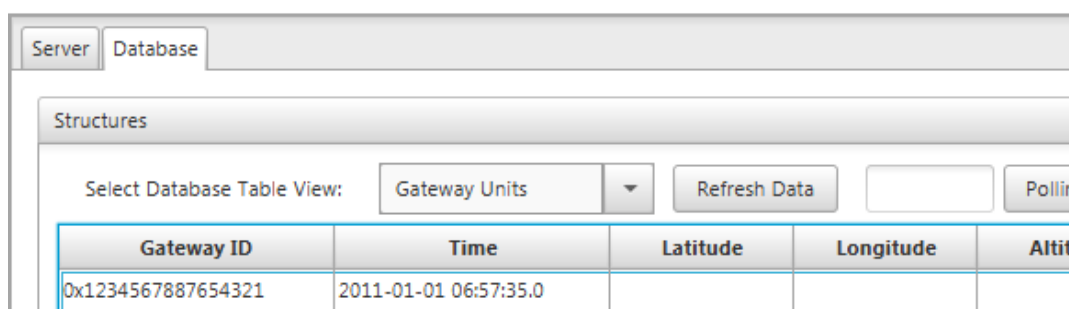


Ilustración 55 - Gateways insertados en la red

Los módulos por defecto se conectan a la pasarela a través del mecanismo ABP, por lo que su información esta almacenada en ABP Devices

DevEUI	AppEUI	DevAddr	Network Session Key
0x1A5EBF	0x0	0x1A5EBF	0x2b7e151628aed2a6abf7158809cf4f3c

Ilustración 56 - Módulos LoRa insertados en la red

13.2.2.3.1 Registro y del módulo en la red y habilitación de canal

Con el procedimiento anterior únicamente hemos conectado los equipos a la red, para que el Gateway envíe mensajes al servidor no es necesario ninguna acción más ya que su comunicación es vía Ethernet; pero el módulo debe sincronizarse con el Gateway para el envío de datos.

Esa sincronización está dividida en 2 acciones, la habilitación de un canal en la banda de 868MHz y el procedimiento de registro entre módulo y Gateway. El registro se realiza simplemente pulsando JOIN en la pestaña LoRaWAN del módulo.

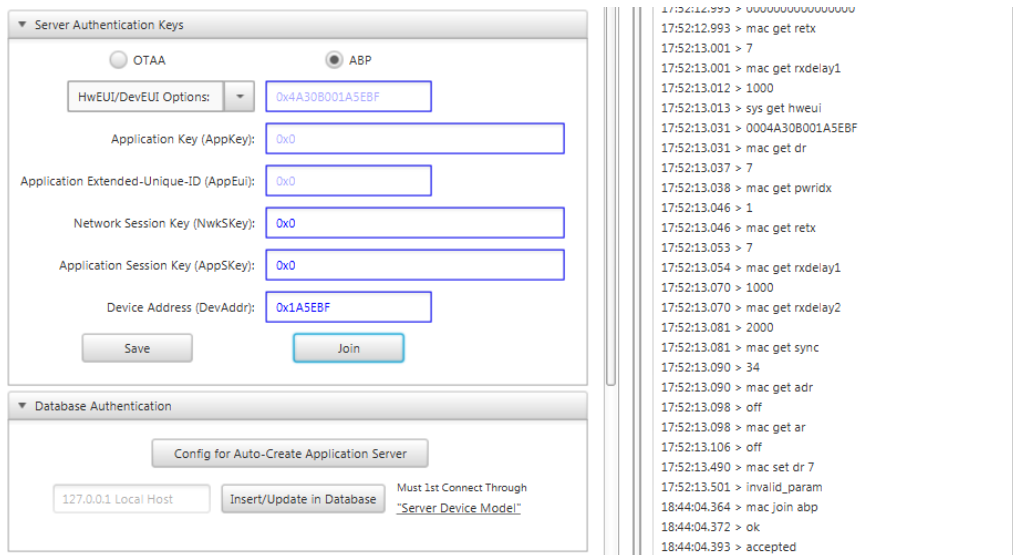


Ilustración 57 - Configuración de los parámetros de acceso

La habilitación del canal se hace desde la pestaña MAC Channel del módulo. En nuestro caso se ha habilitado el canal o a una frecuencia de 868,1MHz

Tras estos pasos es posible enviar el mensaje desde el módulo LoRa al servidor.

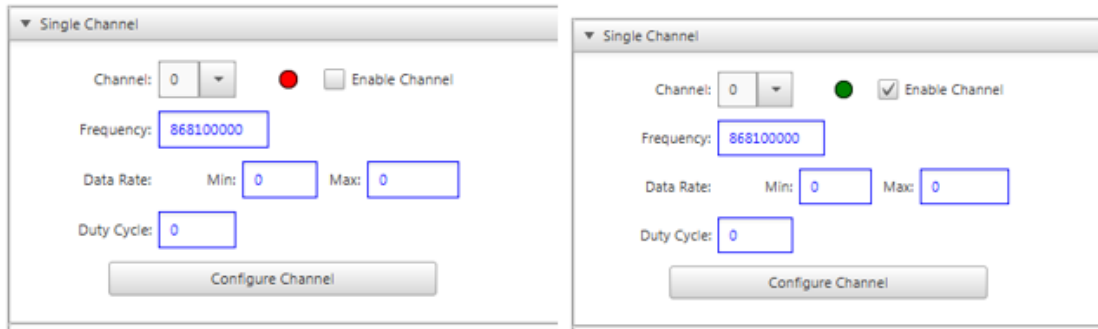


Ilustración 58 - Habilitación del canal de comunicación

13.2.2.3.2 Envío de mensaje

Para enviar un mensaje de prueba podemos acceder a la pestaña LoRaWAN /Communication en la que podemos enviar un mensaje ASCII en cualquier momento, para la comunicación seleccionamos el puerto 125 con el data rate y power index que se muestran en la imagen.

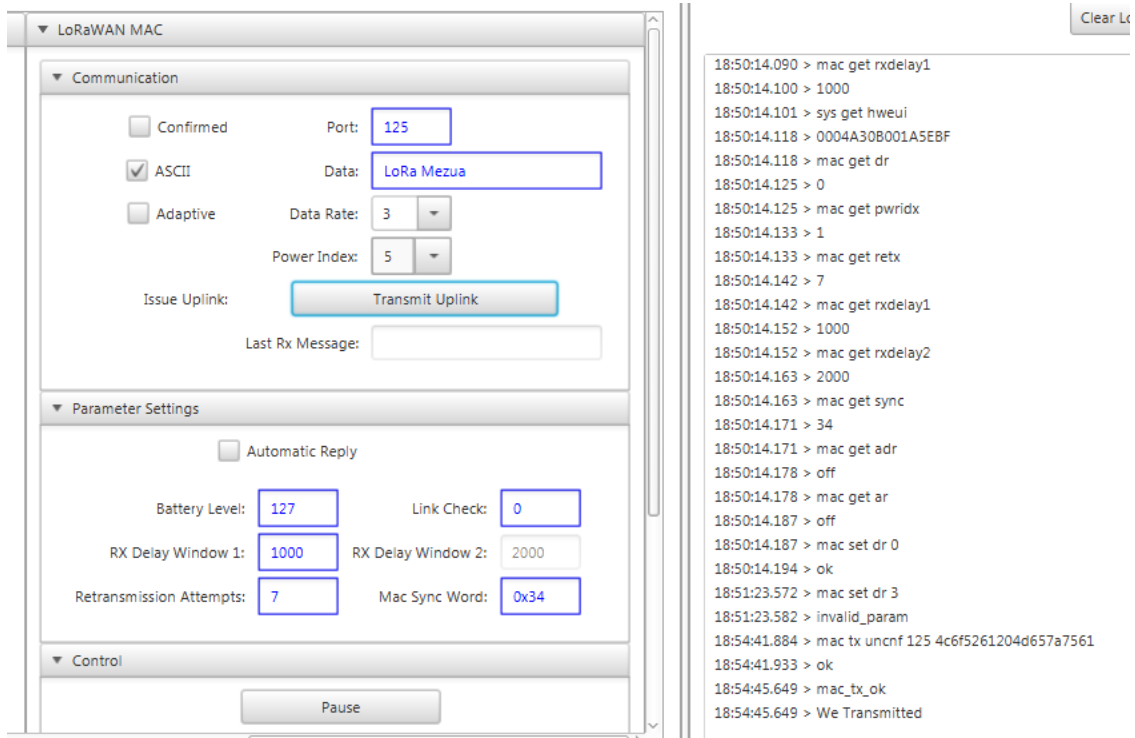
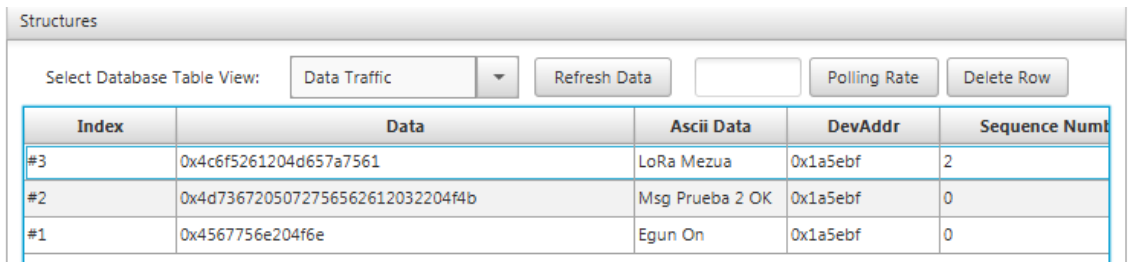


Ilustración 59 - Envío de mensaje tipo ASCII

Para asegurarnos que el servidor ha recibido el dato enviado correctamente en el menú Server/Database en la opción de data traffic se muestra toda la información que ha llegado desde el Gateway



Index	Data	Ascii Data	DevAddr	Sequence Num
#3	0x4c6f5261204d657a7561	LoRa Mezua	0x1a5ebf	2
#2	0x4d7367205072756562612032204f4b	Msg Prueba 2 OK	0x1a5ebf	0
#1	0x4567756e204f6e	Egun On	0x1a5ebf	0

Ilustración 60- Datos recibidos

Si todo se ha realizado correctamente la red está lista para usar y realizar las pruebas necesarias.

13.2.2.4 Desconexión de la red

La desconexión de la red y de los quipos es un proceso importante para que cuando se vuelva a configurar la red no se tenga ningún problema. Los pasos a seguir son los siguientes.

1. Desconexión de los equipos desde LoRa Suite y cierre del mismo, sin desenchufar el cable de red ni los UBS.
2. Abortar la ejecución de la imagen, tras comprobar que se ha abortado correctamente cerrar Docker Toolbox.

```

h103859+Gorky@h103859 MINGW64 ~
$ docker stop servidor_lora
servidor_lora
  
```

Ilustración 61 - Desconexión del servidor

3. Comprobar en la pantalla del Gateway que se encuentre en TIME-OUT
4. Forzar apagado de la máquina virtual y cerrar VM Virtual Box
5. Desconectar tanto modulo como Gateway
6. Volver a conectar el equipo a la red
7. Apagar el equipo.

13.2.3 Inserción de un módulo en la red

En primer lugar, se debe informar al servidor de que un nuevo dispositivo va a ser introducido en la red, para ello dentro de las opciones del servidor se introducen los datos necesarios para el acceso tipo ABP en la tabla correspondiente.

Device Address- 0x42
 Network Session Key – 0x99
 Application Session Key – 0x87

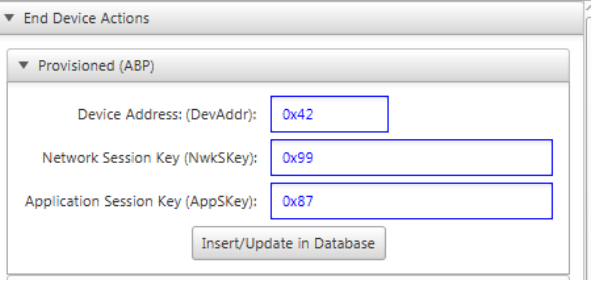
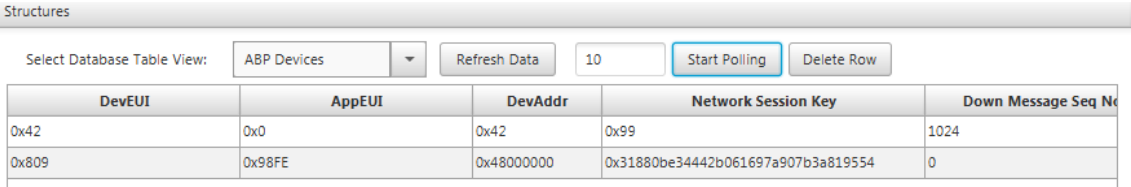


Ilustración 62- Datos correspondientes al modulo

Tras insertarlo en la base de datos comprobamos que se encuentre en ella.



DevEUI	AppEUI	DevAddr	Network Session Key	Down Message Seq N
0x42	0x0	0x42	0x99	1024
0x809	0x98FE	0x4800000	0x31880be34442b061697a907b3a819554	0

Ilustración 63 - Dispositivos registrados en la BD

El servidor ya está preparado para permitir el acceso a la red LoRa al módulo que presente estas credenciales, por lo que el único paso que queda por realizar para poder enviar tramas es identificar al módulo con las credenciales anteriores.

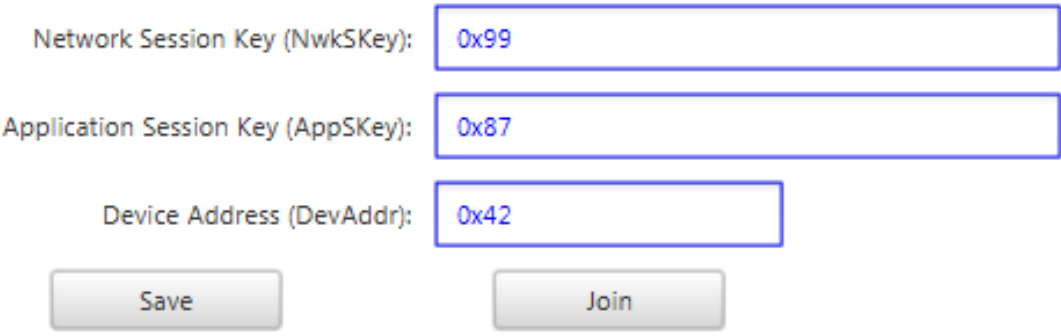


Ilustración 64- Credenciales de acceso

Una vez escritas las credenciales se pulsa JOIN y nuestro modulo ya es parte de la red. Para la posterior inserción bajo el mecanismo de acceso ABP de más módulos basta con seguir los pasos anteriores con diferentes valores para las credenciales.

Si se desea volver a conectar los módulos a la red, ya sea por fin de la batería, desconexión de la red o por haberlos apagado, basta con seleccionar el tipo de acceso ABP en el panel de control que tiene el propio modulo incorporado.

13.3 ANEXO III: VALIDACIÓN DE EQUIPOS

En este punto se pretende comprobar que los dispositivos que conforman el kit funcionan de forma correcta y que siguen la estructura y características de una red de LPWA expuesta con anterioridad. Para este fin se realizarán 4 configuraciones distintas con el objetivo de comprobar la validez de los equipos.

13.3.1 Redes utilizadas

13.3.1.1 3 Dispositivos en un PC

La primera prueba a realizar es el envío de una trama LoRa de código ASCII desde el módulo LoRa hasta el servidor, para su posterior visualización en la base de datos. El servidor está ejecutándose dentro una máquina virtual y la forma de acceder al a base de datos será a través de la interfaz proporcionada por el LoRa Suite.

Tanto el módulo y la pasarela están conectadas vía USB para su alimentación. El esquema de la configuración utilizada es el siguiente:

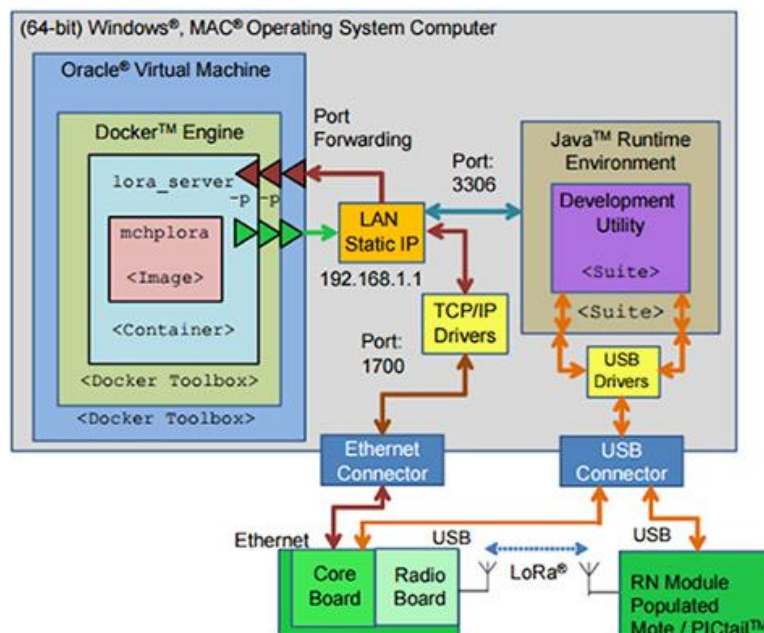


Ilustración 65 - Configuración de red propuesta en el kit

Para el envío de una trama con un texto en ASCII seguimos los pasos de la imagen inferior dentro del a configuración del modulo

▼ LoRaWAN MAC

▼ Communication

Confirmed Port: 125

ASCII Data: Prueba PC1

Adaptive Data Rate: 0

Power Index: 5

Issue Uplink: Transmit Uplink

Last Rx Message:

Ilustración 66 - Envío de mensaje con SF 12

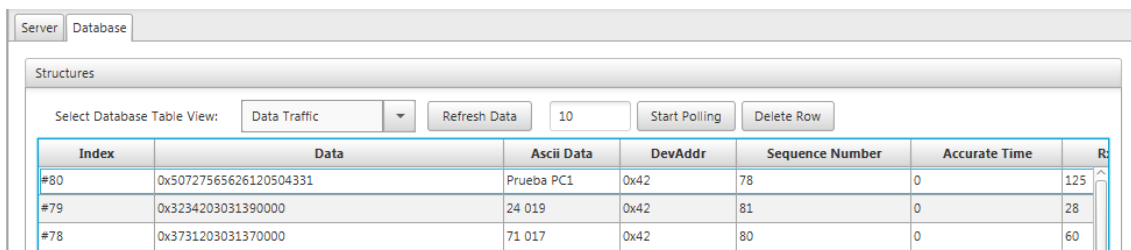
Cuando se desee enviar la trama se pulsa TRANSMIT UPLINK, se puede comprobar que la transmisión del dato ha sido correcta por parte del módulo visualizando en la ventana CONSOLE LOG la sentencia We Transmitted.

