

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Medición y Análisis de las Redes de Comunicaciones Móviles 4G LTE en Cullera”

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

**Sara Grau Mompó**

Tutor/a:

**David Gómez Barquero**

**GANDIA, 2019**



## **Resumen**

En este Trabajo Final de Grado se ha medido la red comercial 4G+ del operador Vodafone (tecnología LTE-Advanced), en el municipio de Cullera utilizando un teléfono móvil con la aplicación Android NetMonitor.

Las medidas se han analizado para encontrar: (i) zonas con una mala cobertura donde el nivel de señal es muy bajo, (ii) zonas con sobrealcances donde se recibe señal desde una estación base lejana, (iii) zonas con continuos traspasos (handovers) entre celdas de dos o más estaciones base (efecto ping-pong).

Además de las medidas, en este Trabajo Final de Grado se han realizado simulaciones de cobertura mediante el programa Xirio *Online* para comparar la cobertura simulada con las medidas y con la que ofrece Vodafone.

*Palabras clave: 4G+ LTE-Advanced, medidas de campo, cobertura, NetMonitor, Xirio Online.*

## **Abstract**

In this Project, the 4G + commercial network of the Vodafone operator (LTE-Advanced technology) was measured in Cullera using a mobile phone with the Android NetMonitor application.

The measurements have been analyzed to find: (i) areas with poor coverage where the signal level is very low, (ii) areas with overheads where a signal is received from a distant base station, (iii) areas with continuous handovers between cells of two or more base stations (ping-pong effect).

In addition to the measures, in this Project, simulations of coverage have been carried out through the Xirio Online program to compare the simulated coverage with the measures and with that offered by Vodafone.

*Keywords: 4G+ LTE-Advanced, drive test, coverage, NetMonitor, Xirio Online.*

## **Agradecimientos**

*El primero al que debo nombrar es a mi hijo David, que aunque ha sido un trabajo muy duro compaginar los estudios con ser madre, él me ha hecho querer ser una mejor madre y ello conllevaba acabar de una vez lo que un día empecé y dejé a medias.*

*La persona más importante y que ha hecho que todo esto fuera hacia delante, ha sido Víctor, mi marido. Por haber hecho lo posible y lo imposible también. Nunca podré pagarle todo esto, porque siguió creyendo en mí, cuando yo hacía mucho tiempo que había dejado de hacerlo. Por esto le debo sentirme una persona realizada, por haber acabado al final lo que hace años que debería haber hecho.*

*A mi familia, la carnal y la política, por haberme ayudado en todo momento, por dedicarle a mi hijo todo el tiempo que no he podido estar yo a su lado, por cuidarlo, quererlo, tratarlo con mucho amor y hacerlo con la mejor intención posible.*

*A mi tía por darme el empujón que necesitaba con una sencilla frase “la más tonta de aquí es Sara” (por no haber acabado la carrera). Por ahora, hace un año que la dijo y movió mi mundo, haciendo que replanteara muchas cosas y que hoy esté aquí escribiendo estas palabras.*

*A mi tutor y profesor David Gómez Barquero, por ayudarme en todo momento, por enseñarme, por contestarme los miles de mails que le he enviado en este proceso.*

*A mis compañeros, los de tercero y los de cuarto, por ser maravillosos conmigo aunque llegué de nuevo.*

*A todos los profesores sin excepción que me han enseñado para que hoy esté aquí escribiendo estas palabras.*

*A Albert por haberme hecho reír mucho con sus historias personales, quitando tensión a muchos momentos a los largo del curso 2018/2019.*

*Por todo y por más, GRACIAS.*

## **Acrónimos**

AIPN	All IP Network
AuC	Authentication Center
BTS	Estación Transceptora Base
CDF	Commutative Distribution Function
CI	Cell Identifier
CID	Cell ID (Identifier)
CQI	Channel Quality Indicator
DL	Downlink
EARFCN LTE	Evolved-UTRA Absolute Radio Frequency No
EB	Estación Base
ENodeB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core o Core Network
EPS	Evolved Packet System
FDD	Frequency Division Duplexing
FFT	Transformada de Fourier
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
GTP-C	Tunnelling Protocol-Control
GTP-U	Tunnelling Protocol-User
HLR	Home Location Register
HSS	Home Location Service
IP	Internet Protocol
LAC	Location Area Code
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
BPS	Bits Per Second
MCC	Mobile Country Code
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MNC	Mobile Network Code
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Acces
PAGING	Gestion de la localizacion en estado idle
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDN GW	Packet Data Network Gateway
PCI	Physical Cell Identity
PSC	Primary Scrambling Code
RB	Resoruce Block

RNC	Radio Network Controller
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSNR	Reference Signal Signal To Noise Ratio
SaaS	Software as a Service
SC-FDMA	Single Carrier-Frequency Division Multiple Acces
SGW	Serving Gateway
SIMO	Single inpur Multiple Output
SMS	Short Message Service
TA	Tracking Area
TAC	Tracking Area Code
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplexing
TRS	Total Radieted Sensivity
TIMESTAMP	Tiempo de Medida
TRS	Total Radieted Sensitive
TTT	Time To Trigger
UE	User Equipament
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN-UMTS	Terrestrial RAN

## Índice de Tablas

Tabla 1 Características principales operadores en España.....	2
Tabla 3 Bandas de Frecuencias en Europa .....	8
Tabla 4 Tabla Ancho de Banda y número portadoras .....	9
Tabla 5 Cálculo de Capacidad (usuarios/estación) .....	31

## Índice de Imágenes

Imagen 1: Vista aérea del municipio de Cullera .....	3
Imagen 2: Zonas de Cullera donde se realizarán las medidas de la red 4G.....	3
Imagen 3 Cómo funciona SIMO.....	7
Imagen 4 Cómo funciona MIMO .....	7
Imagen 5: FDD vs TDD.....	8
Imagen 6 Espaciado subportadoras.....	9
Imagen 7 Arquitectura Evolved Packed System.....	11
Imagen 8 Arquitectura Evolved Packed System I.....	12
Imagen 9: Vista aplicación Netmonitor .....	13
Imagen 10 NetMonitor segunda pestaña .....	14
Imagen 11 NetMonitor tercera pestaña .....	14
Imagen 12 Menú principal de NetMonitor.....	15
Imagen 13 Cómo exportar datos y directorio de datos .....	16

Imagen 14 Salir de la aplicación .....	16
Imagen 15 Borrado de datos al abrir la aplicación .....	16
Imagen 16 Abrir archivo .kml en Excel.....	17
Imagen 17 Cómo archivo .kml en Excel.....	17
Imagen 18 Creación esquema del archivo .kml.....	17
Imagen 19 Crear un nuevo Script en Matlab.....	18
Imagen 20 Abrir archivo kml .....	19
Imagen 21 Estación base y medidas asociadas a su conexión.....	19
Imagen 22 Para Procesado de datos mejor hacerlo desde la carpeta sitios temporales .....	20
Imagen 23 Creación de carpetas para almacenamiento de datos.....	20
Imagen 24 Directorio para almacenar las EB.....	20
Imagen 25 Pasos para modificar diferentes parámetros de las EBs .....	21
Imagen 26 Modificación de icono y etiqueta de las EBs.....	21
Imagen 27 Pasos para modificar diferentes parámetros de las medidas.....	22
Imagen 28 Modificación de icono y etiqueta de los puntos de medidas .....	22
Imagen 29 Almacenamiento de medidas .....	23
Imagen 30 Ordenar las medidas alfabéticamente .....	23
Imagen 31 Guardar archivo en Google Earth.....	24
Imagen 32 Guardar archivo en formato kml .....	24
Imagen 33 Abrir archivo kml sin borrar lo guardado en Google Earth .....	25
Imagen 34 Nivel de señal muy bajo ]-Infinito, -104] dBm .....	26
Imagen 35 Nivel de señal bajo [-103,97] dBm.....	27
Imagen 36 Nivel de señal medio [-96,90] dBm.....	27
Imagen 37 Nivel de señal muy alto [-89,-77] dBm.....	27
Imagen 38 Nivel de señal excelente [-76,+Infinito[ dBm.....	28
Imagen 39 Nivel de potencia de señal catalogado en colores.....	28
Imagen 40 Niveles de potencia menores que -112dBmI .....	29
Imagen 41 Cobertura oficial 4G+ de Vodafone .....	29
Imagen 42 Historial sobre los resultados obtenidos de la medición .....	30
Imagen 43 CDF sobre los resultados obtenidos de la medición.....	30
Tabla 5 Cálculo de Capacidad (usuarios/estación) .....	31
Imagen 44 EB que dan cobertura a lo largo del recorrido según NetMonitor .....	32
Imagen 45 Resultado de cobertura de cada EB.....	32
Imagen 46 Información sobre una EB.....	33
Imagen 47 Precisión de la ubicación de algunas EBs.....	33
Imagen 48Ampliación del efecto ping-pong en dos puntos de la población de Cullera Cada punto está coloreado según la celda a la que se está conectado. Se puede apreciar cómo van intercambiándose varios colores durante la ruta medida .....	34
Imagen 49 Efecto ping-pong en la zona centro y Bulevar .....	35
Imagen 50 Efecto ping-pong en la zona San Antonio.....	35
Imagen 51 Sobrealcances en el recorrido de medida de cobertura.....	36
Imagen 52 RSRP: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 32w .....	37
Imagen 53 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 32w.....	37
Imagen 54 Solapamiento: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX32w.....	38
Imagen 55 RSRP: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 20w .....	38
Imagen 56 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 20w.....	39
Imagen 57 Solapamiento: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 20 .....	39
Imagen 58 RSRP: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w .....	40
Imagen 59 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w.....	40
Imagen 60 Solapamiento: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w.....	41
Imagen 61 RSRP: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 20w .....	41