El siguiente elemento de la red por donde deben pasar los mensajes enviados es el Gateway, en este kit de desarrollo se nos proporciona una pasarela que cuenta con una pantalla en la propia placa que muestra el estado de la red IP y un estadístico tanto del canal de recepción como de transmisión. Esta información también está disponible desde el programa LoRa Suite en la pestaña correspondiente a como se muestra en la imagen inferior. Tanto la información mostrada en pantalla y la visualizada en el programa deben coincidir.

<p>▼ --- UPSTREAM ---</p> <p>Packets Received: 68</p> <p>CRC_OK: 35</p> <p>CRC_FAIL: 64</p> <p>NO_CRC: 0</p> <p>Packets Forwarded: 24</p> <p>Bytes: 506</p> <p>PUSH_DATA Sent: 294</p> <p>Bytes: 34760</p> <p>PUSH_DATA ACKed: 91</p>	<p>▼ --- UPSTREAM ---</p> <p>Packets Received: 65</p> <p>CRC_OK: 35</p> <p>CRC_FAIL: 64</p> <p>NO_CRC: 0</p> <p>Packets Forwarded: 23</p> <p>Bytes: 483</p> <p>PUSH_DATA Sent: 283</p> <p>Bytes: 33433</p> <p>PUSH_DATA ACKed: 91</p>
<p>▼ --- DOWNSTREAM ---</p> <p>PULL Sent/ACK: 545 99</p> <p>PULL Received: 10</p> <p>Bytes: 10</p> <p>Tx RF Packets Sent: 10</p> <p>Tx Errors: 0</p>	<p>▼ --- DOWNSTREAM ---</p> <p>PULL Sent/ACK: 526 99</p> <p>PULL Received: 10</p> <p>Bytes: 10</p> <p>Tx RF Packets Sent: 10</p> <p>Tx Errors: 0</p>

Ilustración 67 - Estadístico del gateway

El último elemento de la red es el servidor en que debe almacenarse toda la información enviada desde los sensores. La forma más fácil de acceder a la base de datos donde se almacena esa información es desde la interfaz que proporciona LoRa Suite en su apartado de Database donde se puede acceder a toda la información recogida por el servidor. En la imagen se puede comprobar que el mensaje enviado *Prueba PC1* ha sido recibido y almacenado en la base de datos



Index	Data	Ascii Data	DevAddr	Sequence Number	Accurate Time	Rx
#80	0x50727565626120504331	Prueba PC1	0x42	78	0	125
#79	0x3234203031390000	24 019	0x42	81	0	28
#78	0x3731203031370000	71 017	0x42	80	0	60

Ilustración 68 - Recepción datos prueba 1

Con la configuración actual de la red no se puede asegurar que la transmisión de datos entre equipos sea vía LoRa entre el módulo y la pasarela, como tampoco se puede afirmar que la transmisión de datos entre pasarela y servidor sea vía Ethernet; al estar todos conectados vía USB al mismo PC. Es por ello que se hace necesaria la comprobación de los equipos con distintas configuraciones de red.

13.3.1.2 Modulo en PC diferente

Esta prueba tiene como objetivo validar el envío de datos vía RF con tecnología LoRa, por lo que se alimentara al módulo LoRa desde otro PC vía USB donde también se instalada el programa LoRa Suite. Quedando la arquitectura de nuestra red de la siguiente forma.

Si el modulo va a ser utilizado de esta forma únicamente podrá enviar la información que proporcionan los sensores, temperatura y luminosidad en este caso. Este envío de información puede ser periódico entre 5 y 60 minutos o se puede elegir el momento de transmisión que se desee desde el panel de control del módulo.

Para este caso en concreto se realizará una combinación de ambas posibilidades para comprobar en un único estudio el correcto funcionamiento del sistema, así como de haber realizado una correcta configuración de red. Tras comprobar que el sistema ha funcionado de forma correcta accedemos a la base de datos del servidor.

Index	Data	Ascii Data	DevAddr	Sequenc...	Accur...	Rx Port	Time
#79	0x3234203031390000	24 019	0x42	81	0	28	2018-03-27 09:13:29.0
#78	0x3731203031370000	71 017	0x42	80	0	60	2018-03-27 09:11:21.0
#77	0x3238203031390000	28 019	0x42	79	0	27	2018-03-27 09:09:17.0
#76	0x3233203031350000	23 015	0x42	78	0	9	2018-03-27 09:05:00.0
#75	0x3739203031380000	79 018	0x42	77	0	149	2018-03-27 09:01:17.0
#74	0x3331312030313700	311 017	0x42	76	0	78	2018-03-27 08:56:16.0
#73	0x3334332030313900	343 019	0x42	75	0	133	2018-03-27 08:51:16.0
#72	0x3633203031390000	63 019	0x42	74	0	97	2018-03-27 08:46:00.0
#71	0x3130372030323200	107 022	0x42	73	0	59	2018-03-27 08:45:38.0
#70	0x3131362030323200	116 022	0x42	72	0	110	2018-03-27 08:40:18.0

Ilustración 69 - Recepción datos prueba 2

Se observa que se han recibido los datos provenientes del RN1 y se han registrado en la base de datos. Es apreciable también, observando el tiempo de recepción, que se han recibido tanto los datos enviado de forma periódica y automáticamente por parte del dispositivo como los datos que se han querido enviar a través del panel de control del módulo.

Tras los datos obtenidos por parte del servidor y los datos mostrados en el estadístico de la pasarela durante la ejecución de esta prueba, se afirma que la transmisión y recepción de datos entre modulo y pasarela se realiza vía LoRa.

13.3.1.3 3 Dispositivos en PCs diferentes

La prueba que se realiza a continuación persigue el objetivo de verificar que la información recibida por la pasarela es enviada hacia el equipo servidor mediante el cable de red Ethernet. Para ello se conecta vía USB a un tercer PC, se podría conectar directamente a la red, pero se toma esta alternativa para poder monitorizar los paquetes que procesa la pasarela.

Como en los apartados anteriores el módulo enviará datos de forma tanto periódica como aleatoria a través de su panel de control. Tras haber enviado varios mensajes hacia el servidor se comprueba el almacenamiento de los datos enviados

#87	0x3538203032340000	58 024	0x42	108	0	102	2018-04-17 16:16:58.0
#86	0x3237322030323400	272 024	0x42	107	0	19	2018-04-17 16:15:09.0
#85	0x3331392030313900	319 019	0x42	97	0	66	2018-04-17 14:50:12.0
#84	0x3837203032300000	87 020	0x42	96	0	115	2018-04-17 14:35:12.0
#83	0x3131342030323200	114 022	0x42	95	0	106	2018-04-17 14:35:04.0
#82	0x3330372030313900	307 019	0x42	95	0	48	2018-04-17 13:36:46.0
#81	0x3132372030323400	127 024	0x42	93	0	46	2018-04-17 13:21:23.0

Ilustración 70 - Recepción de datos prueba 3

Al poder visualizar los datos que han sido enviados por el módulo en la base de datos se verifica que el envío de datos entre la pasarela y el servidor se realiza por medio del cable de red Ethernet, al ser el único enlace tanto físico como de tipo inalámbrico existente entre ellos.

Con las pruebas realizadas hasta ahora se puede afirmar que el kit de desarrollo permite la creación de redes de IoT en su configuración más simple: Módulo, pasarela y servidor. Solo queda por comprobar la escalabilidad de la red, insertando nuevos módulos de forma sencilla.

13.3.1.4 2 Módulos en la red

En esta última variación de red se pretende comprobar que la pasarela es capaz de procesar la información proveniente de distintos módulos, RN₁ y RN₂. Además, también se busca que el servidor sea capaz de diferenciar entre los datos recibidos desde la pasarela, pero con un origen en distintos módulos. La arquitectura final a estudio en este apartado es la siguiente.

En primer lugar, se debe registrar al RN₂ en la red, con el procedimiento seguido al inicio de este apartado, en nuestro caso se le atribuyen las siguientes credenciales:

Device Address- 0x52
 Network Session Key – 0x89
 Application Session Key – 0x77

Estos datos se incluyen tanto en la base de datos del servidor como en el módulo RN₂. Registrándose en primer lugar en el servidor y después en el módulo para poder ser capaz de unirse a la red.

Una vez que el módulo haya accedido correctamente a la red se configuran tanto el RN1 como el RN2 de tal manera que envíen datos cada 5 minutos. Los módulos estarán así durante media hora para comprobar el correcto funcionamiento de la pasarela al recibir información de distintos dispositivos y de transmitirlos al servidor. El servidor también deberá mostrarnos en la base de datos los datos obtenidos, así como a que dispositivo origen tienen esos datos.

Index	Data	Ascii Data	DevAddr	Sequenc...	Accur...	Rx Port	Time
#108	0x3330362030323300	306 023	0x42	124	0	35	2018-04-19 15:20:32.0
#107	0x3236362030323300	266 023	0x52	19	0	59	2018-04-19 15:20:10.0
#106	0x3237312030323500	271 025	0x52	18	0	73	2018-04-19 15:18:32.0
#105	0x3330332030323600	303 026	0x42	121	0	64	2018-04-19 15:15:41.0
#104	0x3237372030323500	277 025	0x52	16	0	38	2018-04-19 15:15:19.0
#103	0x3330362030323400	306 024	0x42	120	0	103	2018-04-19 15:14:04.0
#102	0x3331312030323500	311 025	0x42	118	0	122	2018-04-19 15:10:50.0
#101	0x3237332030323500	273 025	0x52	13	0	66	2018-04-19 15:10:28.0
#100	0x3330342030323600	304 026	0x42	117	0	100	2018-04-19 15:09:13.0
#99	0x3238312030323500	281 025	0x52	11	0	2	2018-04-19 15:07:14.0
#98	0x3331332030323400	313 024	0x42	114	0	90	2018-04-19 15:04:23.0
#97	0x3237312030323600	271 026	0x52	9	0	42	2018-04-19 15:04:01.0
#96	0x3237312030323700	271 027	0x42	113	0	5	2018-04-19 15:02:45.0
#95	0x3238372030323500	287 025	0x52	8	0	114	2018-04-19 15:02:23.0
#94	0x3239312030323500	291 025	0x42	112	0	63	2018-04-19 15:01:09.0
#93	0x3331312030323400	311 024	0x52	7	0	10	2018-04-19 15:00:47.0
#92	0x3330332030323200	303 022	0x42	111	0	16	2018-04-19 14:59:32.0
#91	0x3136362030323600	166 026	0x52	6	0	147	2018-04-19 14:59:08.0
#90	0x3239392030323700	299 027	0x42	110	0	81	2018-04-19 14:57:55.0
#89	0x3239392030323500	299 025	0x42	109	0	2	2018-04-19 14:56:18.0
#88	0x3132332030323600	123 026	0x42	108	0	112	2018-04-19 14:54:34.0

Ilustración 71 - Recepción de datos prueba 4

Al observar los datos que se encuentran en la base de datos se puede apreciar que cada fila de datos tiene un DevAddr concreto, este dato corresponde con uno de los identificadores que se han tenido que poner a los módulos. En este caso el 0x42 corresponde al RN1 y el 0x52 al RN2.

13.3.2 Conclusión de validez del equipamiento

Con esta información se puede afirmar que la pasarela es capaz de recibir información de distintos dispositivos conectados a ella, que la información aportada el enviado al servidor vía Ethernet y que en la base de datos que proporciona el servidor es capaz de diferenciar desde que dispositivo ha sido enviada la información.

A la vista de los resultados obtenidos con estas configuraciones se puede asegurar que este kit de desarrollo es apropiado para una red de tipo LoRa.

13.4 ANEXO IV: RED RADIO MOBILE

13.4.1 Descarga de Mapas

Para configurar de forma correcta la red que queremos simular se tienen que seguir una serie de pasos descritos a continuación.

En primer lugar, se tiene que especificar como se quieren obtener los mapas topográficos.

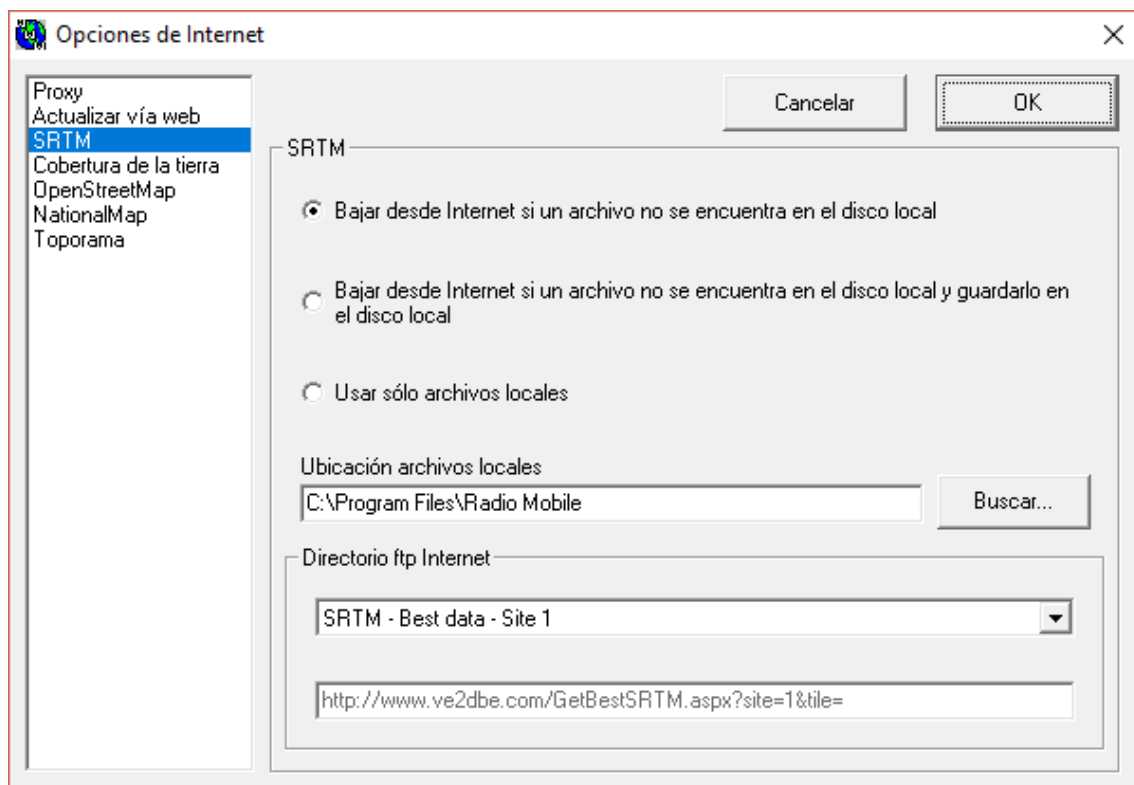


Ilustración 72 - Carga de mapas

Dentro de la pestaña opciones, se selecciona la opción Internet. Dentro de la misma en el apartado SRTM. La opción más apropiada es la de posibilitar la descarga de los archivos si no están en el disco local. Además, se establece una carpeta de descarga para los mapas y el servidor ftp desde el que se quieren obtener.

13.4.2 Configuración

13.4.2.1 Red Utilizada

Para comenzar la configuración se selecciona dentro de la pestaña Archivo\Propiedades de red (Ctrl+N). Dentro de las numerosas opciones posibles, para el caso de una red LoRa se configuran los siguientes parámetros:

13.4.2.1.1 Parámetros

- ✓ Banda de Trabajo: ISM 868MHz
- ✓ Clima: Marítimo templado sobre tierra
- ✓ Modelo Estadístico: Móvil y difusión

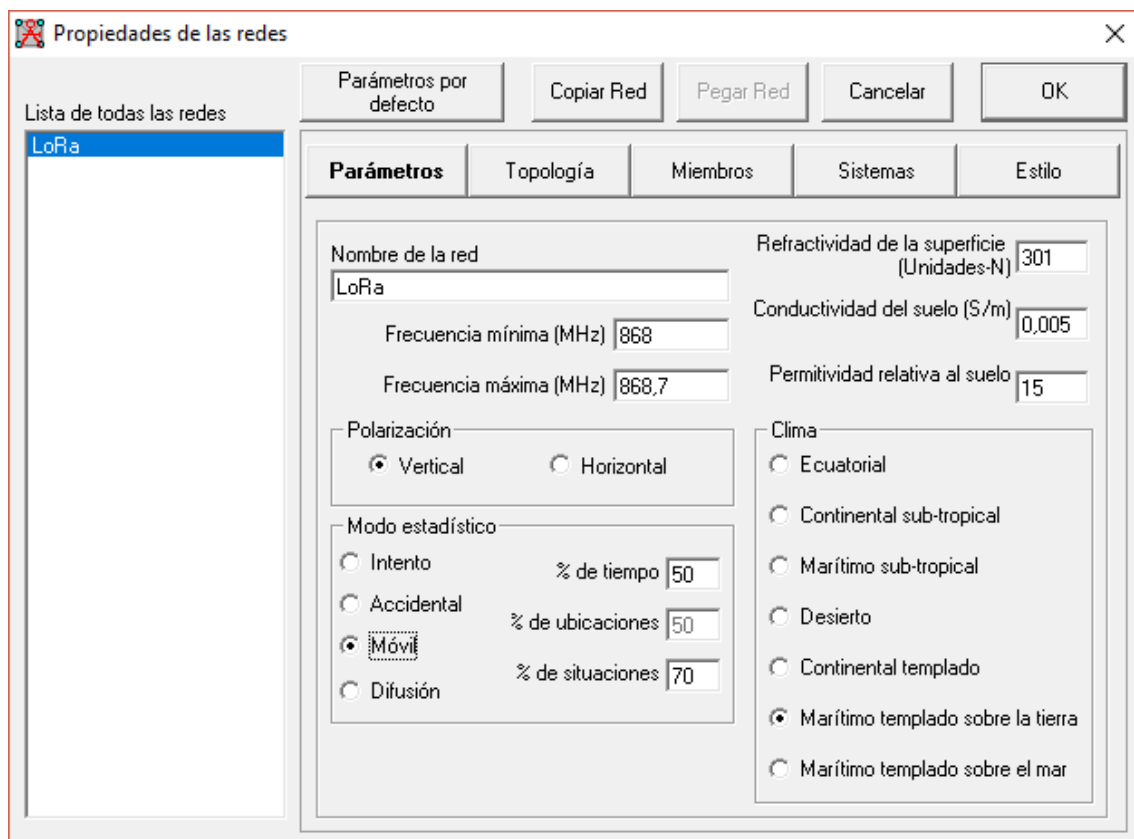


Ilustración 73 - Propiedades de la red

Para la realización de las simulaciones se utilizarán 2 tipos de modo estadístico:

- Difusión: Enlaces entre estaciones fijas
- Móvil: Enlace para dispositivos móviles

En la posterior pestaña de topología los valores que se utilizaran.