Imagen 62 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w .....	42
Imagen 63 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 20w.....	42
Imagen 64 RSRP: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 15w .....	43
Imagen 65 Mejor servidor: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 15w .....	43
Imagen 66 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 15w.....	44
Imagen 67 RSRP: 847MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 15w .....	44
Imagen 68 Mejor servidor: 847MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 15w .....	45
Imagen 69 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 15w.....	45
Imagen 70 RSRP: 847MHz, Inclinación 22°, Potencia TX 12w .....	46
Imagen 71 Mejor servidor: 847MHz, Inclinación 22°, Potencia TX 12w .....	46
Imagen 72 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 22°, Potencia TX 12w.....	47

# Índice

1. Introducción .....	1
1.1. Presentación.....	1
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Metodología.....	4
1.4. Estructura del documento .....	5
2. Tecnología 4G LTE.....	5
2.1. Introducción .....	5
2.2. Objetivos LTE .....	6
2.3. Interfaz radio.....	7
2.4. Arquitectura de red LTE.....	10
2.5. LTE Advanced o 4G+ .....	12
3. NetMonitor .....	13
3.1. Introducción .....	13
3.1.1. Configuración .....	15
3.1.2. Realización de medidas.....	15
4. Procesado de Datos .....	17
4.1. Excel.....	17
4.2. Matlab.....	18
4.3. Google Earth .....	19
5. Xirio Online .....	25
5.1. Introducción .....	25
5.1. Situación de las EB.....	25
5.2. Creación nuevos estudios.....	25
6. Análisis y Resultados.....	26
6.1. Resultados de las medidas.....	26
6.1.1. Nivel de Señal .....	26
6.1.2. Análisis .....	28
6.1.3. Cálculos de Capacidad.....	31
6.2. Según zona de cobertura.....	32
6.2.1. Resultados .....	32
6.2.2. Análisis .....	33
6.3. Simulación de Cobertura .....	36
6.3.1. Resultados de Simulación de Cobertura.....	36
6.3.2. Análisis de las simulaciones de Cobertura.....	47
7. Conclusiones .....	48
8. Bibliografía.....	50



# 1. Introducción

---

## 1.1. Presentación

En la actualidad es impensable imaginar que no se puede estar conectado, prácticamente en cualquier lugar. Ello es debido a la cobertura ofrecida por los operadores de telefonía móvil, gracias al despliegue de sus estaciones base, a lo largo y ancho de la geografía.