13.4.2.1.2 Topología

- ✓ Visibilidad: No Visible
- ✓ Red: Red de datos en estrella (Maestro/Esclavo)

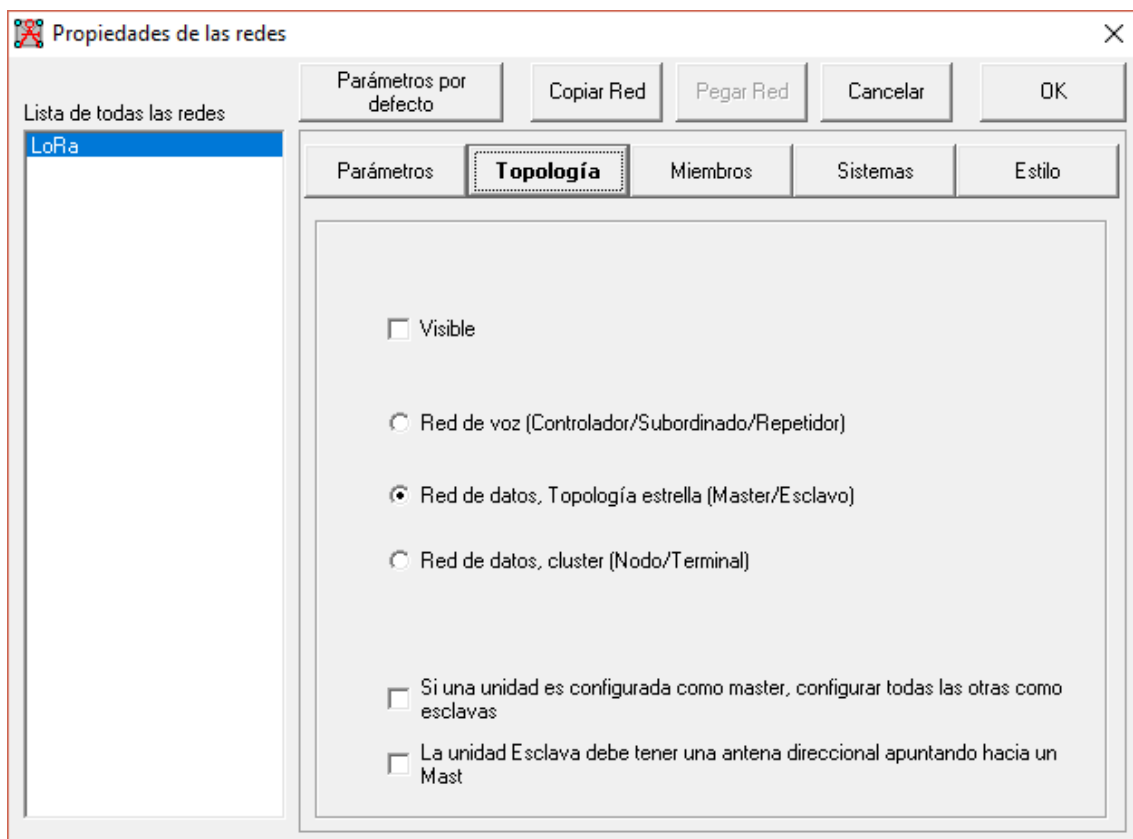


Ilustración 74 - Topología de red

13.4.2.1.3 Miembros

La siguiente pestaña hace hincapié en los miembros que conforman la red LoRa. En este panel se puede configurar de forma rápida el rol que tendrán los diferentes dispositivos en la red y el sistema con el que funcionarán.

- ✓ RN: Maestros
- ✓ Puntos de Recepción: Esclavos

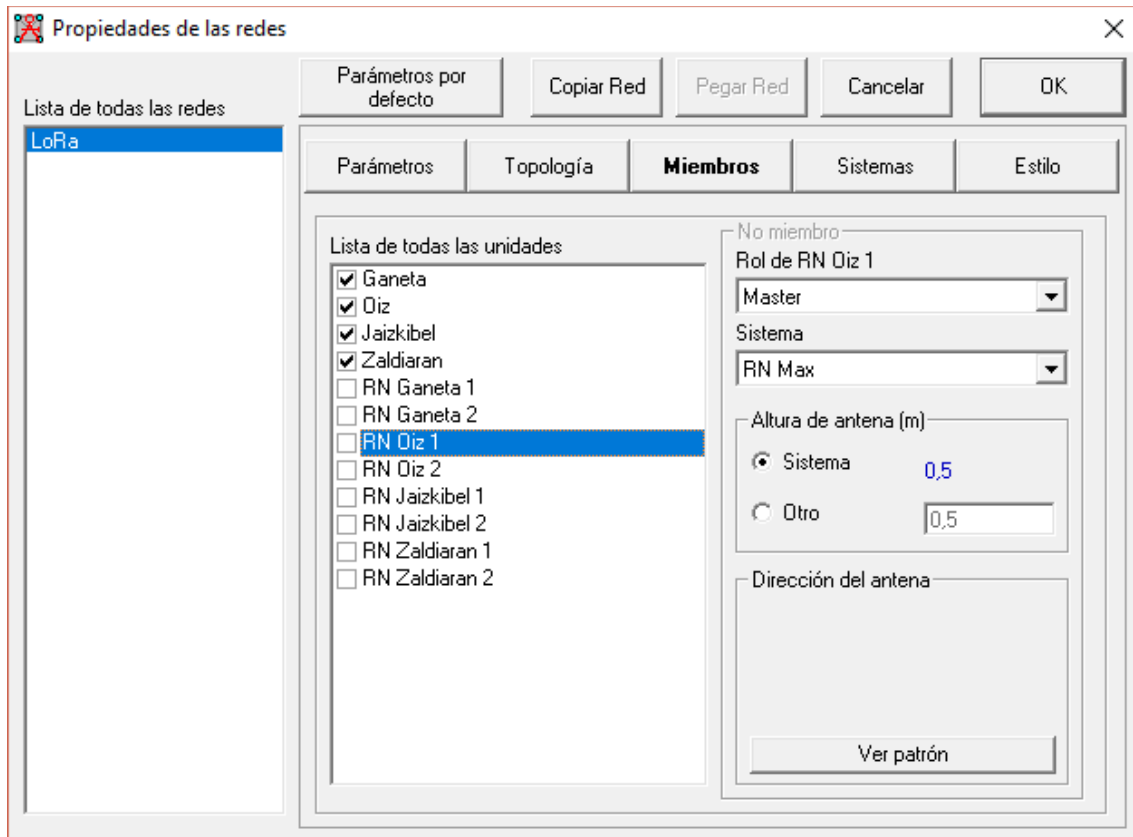


Ilustración 75 - Miembros de la red

13.4.2.1.4 Sistemas

Gracias a esta opción se pueden configurar distintos modos de funcionamiento para cada uno de los emplazamientos de la red. Para este caso se han utilizado 4 sistemas diferentes que se muestran a continuación:

1. RN Max: Transmisor en potencia máxima
2. RN Min: Transmisor en potencia mínima
3. Gateway Max: Receptor a máxima potencia
4. Gateway Min: Receptor a mínima potencia.

Los parámetros concretos de cada una de los sistemas se muestran a continuación.

13.4.2.1.4.1 RN Max

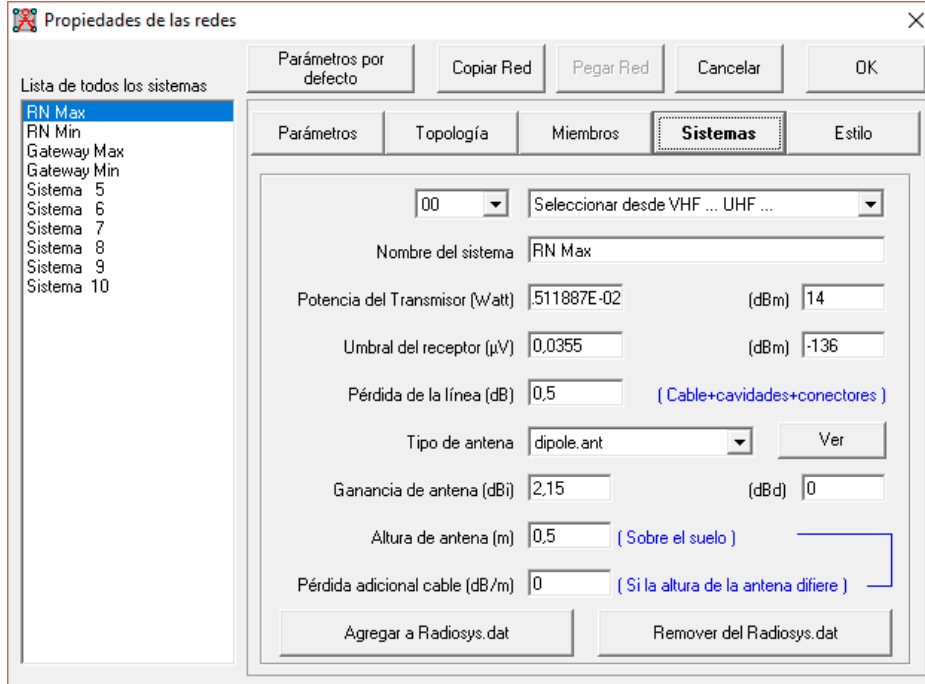


Ilustración 76 - Modulo a máxima potencia teórico

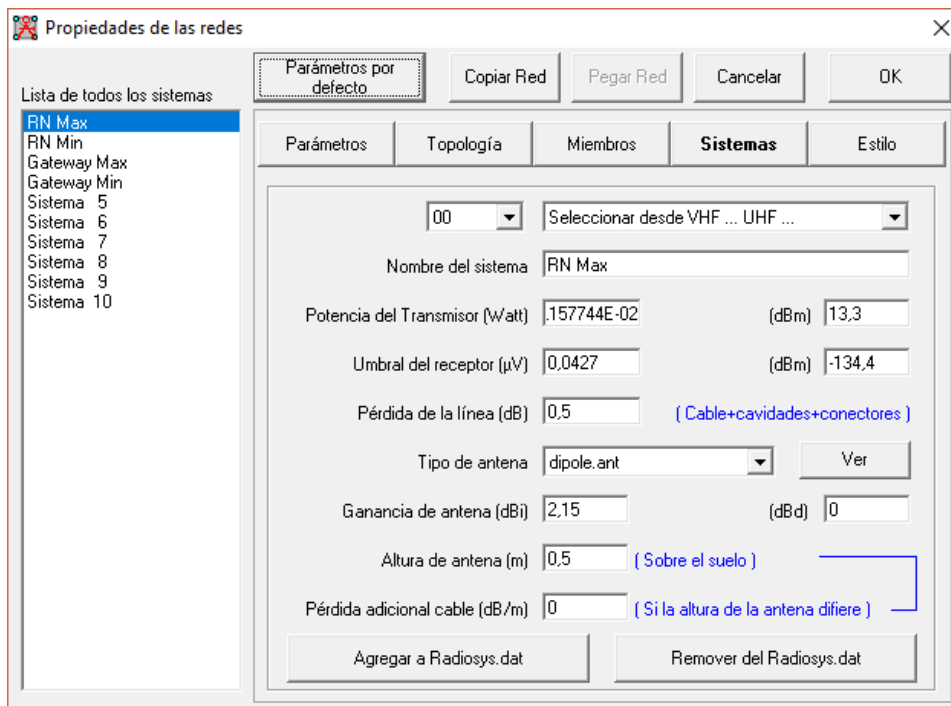


Ilustración 77 - Modulo a máxima potencia practico

13.4.2.1.4.2 RN Min

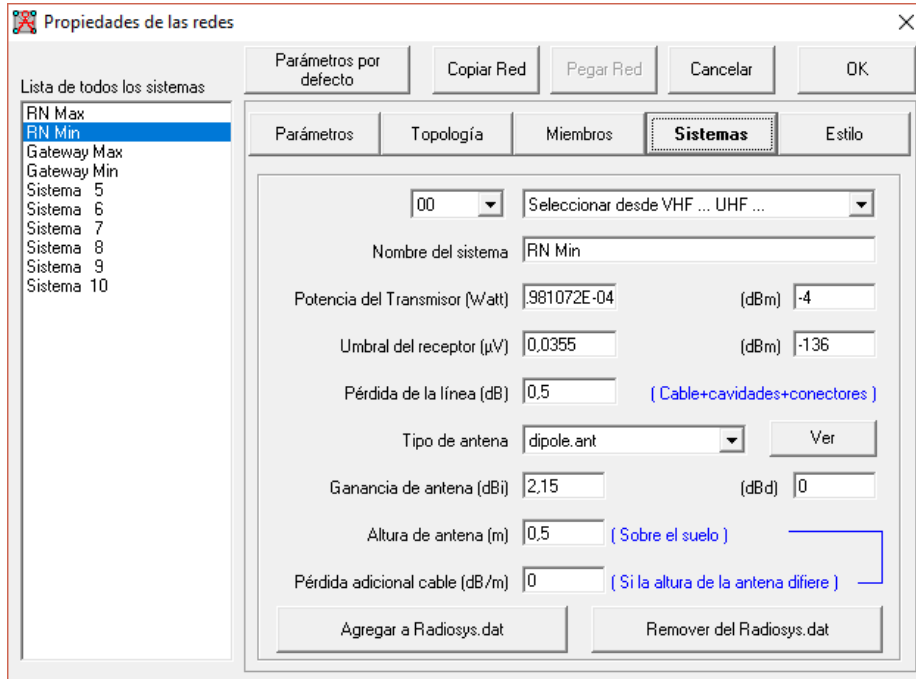


Ilustración 78 - Modulo a mínima potencia teórico

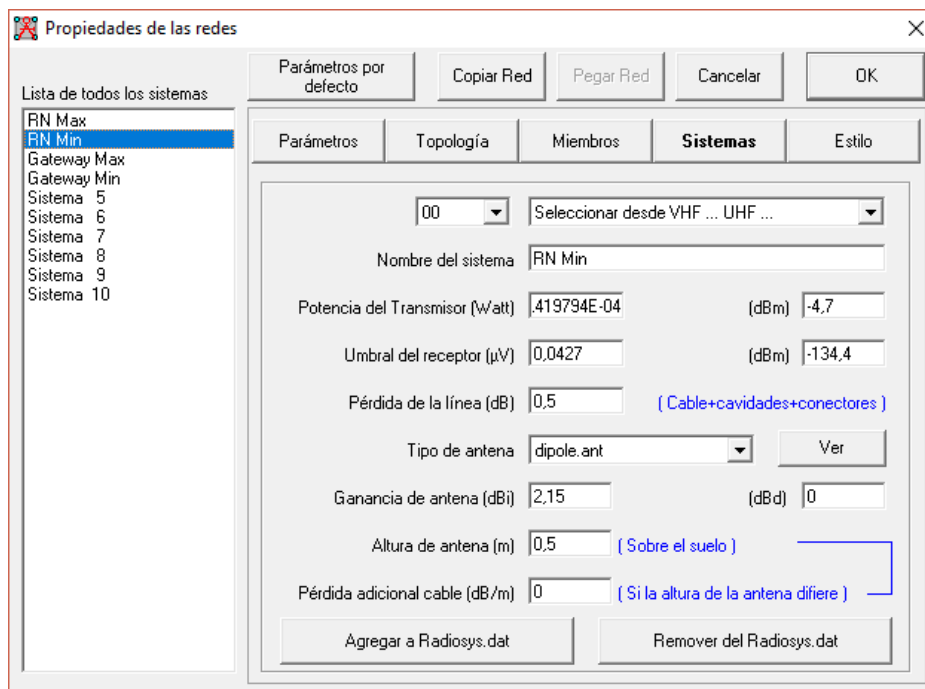


Ilustración 79 - Modulo a mínima potencia practico

13.4.2.1.4.3 Gateway Max

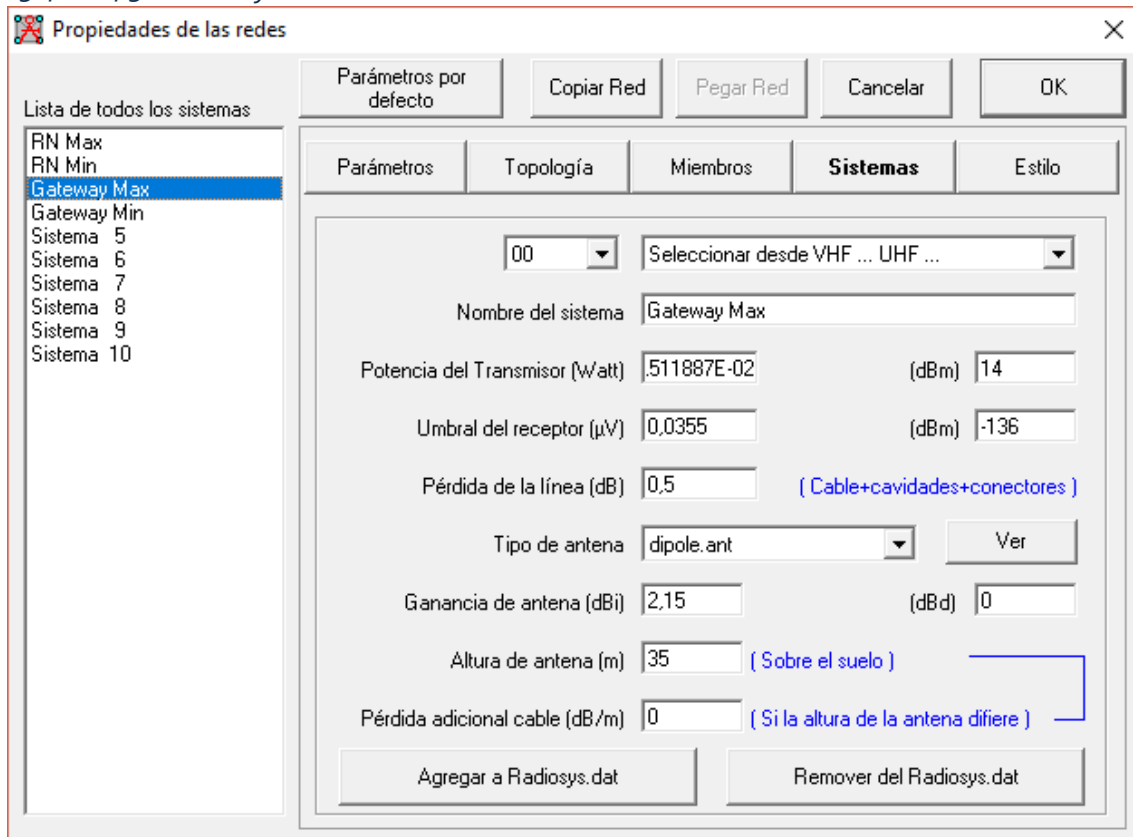


Ilustración 8o - Gateway a máxima potencia Teórico

13.4.2.1.4.4 Gateway Min

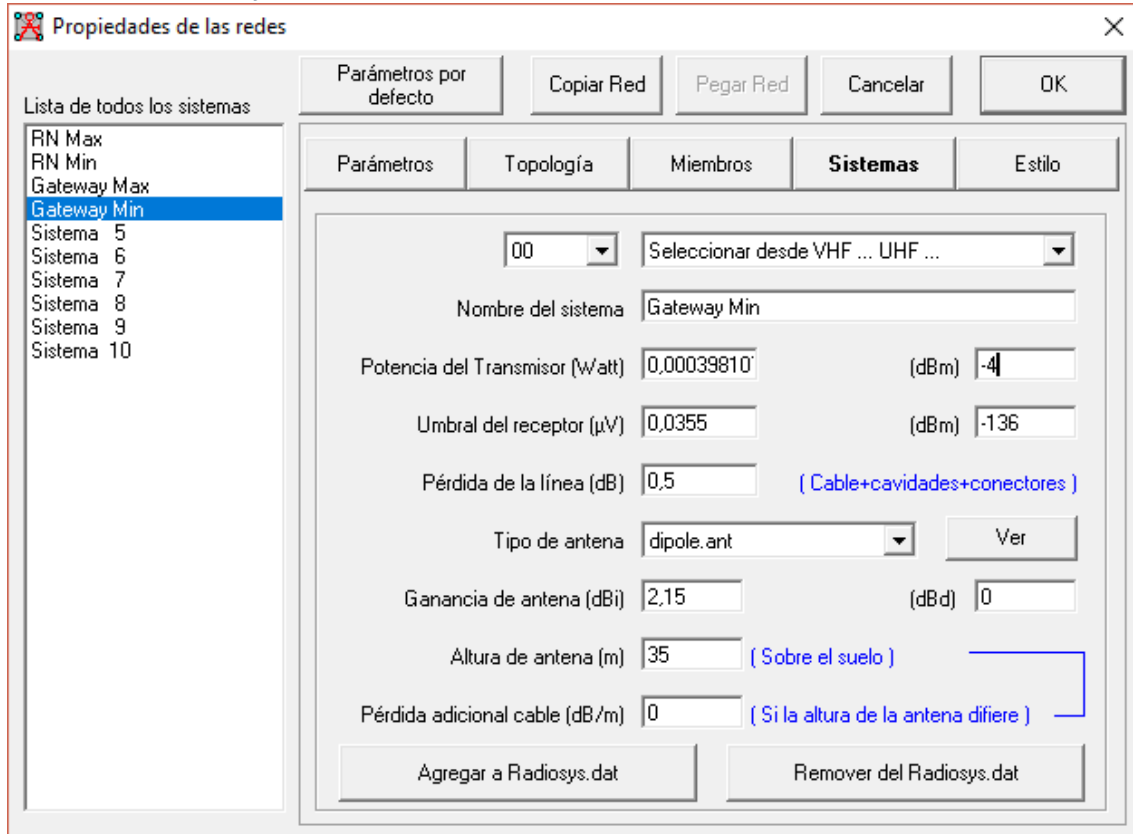


Ilustración 81 - Gateway mínima potencia teórico

13.4.2.2 Configuración de las unidades

Una vez parametrizada la red de la que van a formar parte los emplazamientos utilizados. Estos se tienen que ubicar en la red. Existen varias posibilidades para ello, en este caso se han insertado en la red a partir de las coordenadas obtenidas.

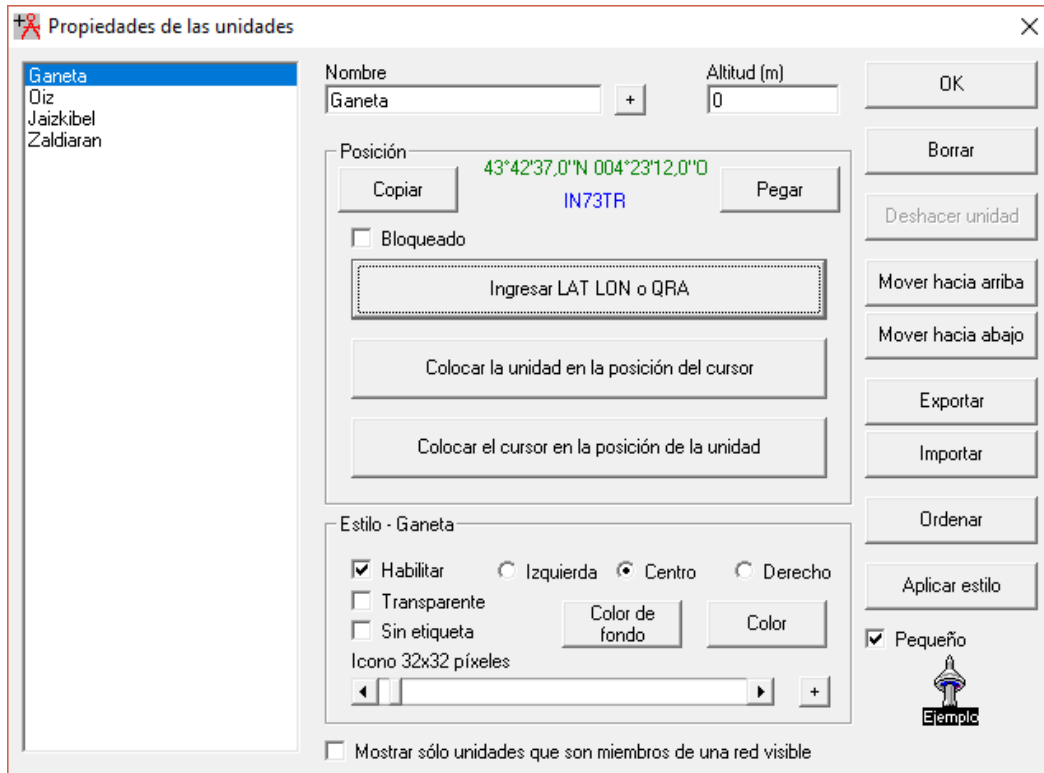


Ilustración 82 - Propiedades de las unidades

Radio Mobile permite la inserción de las coordenadas de dos formas. En nuestro caso se ha utilizado la nomenclatura de Grados/Minutos/Segundos y punto cardinal.

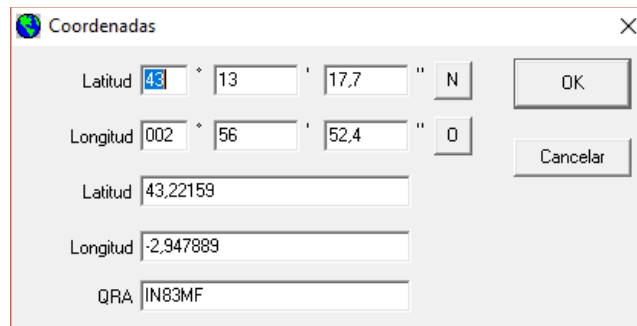


Ilustración 83 - Inserción de coordenadas

13.4.2.3 Cobertura Polar

En el momento que se tengan todos los miembros en la red con su correspondiente configuración se procede a la elaboración del mapa de cobertura. En estos mapas las unidades centrales son los receptores. Los puntos transmisores pueden ser tanto fijos como móviles; con el fin de estudiar las peores condiciones se implantarán como puntos móviles.

Con el fin de realizar la mejor simulación posible se ha configurado la cobertura de radio polar de la siguiente forma:

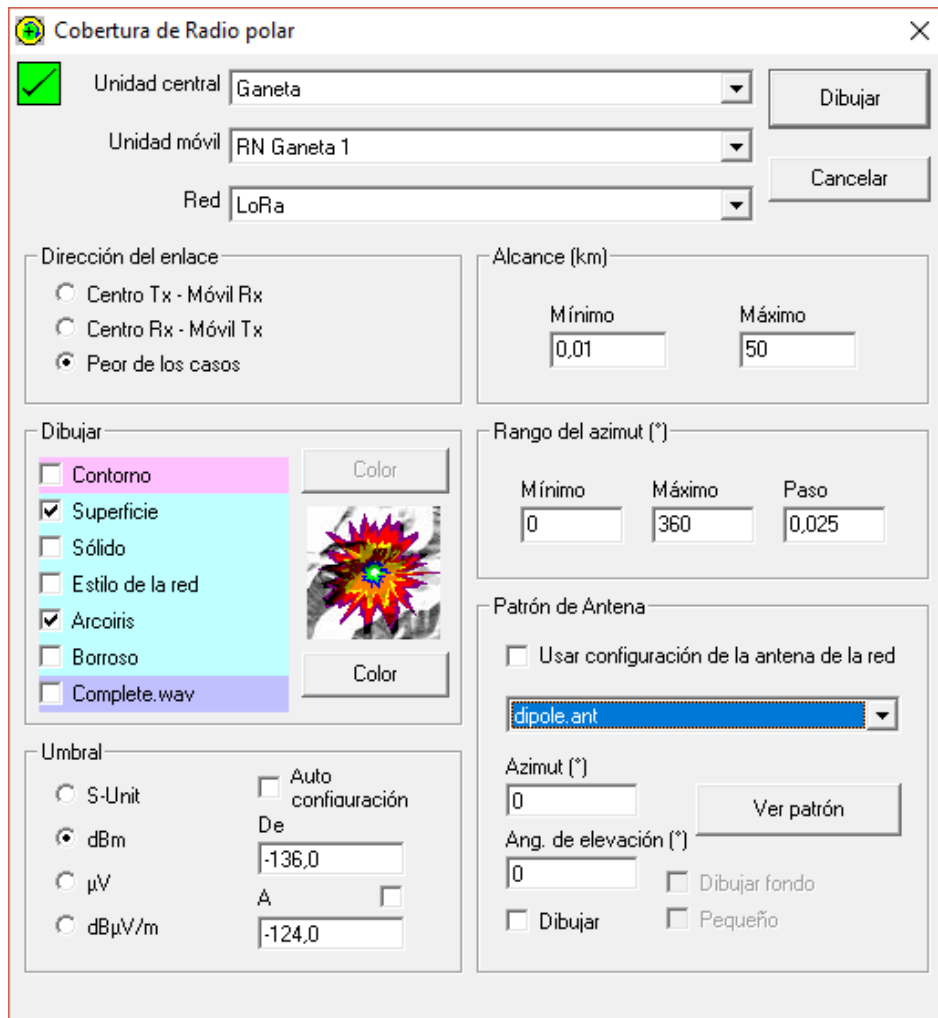


Ilustración 84 - Configuración cobertura Teórica

La función arcoiris de Radio Mobile permite establecer una serie de colores y asignarlos a cada valor de recepción. En este caso se ha utilizado el rango máximo de valores, 12. A cada valor que se muestra se le ha implementado un rango de colores de acuerdo con los valores de sensibilidad correspondientes a cada SF

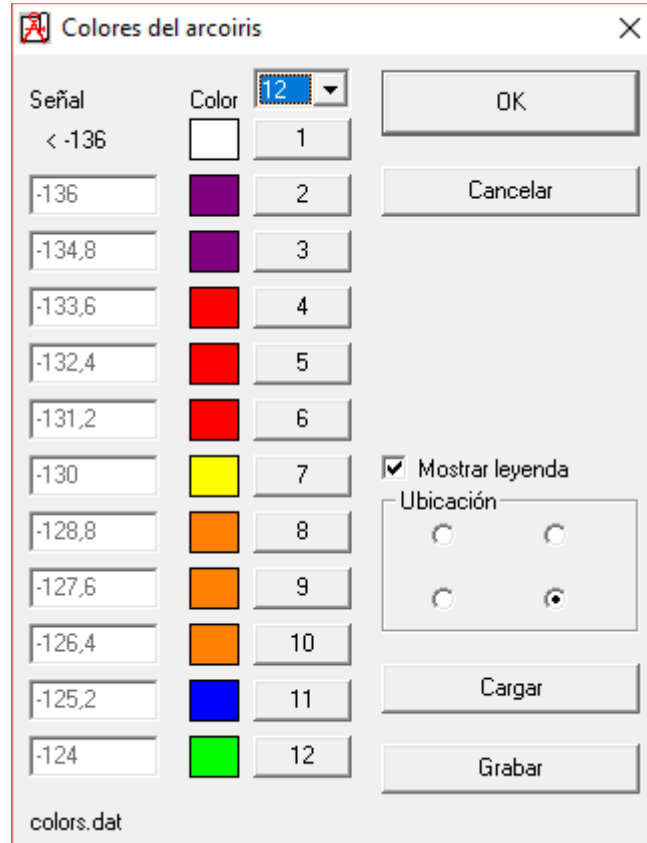


Ilustración 85 - Rango de colores teórico

Tras realizar todos estos pasos se ha procedido a la simulación de los mapas de cobertura. Un ejemplo de los mapas resultante es:

13.4.2.4 Comprobación de radio enlaces

Como paso previo a la elaboración de los mapas de cobertura se ha realizado un estudio del radio enlace existente entre el punto emisor y el receptor con el fin de verificar que el mapa obtenido presenta unos resultados válidos.

13.4.2.4.1 Potencia Máxima

El enlace utilizado para la comprobación corresponde con el formado por el transmisor RN Ganeta 1 y RN Ganeta 2 emitiendo hacia el receptor posicionado en Ganeta, siendo el enlace resultante para una transmisión a máxima potencia.

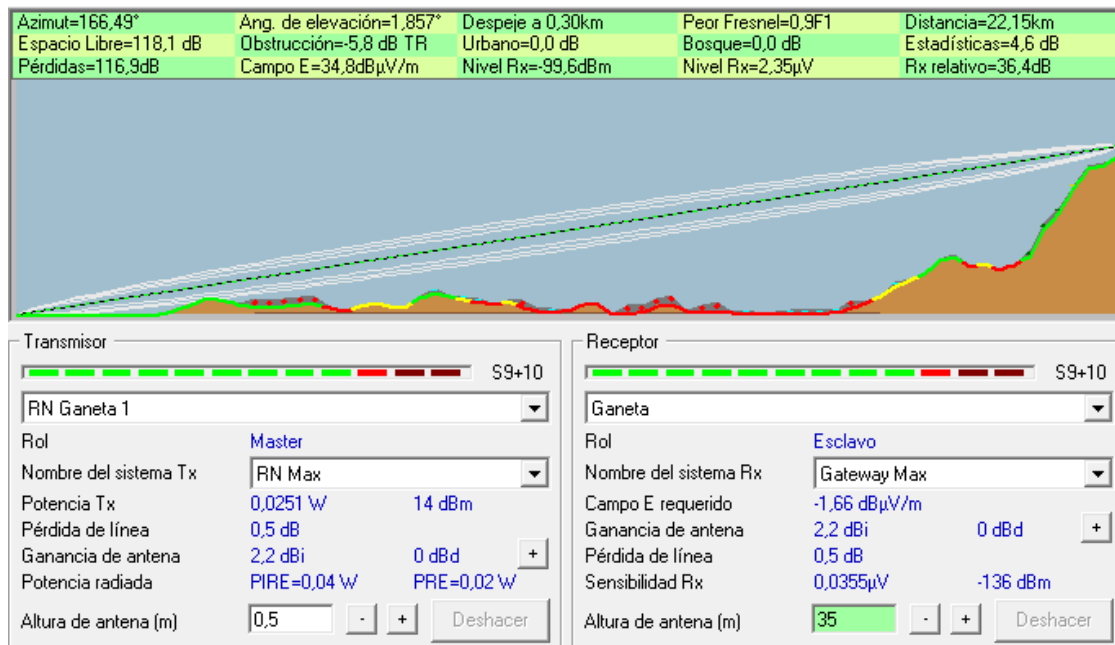


Ilustración 86 – Enlace 1 teórico a máxima potencia

De acuerdo con los valores obtenidos en el enlace de Ganeta recibe una señal de -99,6dBm lo que en el mapa de cobertura equivale al color verde.