Desde principio de los 80 ha habido una evolución en las redes de comunicaciones móviles, esto se ha traducido en un cambio en la naturaleza de los propios sistemas, la velocidad de estos, su tecnología y las frecuencias utilizadas. Cada generación se diferencia de la anterior por sus frecuencias, anchos de banda y tecnología inalámbrica.

La primera generación (1G), era analógica, sólo se podían realizar llamadas de voz, fue la primera vez en la que se pudo comunicar telefónicamente de forma inalámbrica, es decir, sin cables.

La segunda generación (2G) o GSM, introdujo la mejora del envío y recepción de pequeños mensajes de texto, llamados SMS (Short Message Service).

Con la tercera generación (3G) o UMTS, aparecen los teléfonos inteligentes o *Smartphone*, con ellos se puede navegar en Internet con interfaces similares a los de un ordenador.

En el presente se utiliza la tecnologías de cuarta generación (4G), LTE (Long Term Evolution) o LTE-A (LTE Advanced). LTE-A es una evolución de la 1ª acercándose con datos de velocidad, permite aumentar más aún la velocidad de bajada y poder llegar a máximos teóricos de 300Mbps, más cercanos al verdadero estándar de 4G. Nos permiten tener altas velocidades de navegación, para poder acceder a servicios como videos de alta definición, redes sociales y video llamadas por medio de internet.

La Quinta generación (5G) o NR (New Radio) es la nueva generación de comunicaciones móviles. La 5G, al igual que la 3G y la 4G, ha sido desarrollada por el foro internacional de estandarización de tecnologías de comunicaciones móviles 3GPP. Permitirá tasas de transmisión del orden de gigabits por segundo (Gb/s), unas latencias muy bajas, equiparables a la conexión mediante cables, y un aumento del número de usuarios y dispositivos conectados. Vodafone ya ha empezado las transmisiones 5G en 15 ciudades españolas.

Actualmente los operadores móviles en España tienen repartido el espectro radioeléctrico como se muestra en la Tabla 1:

				
<b>800 MHz</b> <b>4G Banda 20</b>	10 MHz	10 MHz	10 MHz	-
<b>900 MHz</b> <b>2G/3G Banda 8</b>	14,8 MHz	10 MHz	10 MHz	-
<b>1800 MHz</b> <b>2G/4G Banda 3</b>	20 MHz	20 MHz	20 MHz	14,8 MHz
<b>2100 MHz</b> <b>3G Banda 1</b>	15 MHz FDD 5 MHz TDD	15 MHz FDD 5 MHz TDD	15 MHz FDD 5 MHz TDD	15 MHz FDD 5 MHz TDD
<b>2600 MHz</b> <b>4G Banda 7</b>	20 MHz	20 MHz FDD 20 MHz TDD	20 MHz	10 MHz TDD (autonómicos)
<b>3500MHz</b> <b>5G Banda 42</b>	90 MHz	90 MHz	100 MHz	80 MHz

Tabla 1 Características principales operadores en España

El Duplex por División de Frecuencia (FDD) soporta la comunicación de radio con dos canales o frecuencias distintas, uno para el enlace descendente o *DownLink* (DL) y otro para el enlace ascendente o *UpLink* (UL). El Duplex por División de Tiempo (TDD) utiliza un único canal o frecuencia, tanto para el DownLink como para el Uplink, pero los instantes temporales en los que se hace cada uno son diferentes.

Es conocido que, cuanto mayor ancho de banda, mayor capacidad para transmitir y se garantizará un mejor servicio a un mayor número de usuarios sin saturar la red. Por otro lado, cuanto mayor sea la frecuencia de operación, menor será la cobertura, ya que las pérdidas de propagación aumentan con la frecuencia.

Para que un operador pueda garantizar el servicio en una cierta zona, se ha de realizar un estudio previo, llamado planificación de cobertura. En éste se fijará la tasa que deseamos ofrecer, sabiendo que ésta depende de otros factores como son el nivel de señal recibida, el ancho de banda asignado a usuario y nivel de interferencia de otras estaciones base.