En cuanto al enlace entre RN Ganeta 2 y Ganeta al estar posicionados a mayor distancia la potencia recibida desciende a los -112,6dBm, aun así, en el mapa de cobertura también se encontraría en la región de color verde

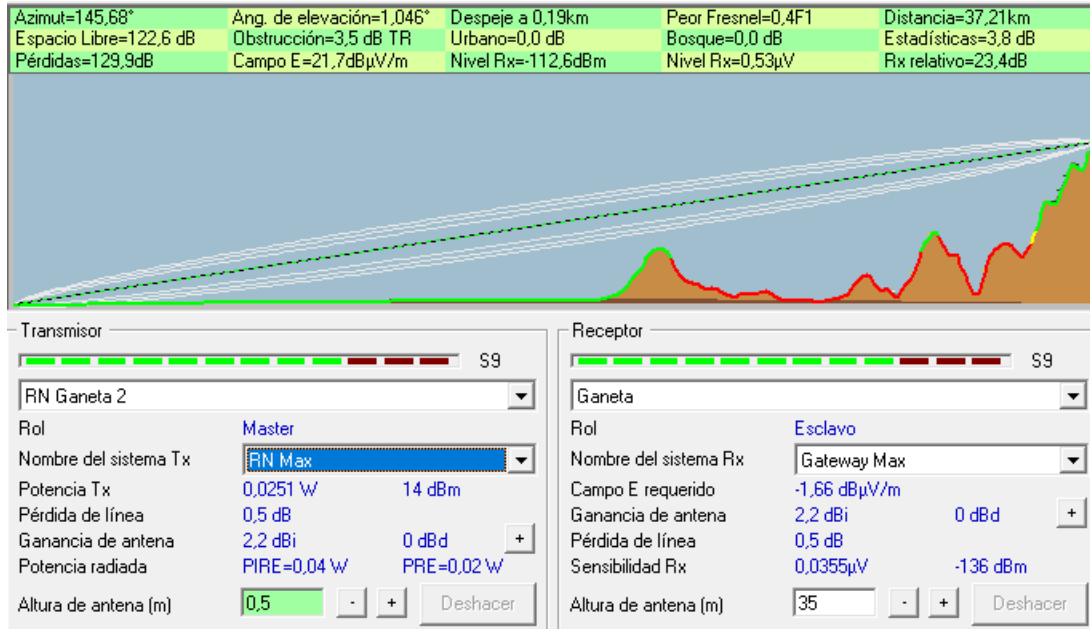


Ilustración 87 - Enlace 2 teórico a máxima potencia

Obtenido el mapa de cobertura se comprueba que efectivamente se encuentran ambos transmisores en la región que menos SF necesita.

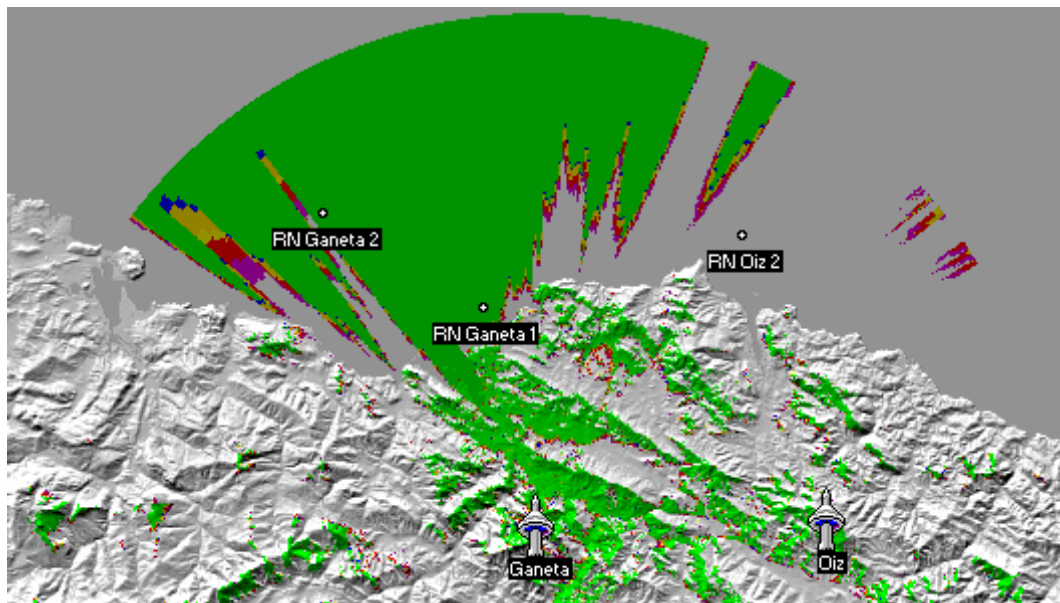


Ilustración 88 - Mapa resultante a máxima potencia

13.4.2.4.2 Potencia Mínima

Para comprobar que los mapas de cobertura varían en función de la potencia de trabajo utilizada para el envío de datos se han vuelto a utilizar los mismos puntos transmisores, pero con los sistemas de mínima potencia implementado.

Para el RN Ganeta 1 la potencia recibida desciende a los -118,6dBm. Aun así, en el mapa de cobertura deberá seguir apareciendo en la región verde.

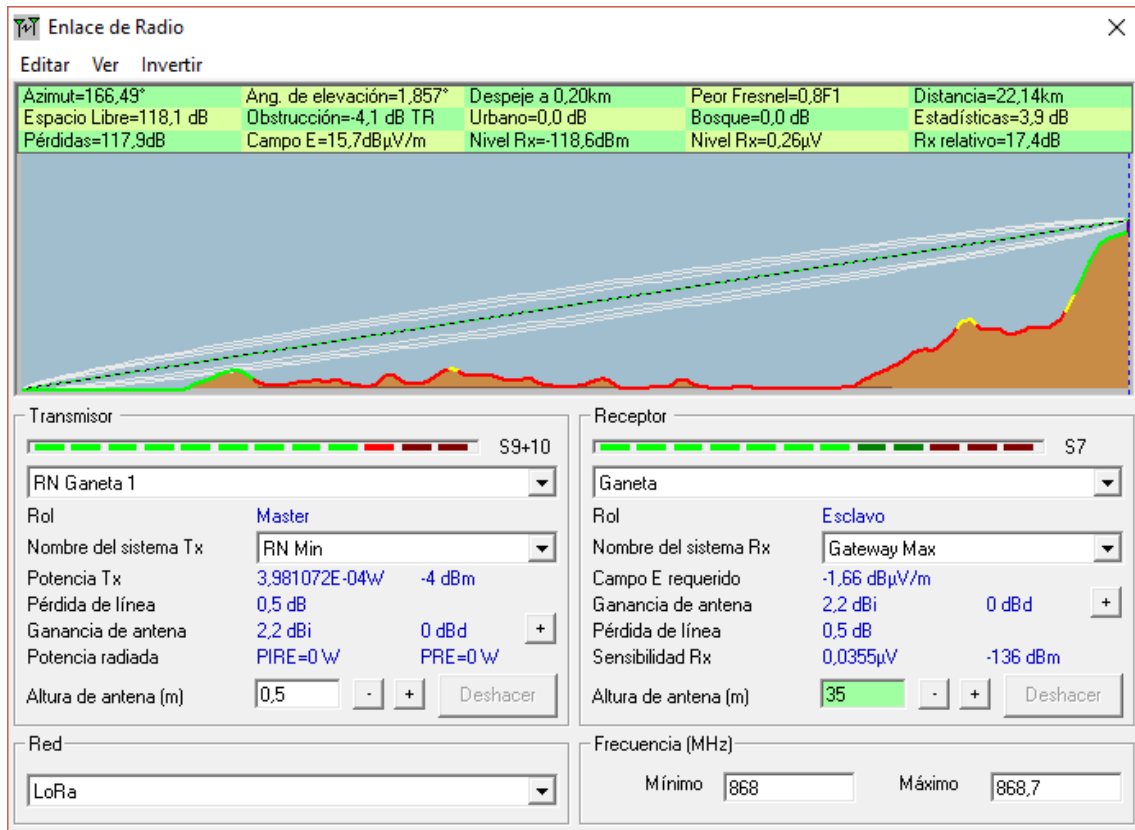


Ilustración 89 – Enlace 1 teórico a máxima potencia

No es así el caso de RN Ganeta 2, donde la potencia recibida por parte del Gateway de Ganeta desciende -130,4dBm por lo que se debería de encontrar en la zona de color rojo.

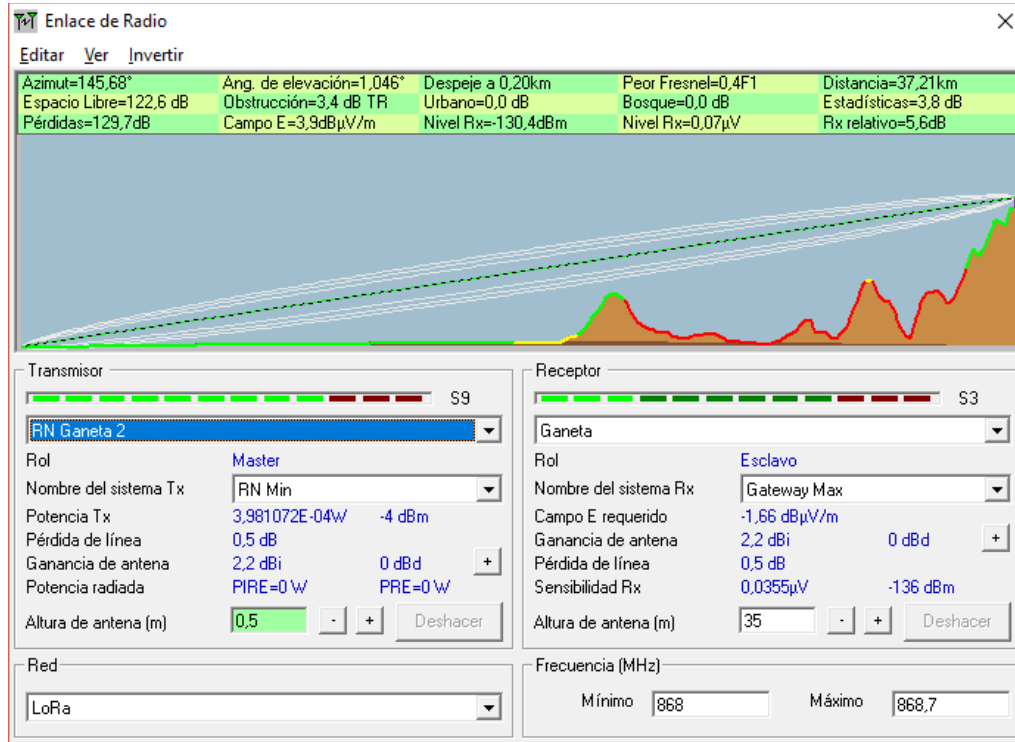


Ilustración 90 - Enlace 2 teórico a mínima potencia

Analizando el mapa de cobertura resultante se confirma que los dispositivos se han ubicado en su color correspondiente

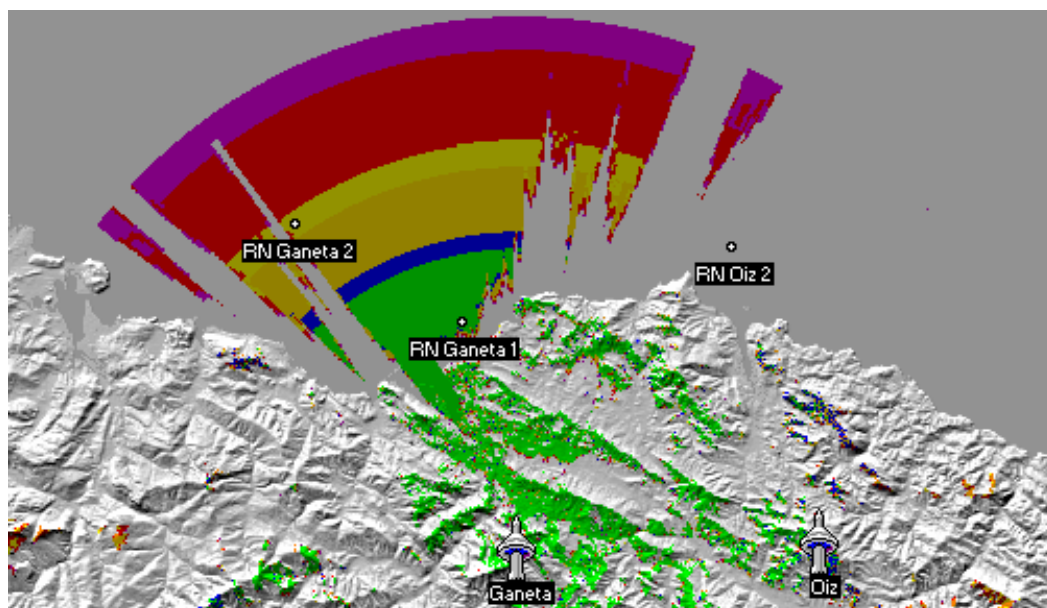


Ilustración 91 - Mapa de cobertura resultante

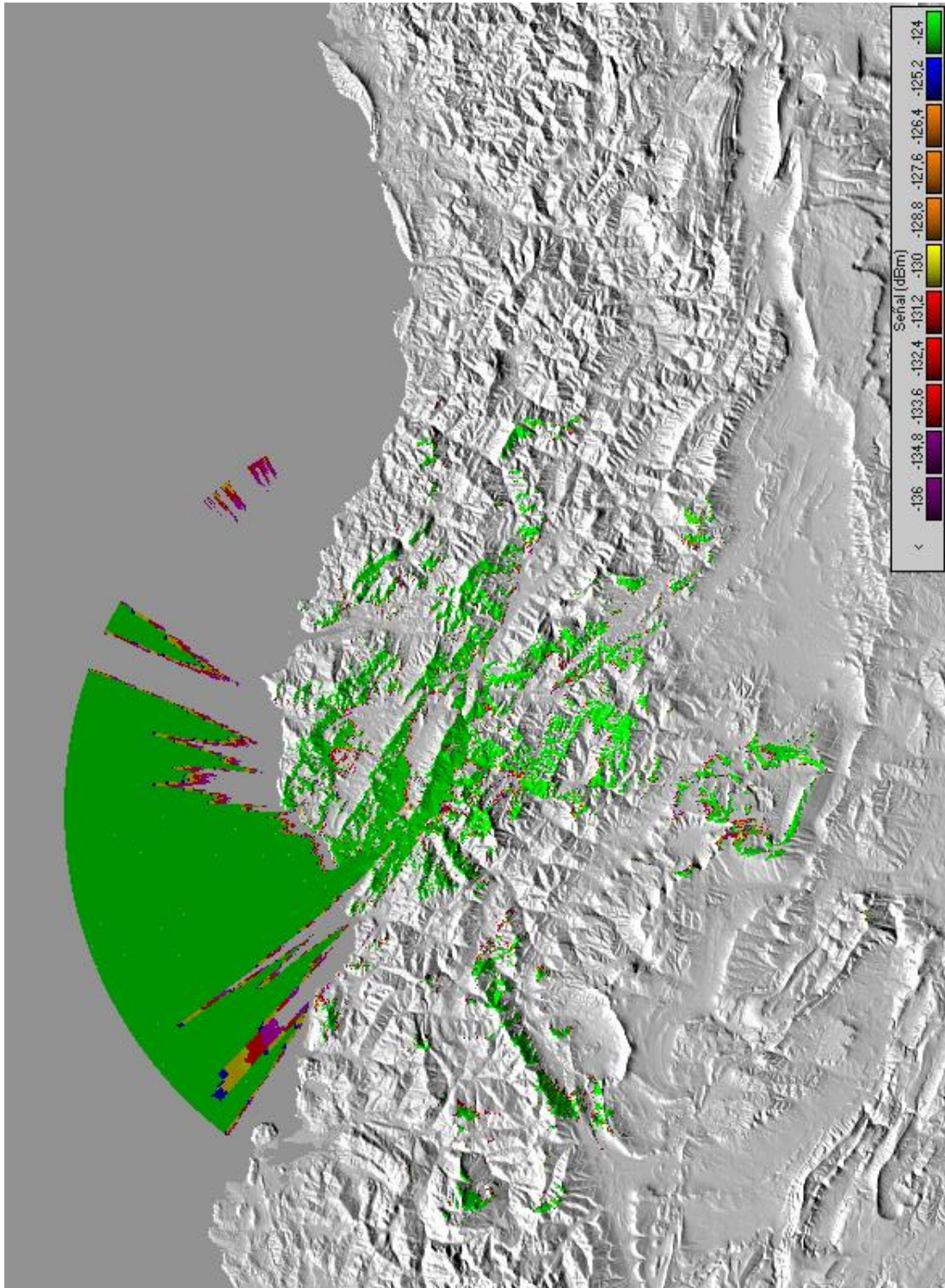
13.5 ANEXO V: MAPAS DE COBERTURA

Mapas de Cobertura Realizados

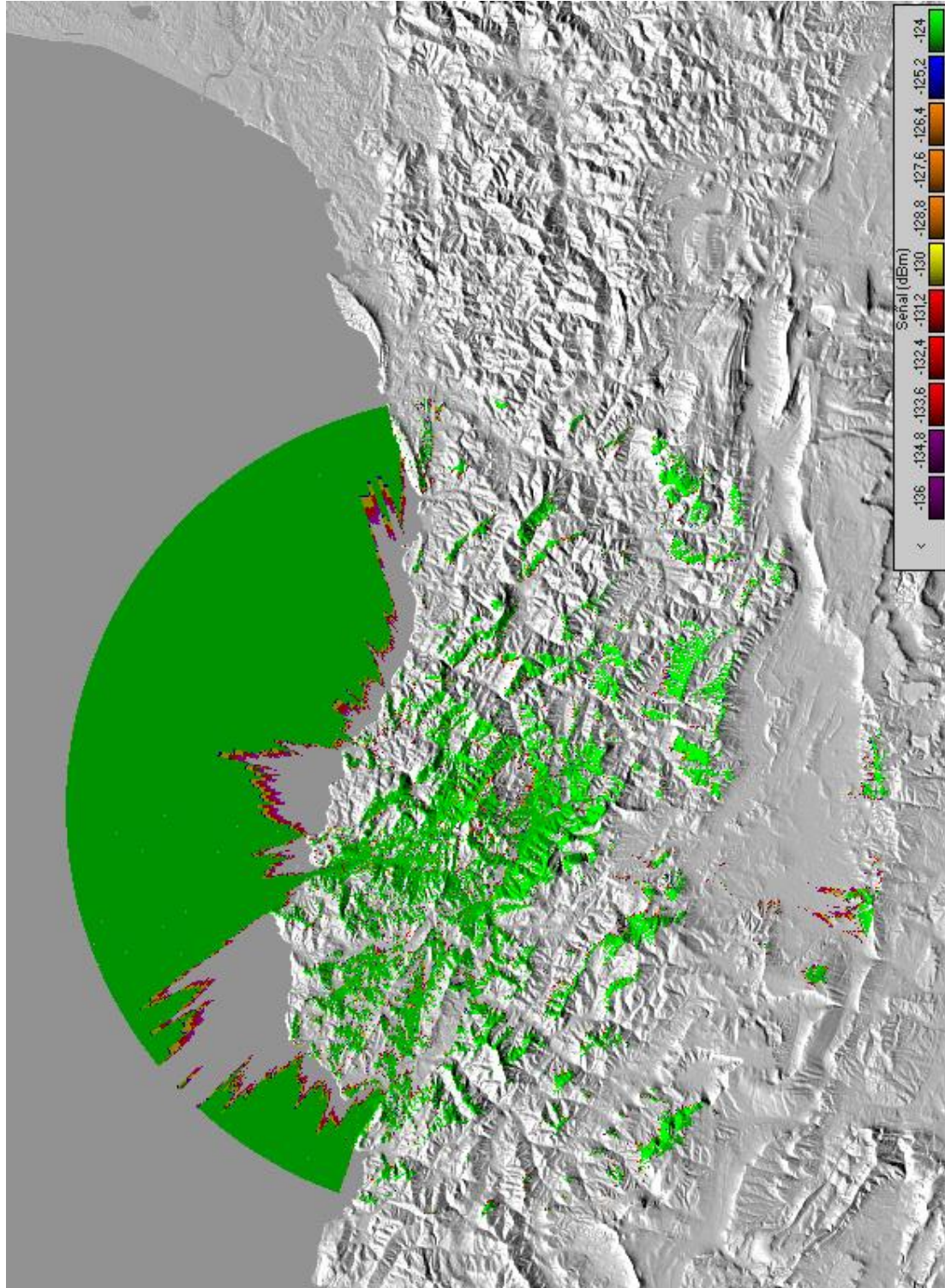
13.5.1 Teóricos

- Potencia Máxima
 - Ganeta
 - Oiz
 - Jaizkibel
 - Zaldiaran
- Potencia Mínima
 - Ganeta
 - Oiz
 - Jaizkibel
 - Zaldiaran