La planificación usando células hexagonales es común para las tecnologías celulares en 2G. Cada célula o celda tiene sus grupos de frecuencias agrupados en una serie de canales, a las celdas adyacentes se le asignan diferentes frecuencias para evitar así la diafonía. Se pueden destinar los mismos grupos de frecuencias a celdas alejadas entre sí, llamadas celdas cocanal. En 3G se reutilizan las frecuencias en cada estación base, es decir, todas las estaciones base utilizan las mismas frecuencias y todo el ancho de banda disponible (5 MHz), de forma que es más eficiente porque un usuario puede utilizar todo el espectro. En 4G todas las estaciones de un operador utilizan la misma frecuencia, como en 3G. El ancho de banda puede llegar hasta 20 MHz, aunque normalmente los operadores disponen de 10 MHz. Es una tecnología escalable, donde se puede adaptar al ancho de banda de las tecnologías predecesoras. En 4G los recursos se asignan en el tiempo y la frecuencia a todos los usuarios en función del número de usuarios, el tráfico generado por cada usuario, el nivel de señal recibida, etc.

Todas las tecnologías de redes móviles conviven hoy en día, pero cierto es que para que un dispositivo navegue por Internet primero intentará conectarse a una red 4G.

Sabiendo la delimitación del área que cubrirá cada celda, se hace un mallado, éste nos indicará el lugar idóneo donde colocar las estaciones base para cubrir la mayor parte del terreno posible. No siempre pueden colocarse en el lugar más apropiado debido a que hay comunidades de vecinos que no las quieren en sus azoteas.

Existen programas para la simulación de cobertura sobre mapas cartográficos, en los que se sitúan las estaciones base configurando sus parámetros y nos ofrecen de manera fidedigna un mapa de cobertura sobre la zona. Hay versiones gratuitas que aunque su simulación no es de alta calidad, puede ser muy útil en entornos académicos.

El tarea principal del proyecto es la medición y el análisis de cobertura de una red comercial 4G en el núcleo urbano de la ciudad de Cullera. Es un municipio costero de la provincia de Valencia, cuya orografía y distribución puede verse en la Imagen1. Tiene una población de alrededor de 22.000 habitantes censados en 2017.



Imagen 1: Vista aérea del municipio de Cullera

La medición de cobertura se hará sobre la red 4G comercial de Vodafone. En cuanto al ámbito de medidas se ha tomado como referencia el centro de la ciudad. También se consideran zonas de interés la zona del Bulevar, San Antonio y la carretera que rodea a la montaña de esta ciudad, como se muestra en la Imagen 2.

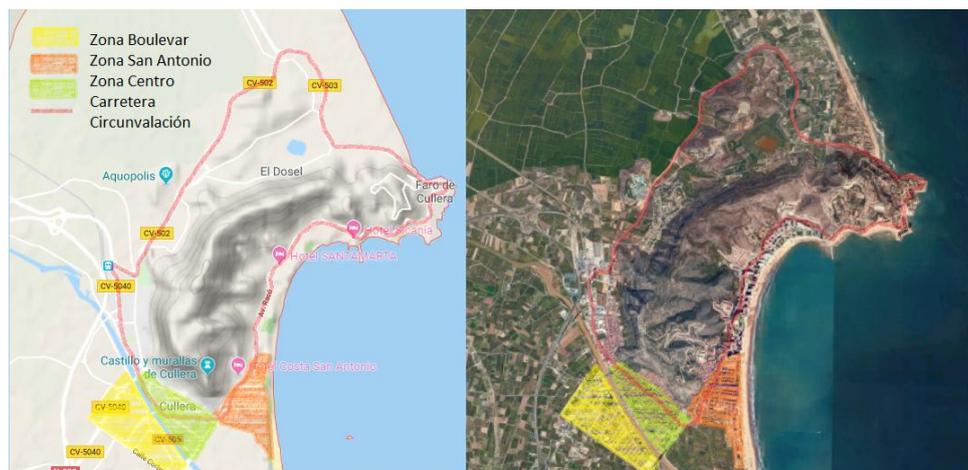


Imagen 2: Zonas de Cullera donde se realizarán las medidas de la red 4G

## 1.2. Objetivos

Para medir y analizar la cobertura inalámbrica 4G LTE-Advance que ofrece la operadora de telecomunicaciones de Vodafone, a los usuarios de la ciudad de Cullera. Para ello, se han definido los siguientes objetivos concretos:

1. Realizar medidas en Cullera de la red comercial 4G LTE-A de Vodafone utilizando un teléfono móvil. Para ello se ha utilizado la aplicación NetMonitor para Android [11].
2. Análisis, procesado y evaluación de los datos extraídos de las medidas en Google Earth.
  - a. Estudio de zonas pobres en la cobertura, donde el nivel de señal es menor de la sensibilidad de nuestro terminal -112 dBm.
  - b. Localización de las estaciones base, en los 3 ejes de coordenadas en el espacio, así como el número de sectores en cada emplazamiento.
  - c. Identificación de sobre alcances entre celdas, debidos a una celda da cobertura a un móvil que se encuentra en el área de cobertura de otra.
  - d. Identificación de efecto ping-pong, provocados por los continuos *handovers*, o trasposos de celda entre dos estaciones base.
3. Simulación de cobertura 4G LTE-A con una herramienta profesional de planificación radio, para comparar la cobertura simulada con las medidas y con la que ofrece Vodafone. Se ha utilizado el programa Xirio *Online* [12].
4. Propuesta de mejoras a la red 4G LTE-A de Vodafone

## 1.3. Metodología

La metodología que se seguirá en este trabajo fin de grado pasará en primera instancia por realizar las medidas a lo largo del municipio de Cullera con la aplicación Netmonitor y el terminal Samsung s7 Edge.

En segundo lugar se procesarán los datos en Excel para poder extraer los valores de las medidas, para posteriormente poder procesarlos con Matlab y obtener estadísticos de las medidas, como la función e distribución acumulativa (CDF) o histogramas de las medidas.

En tercer lugar los datos obtenidos de la medición en Netmonitor, correspondientes a un archivo kml, se abrirán en el programa Google Earth y se clasificarán de dos formas, una identificando las zonas de cobertura de cada celda y por ende la de todo el municipio, y otra en la que se agruparán los datos por nivel de señal en rangos de códigos de colores.

Finalmente se deberá intentar emular la cobertura en el programa de simulación de cobertura Xirio online, para ello deberemos averiguar número de antenas, sectores, orientación o azimut de cada uno de ellos, a que altura están situados, inclinación o *downtilt*, esta información se extraerá de la web del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo [13], y posteriormente se corroborará en cada uno de los emplazamientos.

## 1.4. Estructura del documento

En el capítulo 1, Introducción, se presenta el proyecto, el objetivo de éste, la metodología seguida y los problemas que se han tenido durante su desarrollo.

En el capítulo 2, Tecnología 4G LTE, se describe la tecnología en la que se basa la conexión del terminal con la estación base (EB) para medir la cobertura. Se hace una breve introducción. Se definen objetivos de LTE, características principales, se define el interfaz radio, la arquitectura de red y finalmente se habla sobre LTE-Advanced.

En el capítulo 3, Netmonitor, se presenta la herramienta de trabajo, como se ha configurado y la realización de las medidas con ella.

En el capítulo 4, Procesado de datos, se informa cómo se han tratado los datos, en diferentes programas, como son el Excel, Matlab y Google Earth.

En el capítulo 5, Xirio Online, se presenta el programa y como se configuran los estudios y la cobertura multitransmisor.

En el capítulo 6, Análisis y resultados, se muestran los frutos del tratamiento de los datos y se analizan.

En el capítulo 7, Conclusiones, se da una visión general del proyecto y recapitular la información más relevante de forma breve y concisa.

## 2. Tecnología 4G LTE

---

### 2.1. Introducción

El sistema móvil 4G LTE está basado totalmente en IP. El objetivo es procurar altas velocidades, calidades, alta capacidad, seguridad y servicios de coste reducido para servicios de voz y datos, multimedia e internet a través de IP. Para usar la red de comunicación móvil 4G, los terminales de los usuarios deben ser capaces de seleccionar el sistema inalámbrico de destino. Para proporcionar servicios inalámbricos en cualquier momento y en cualquier lugar, la movilidad del terminal es un factor clave en 4G.