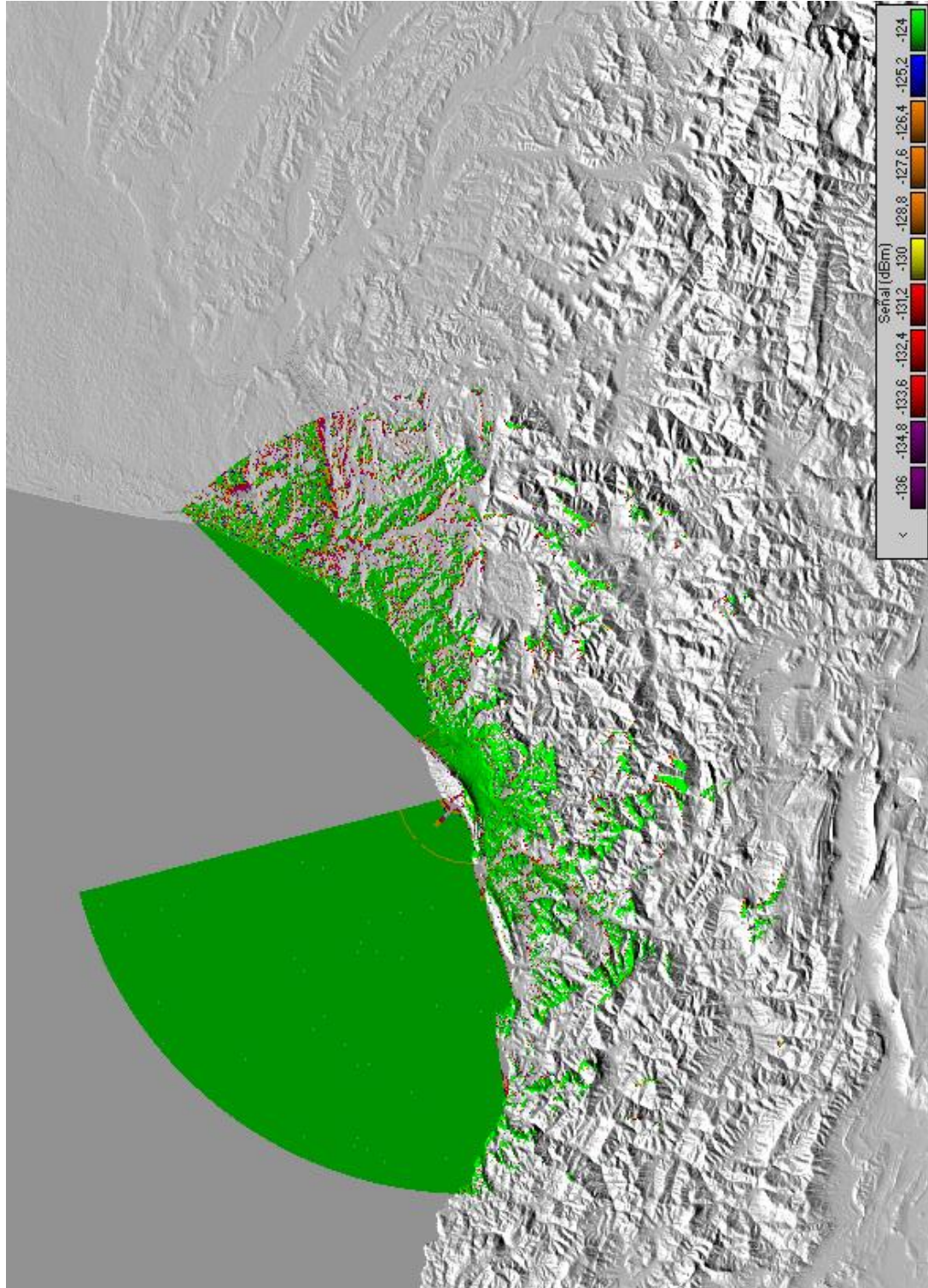
13.5.1.1 Ganeta: Potencia Máxima



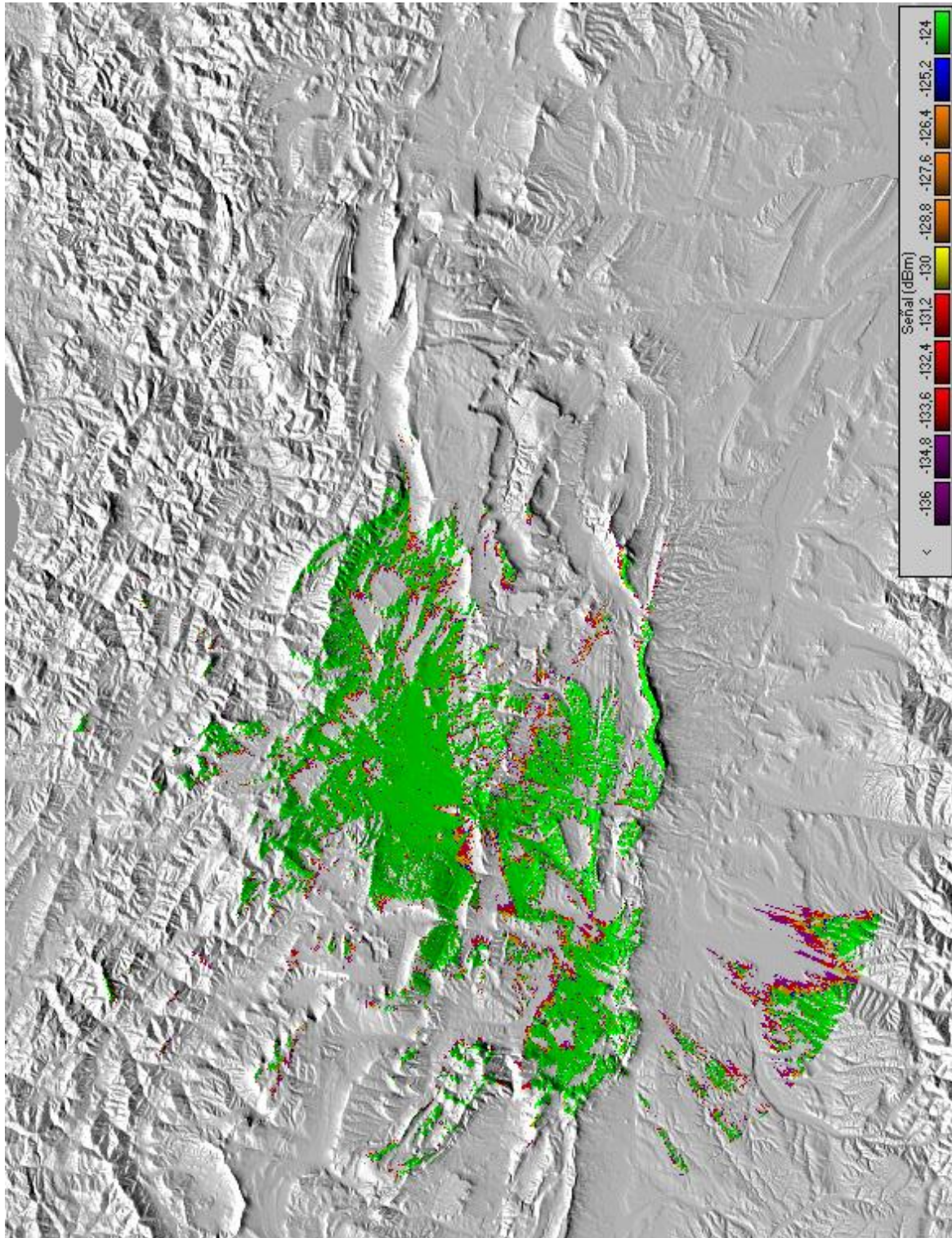
13.5.1.2 Oiz: Potencia Máxima



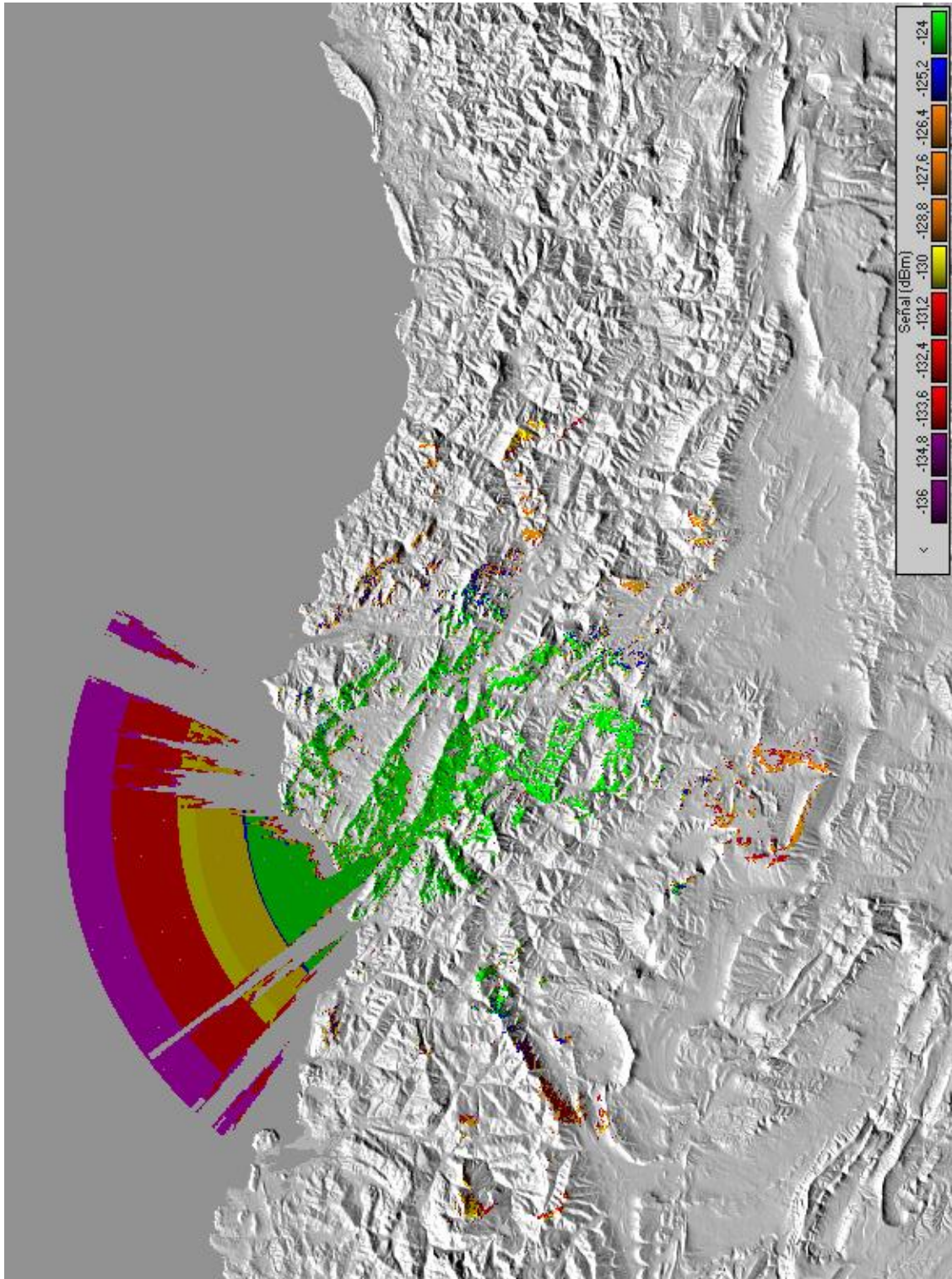
13.5.1.3 Jaizkibel: Potencia Máxima



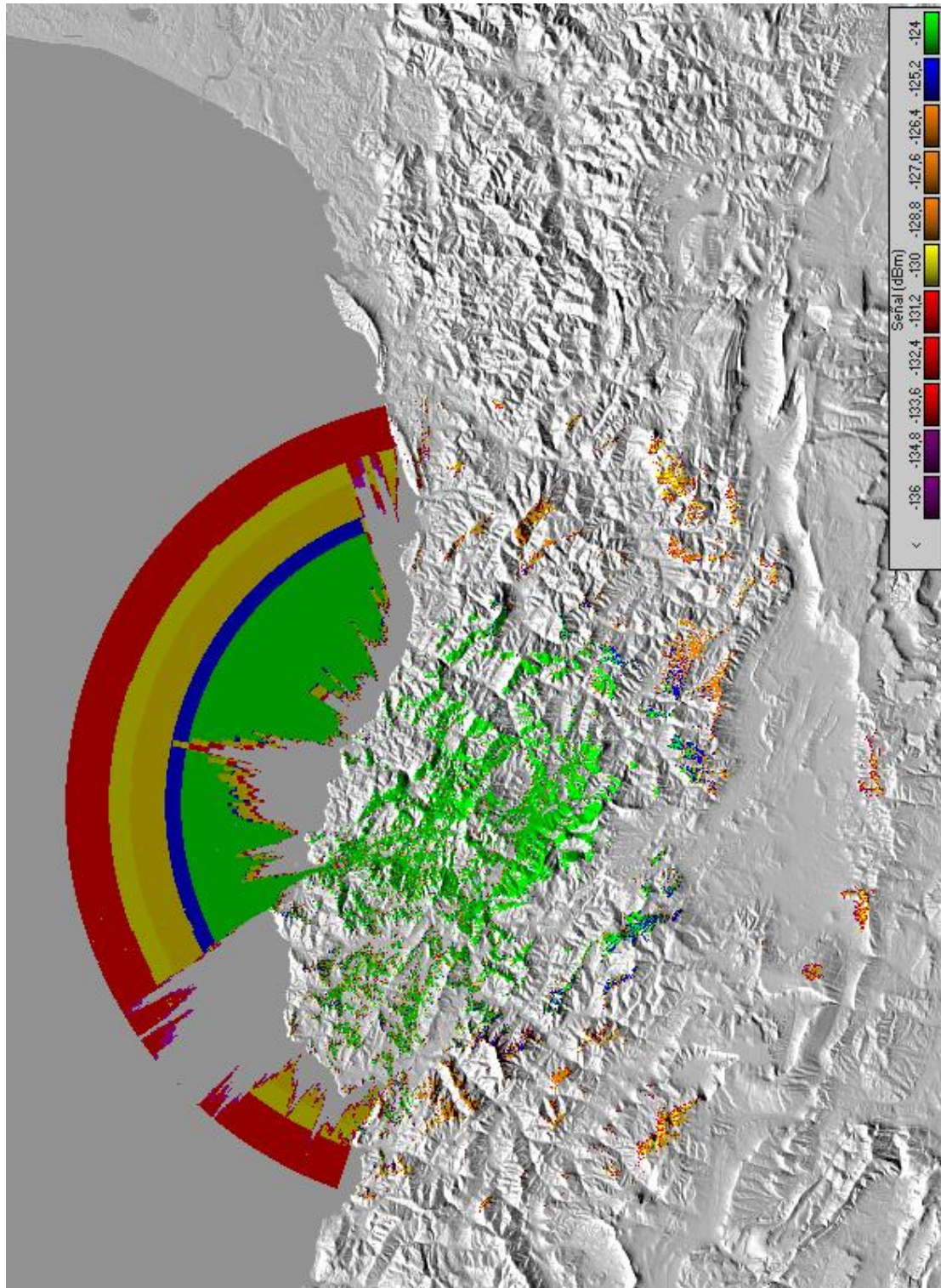
13.5.1.4 Zaldiaran: Potencia Máxima



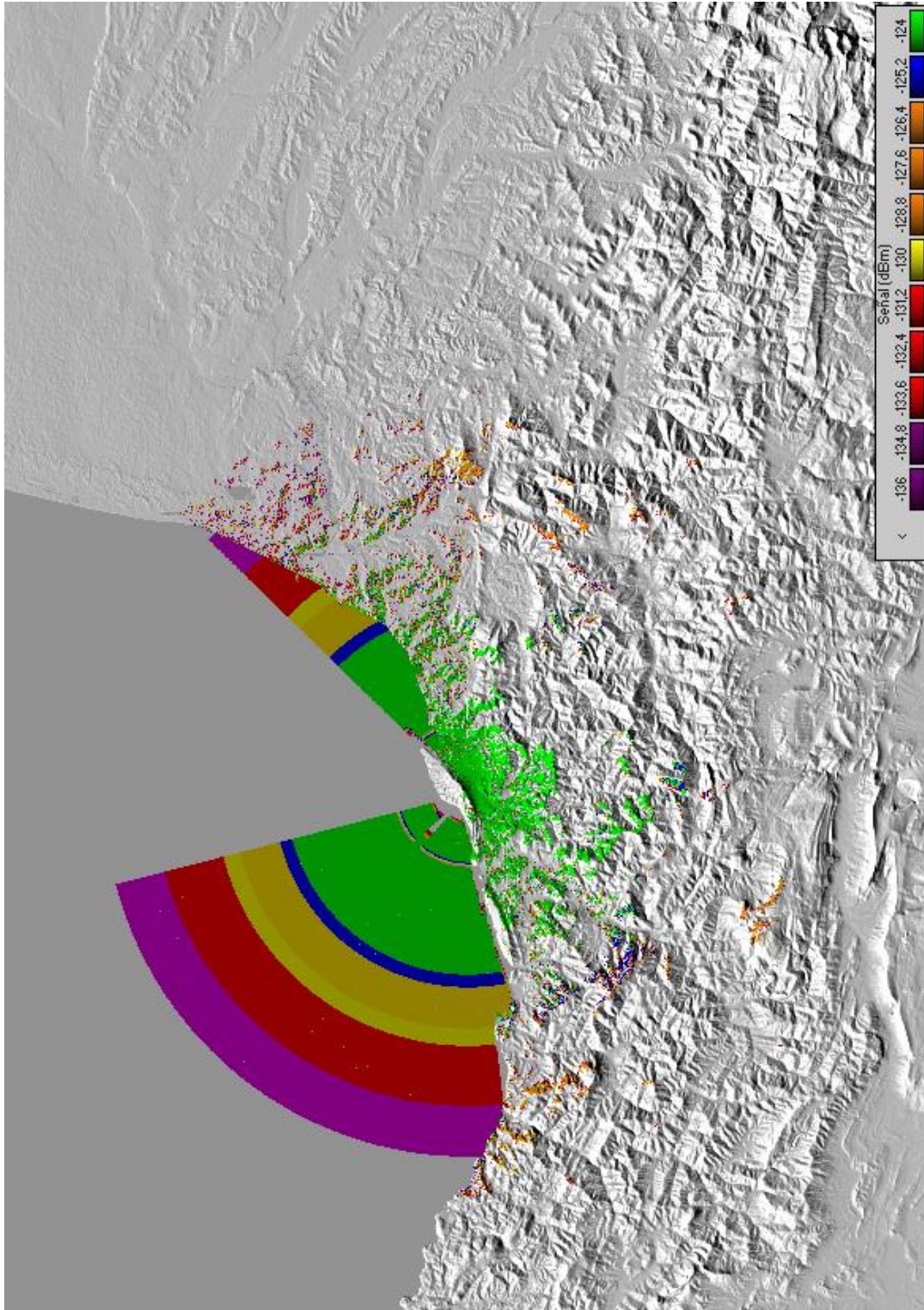
13.5.1.5 Ganeta: Potencia Mínima



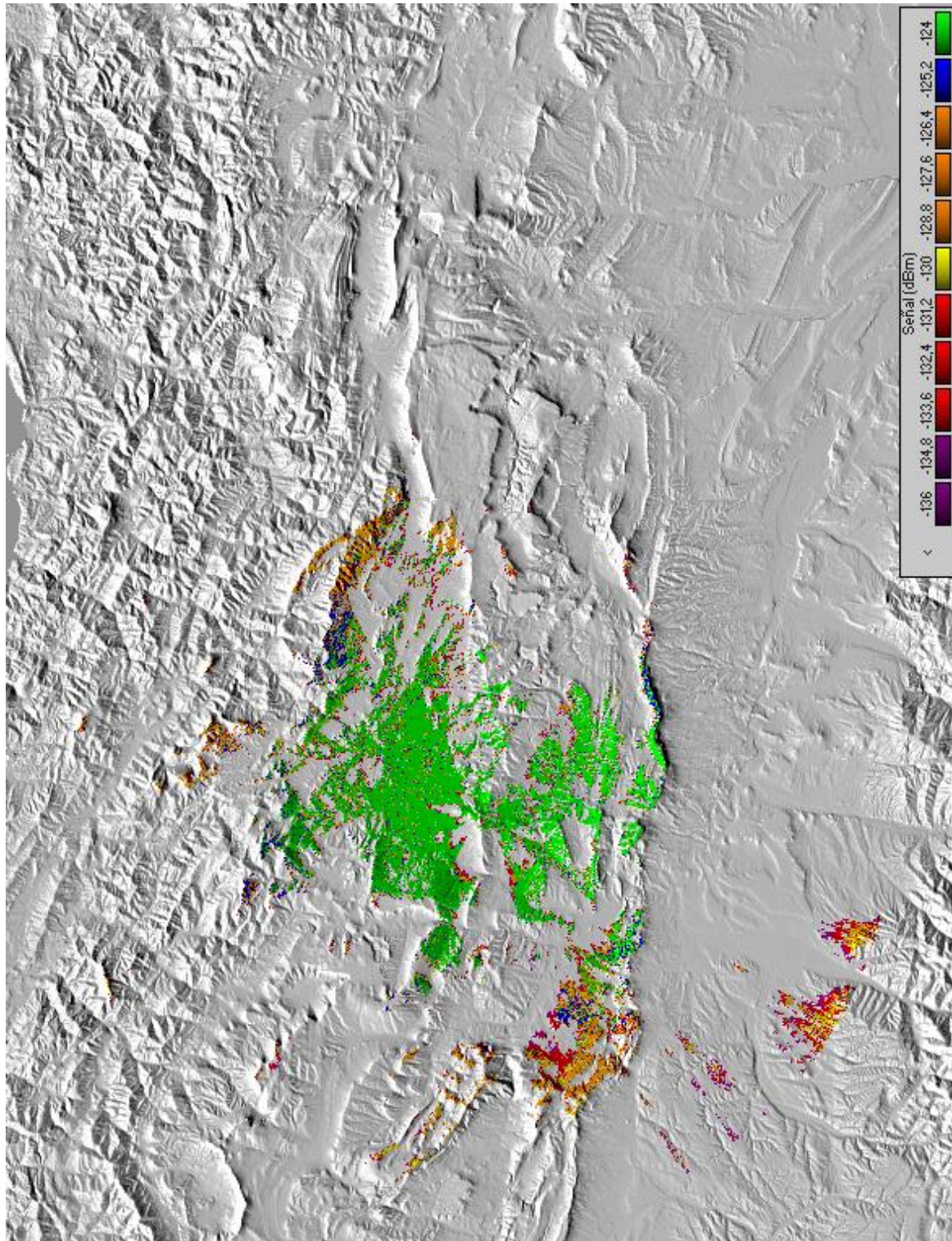
13.5.1.6 Oiz: Potencia Mínima



13.5.1.7 Jaizkibel: Potencia Mínima



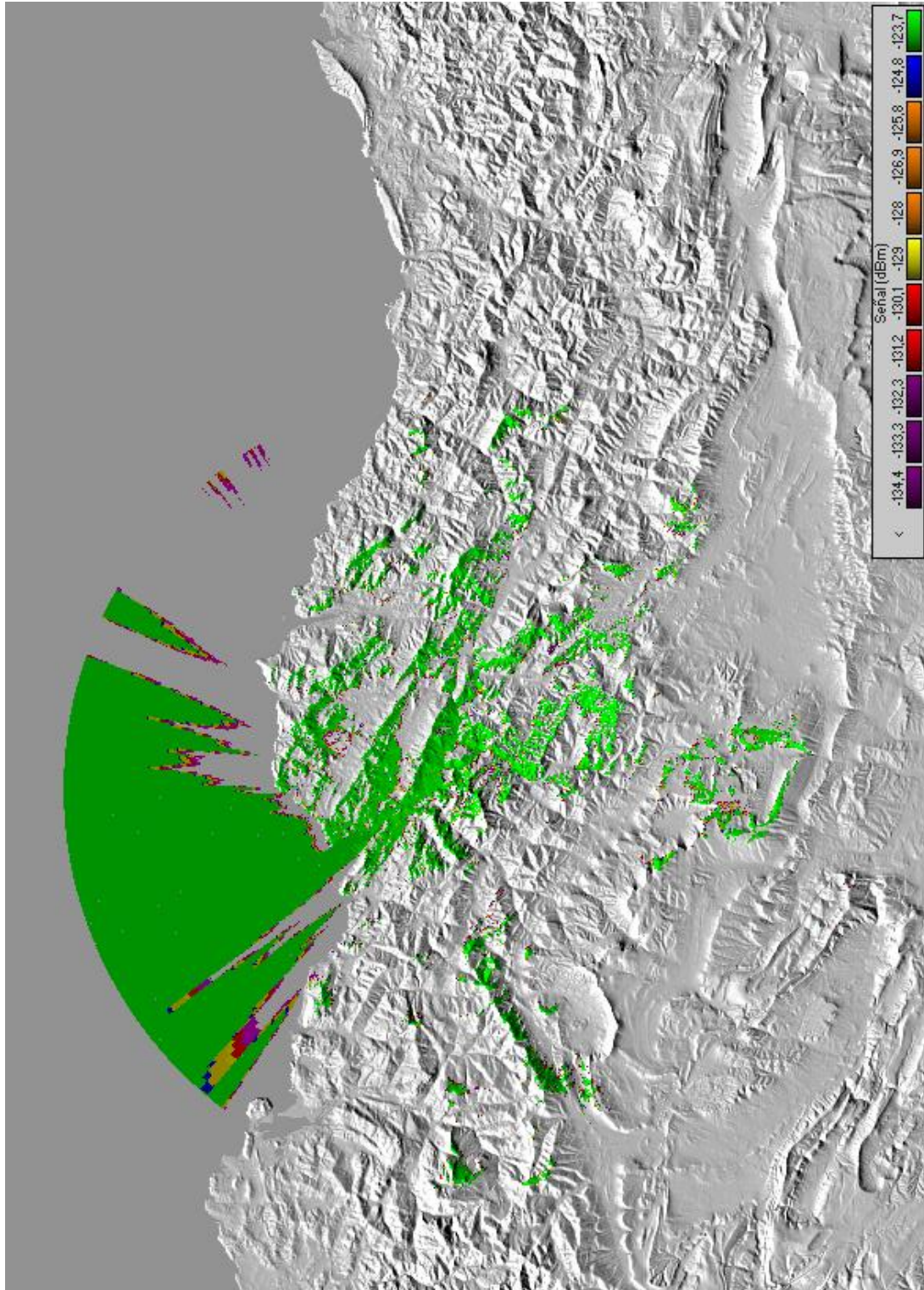
13.5.1.8 Zaldiaran: Potencia Mínima



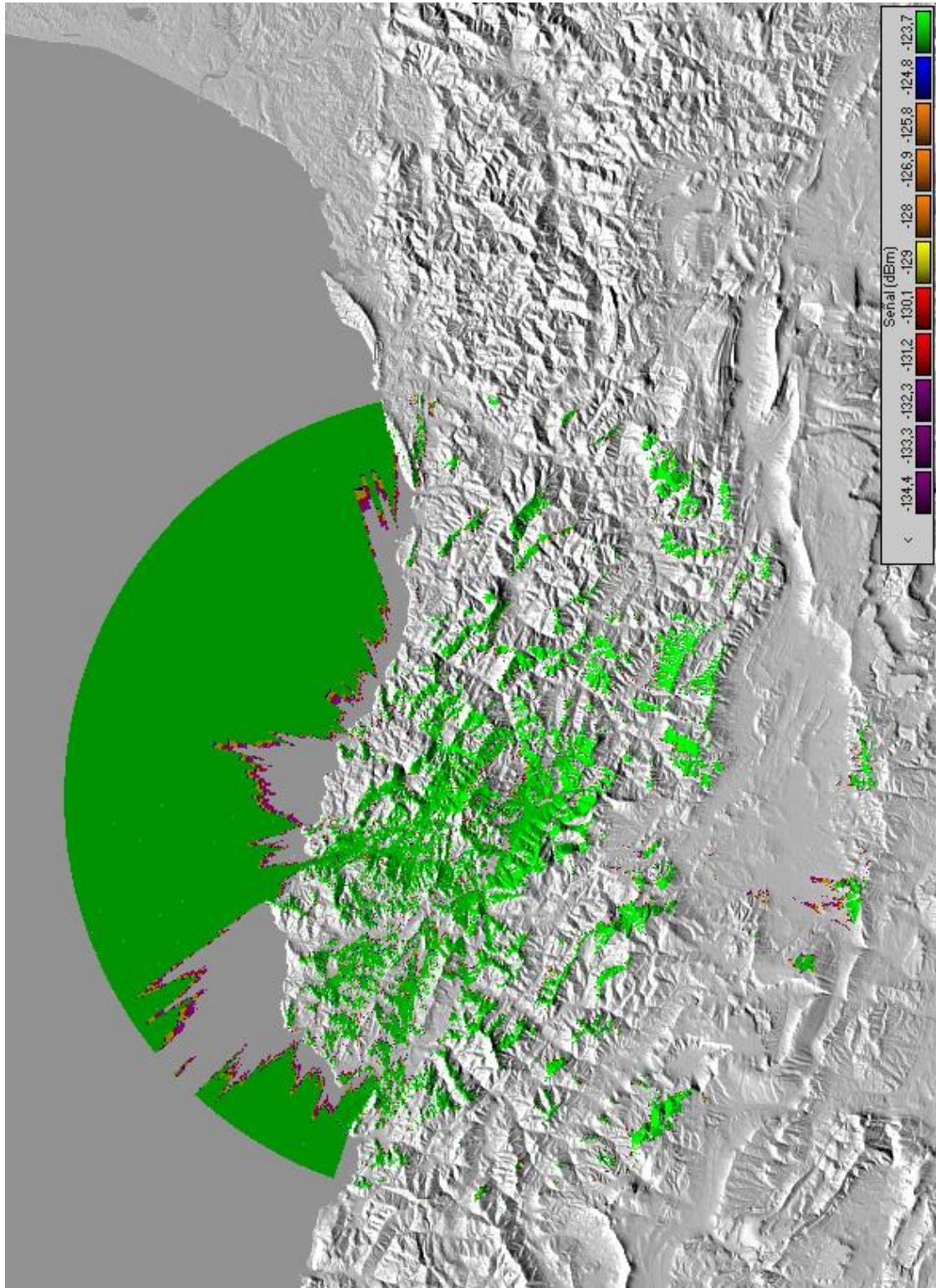
13.5.2 Prácticos

- Potencia Máxima
 - Ganeta
 - Oiz
 - Jaizkibel
 - Zaldiaran
- Potencia Mínima
 - Ganeta
 - Oiz
 - Jaizkibel
 - Zaldiaran

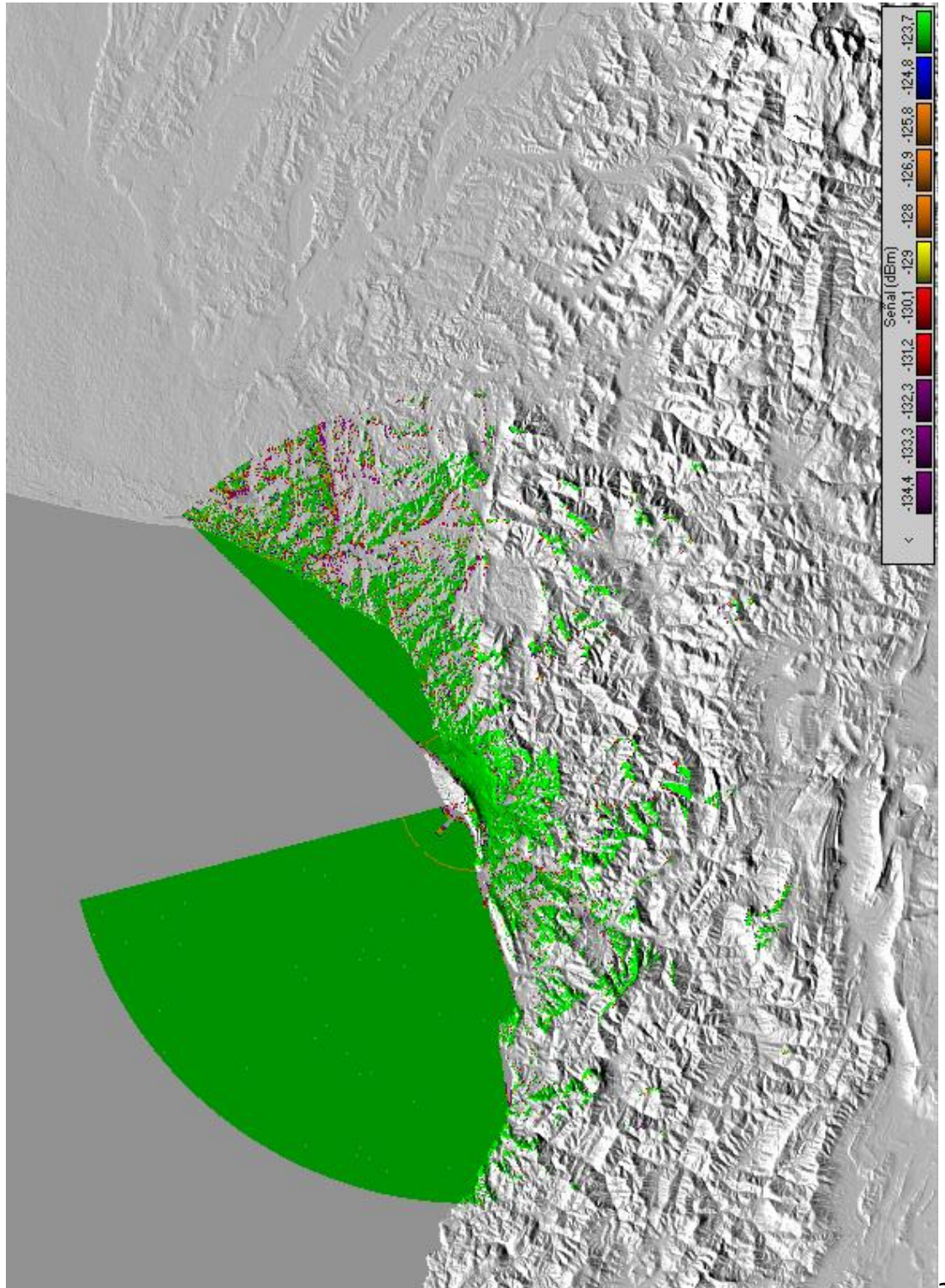
13.5.2.1 Ganeta: Potencia Máxima



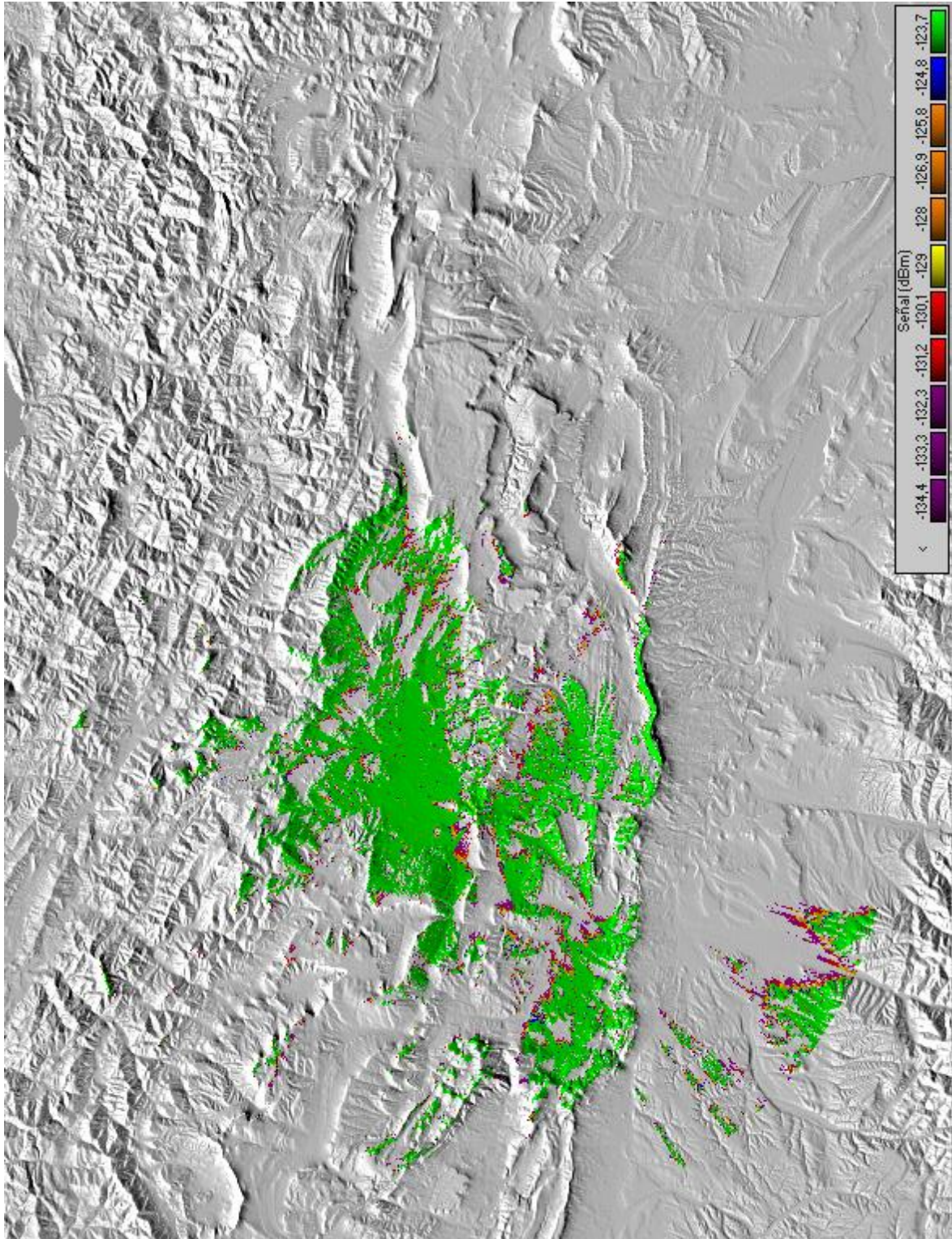
13.5.2.2 Oiz: Potencia Máxima



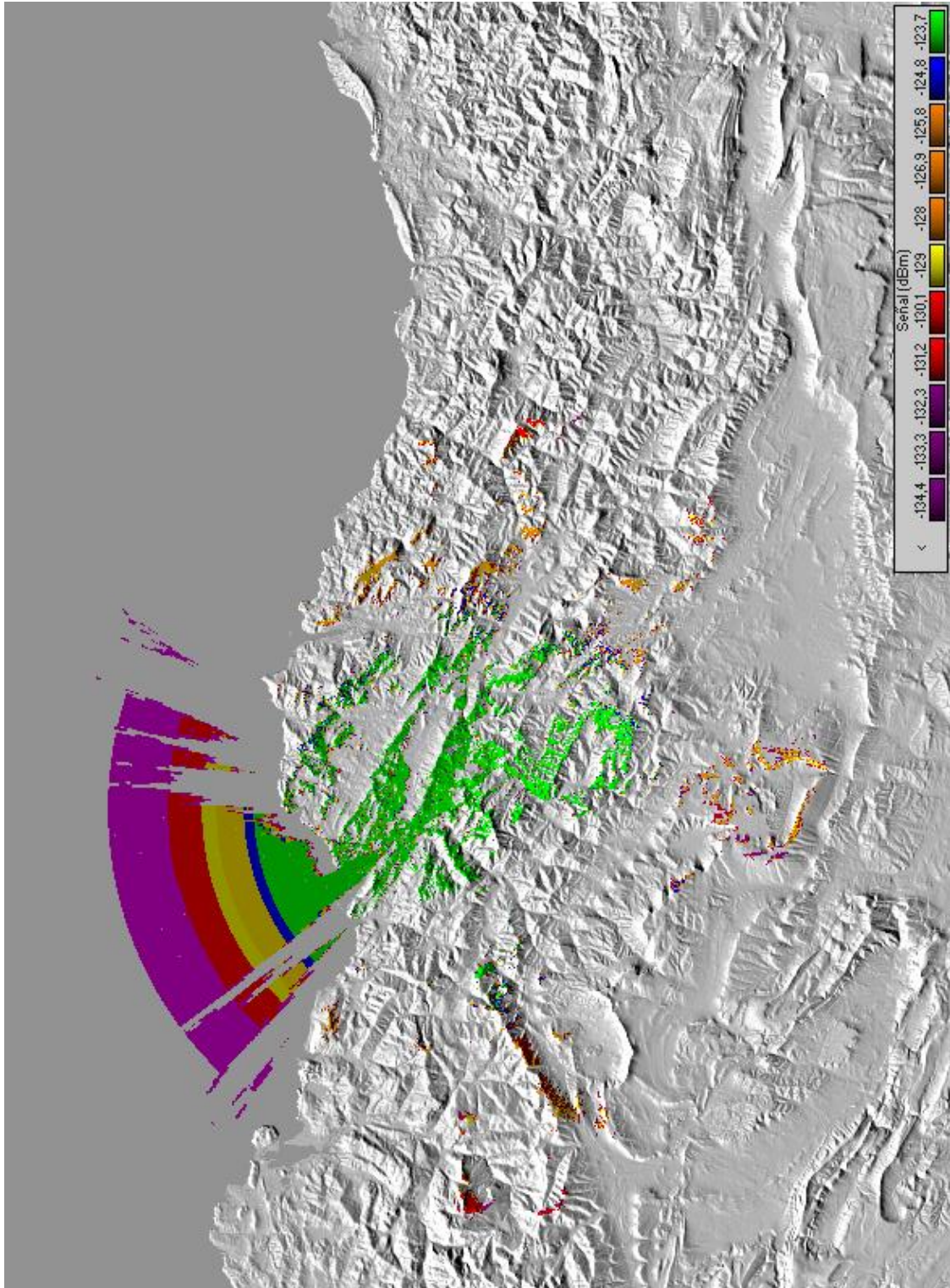
13.5.2.3 Jaizkibel: Potencia Máxima



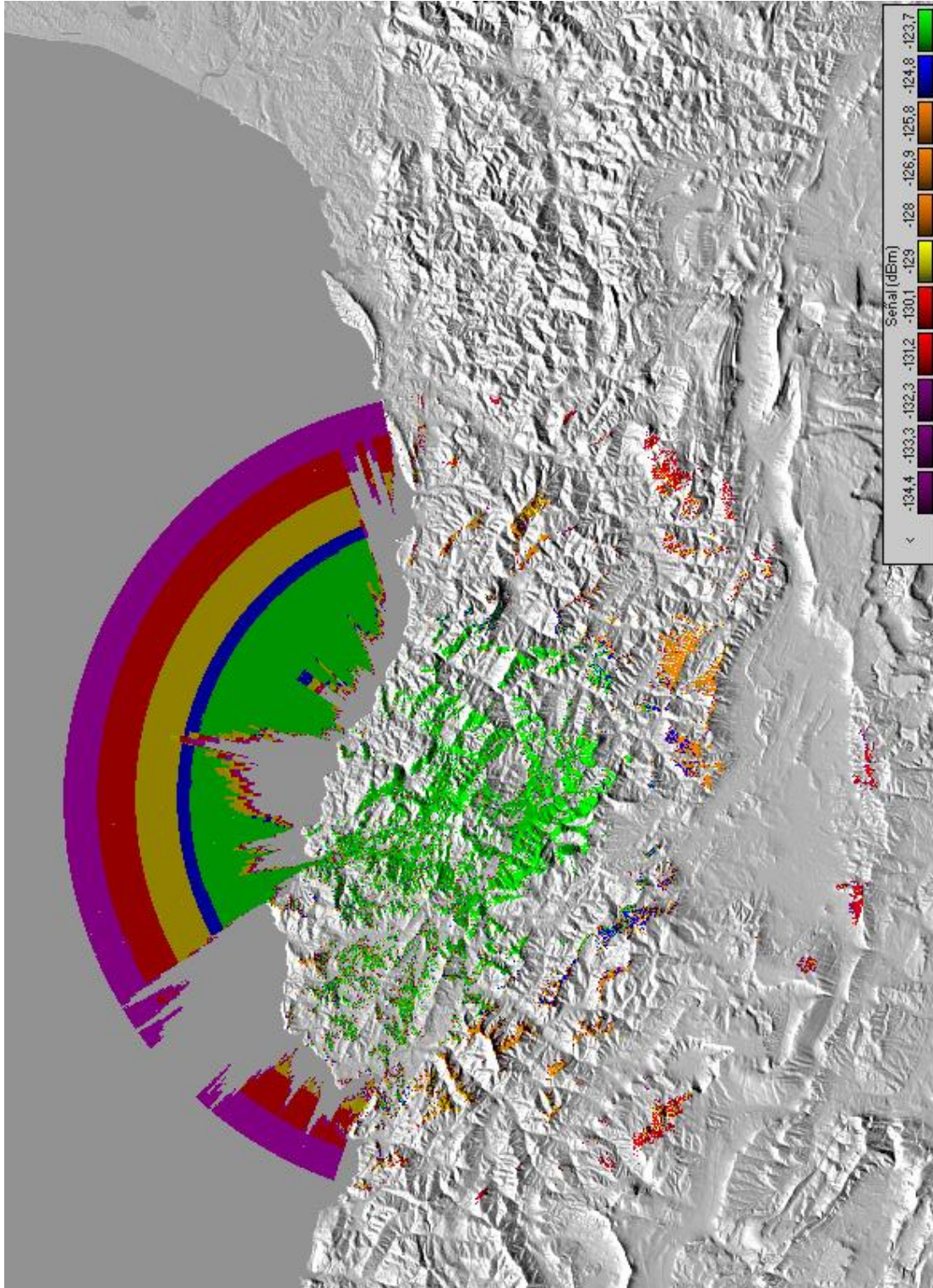
13.5.2.4 Zaldiaran: Potencia Máxima



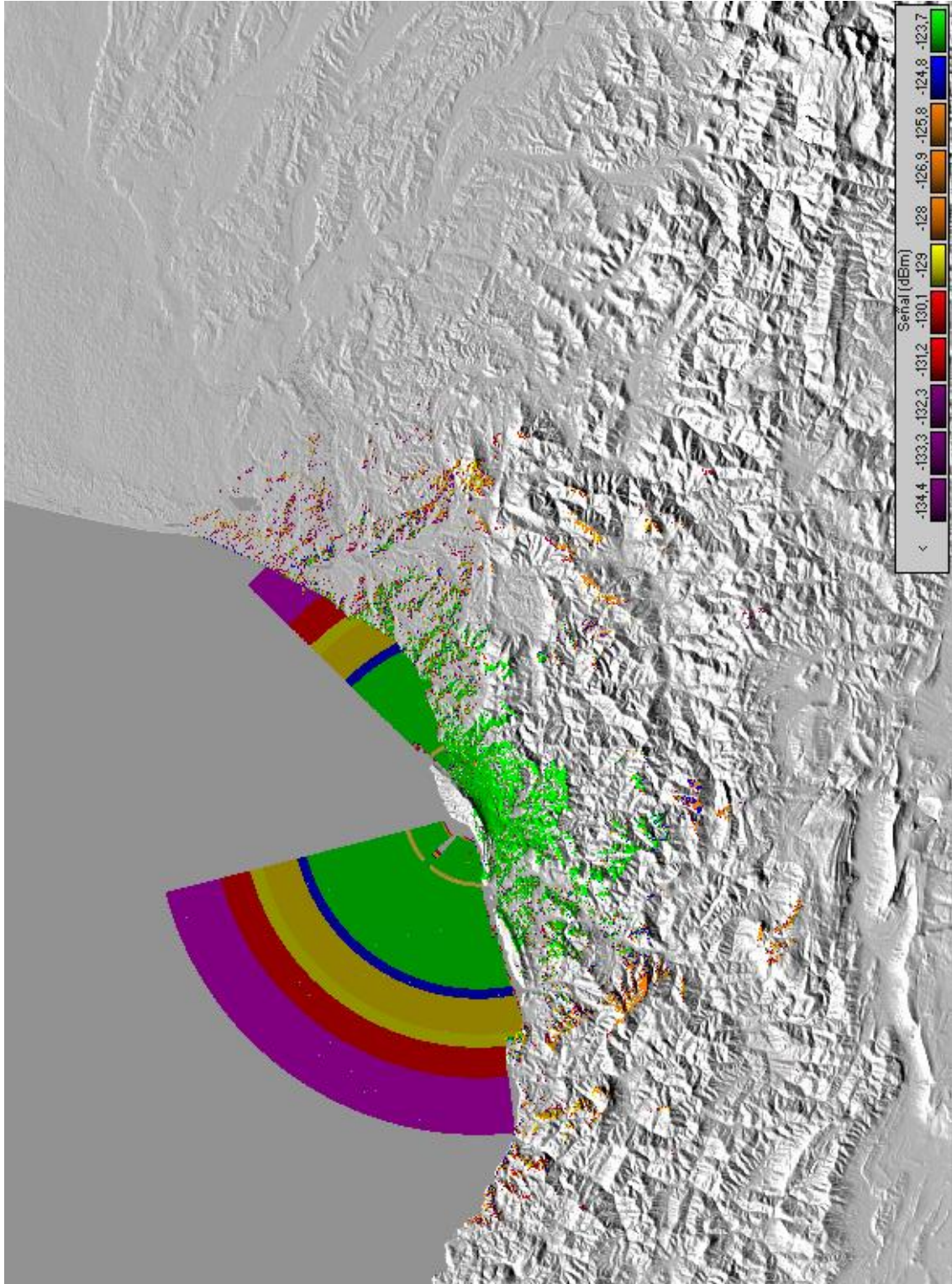
13.5.2.5 Ganeta: Potencia Mínima



13.5.2.6 Oiz: Potencia Mínima



13.5.2.7 Jaizkibel: Potencia Mínima



13.5.2.8 Zaldiaran: Potencia Mínima