					
<b>Año</b>	1970 - 1980	1980 -1990	2000- 2003	2000	2010
<b>Ancho de Banda</b>	30 kHz	Cada canal de 200 kHz en bloques de 25 kHz		5 - 20 MHz	5-20 MHz (hasta 40 MHz)
<b>Frecuencia (MHz)</b>	800- 900	850 - 1900 (GSM) 825 - 849 (CDMA)	850 - 1900	aproximadamente 800 - 2500	cubre diferentes bandas (3, 7, 20); 800, 1800 y 2600
<b>Multiplexación</b>	FDMA	TDMA CDMA	TDMA CDMA	WCDMA CDMA2000	OFDM,MC-CDMA, CDMA
<b>Servicio</b>	Sólo voz	Voz Digital, SMS, <u>roaming</u> internacional, llamada en espera, bloqueo de llamadas, identificación de llamadas, autenticación, facturación basada en los servicios prestados.	Voz, multimedia, WAP, MMS, SMS juegos móviles, acceso a correo electrónico, videoconferencia	Voz, Internet de alta velocidad, video llamadas, chat, televisión móvil, servicios multimedia, servicios de localización, correo, ...	acceso web, telefonía IP, servicios de juegos, TV alta definición y 3D, videoconferencia, computación en la nube, gestión de flujos múltiples y movimientos rápidos de terminal, DVB, ...
<b>Velocidad (kbps)</b>	1-2,4	14-64	115 (GPRS) 384 (EDGE)	384- 2000	100.000 en movimiento 1*10 <sup>6</sup> inmóvil
<b>Tecnología</b>	Analógica	Digital	Digital	Digital	Digital
<b>Conmutación</b>	Circuitos	Circuitos	Circuitos Paquetes (datos)	Paquetes	Paquetes
<b>Estándar</b>	AMPS	GSM	GPRS EDGE	UMTS (WCDMA) CDMA	LTE-TDD LTE-FDD

Tabla 2 Características diferentes Generaciones [14]

## 2.2. Objetivos LTE

Las premisas con las que se diseñó la tecnología fueron las siguientes:

- Tasas de datos de 100 Mbps en DL y 50Mbps en UL;
- Tecnología *all IP*;
- Alta flexibilidad Espectral;
- Velocidades de usuario de 120 km/h;
- Radios de celda de hasta 30 km;
- Reducción número de nodos de la red;
- Latencia de paquetes IP de 10ms;
- Ancho de Banda escalable de 1,4 a 20 MHz.

Las ventajas y diferencias que se obtuvieron respecto sus predecesoras, están incluidas en sus características principales, que son:

- Flexibilidad espectral: El interfaz radio debe poder operar en asignaciones de espectro de diferentes tamaños: 1,4 MHz, 3 MHz, 5MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz, tanto en UL como en DL. Permite el despliegue de LTE en diferentes espectros y con diferentes características como FDD y TDD.
- OFDM DL y SC-FDMA UL: En la Estación Base se realiza el procesado más complejo y con más recursos de computación. La modulación OFDM requiere

de un amplificador de potencia con alta linealidad por lo que es más adecuado para el DL. En el enlace ascendente, se utiliza SC-FDMA, con una modulación que simplifique el transmisor, manteniendo la ortogonalidad de los usuarios, compatibilidad con técnicas MIMO y reduciendo el consumo de potencia.

- Control de tasa binaria a una potencia constante:
- Múltiples antenas en transmisión y recepción: Las velocidades de Transmisión aumentan al añadir MIMO y SIMO, es decir, al aumentar el número de antenas en transmisión y recepción, porque permite diversos flujos de datos, llamado multiplexación espacial. Con ellos mejora la eficiencia espectral (bps/Hz) y la velocidad o *throughput* (Mbps).

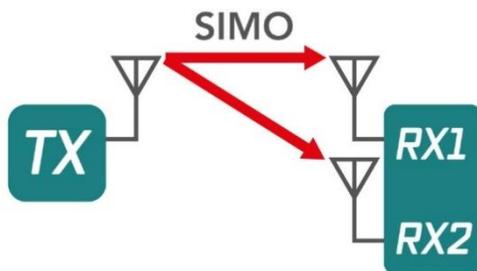


Imagen 3 Cómo funciona SIMO

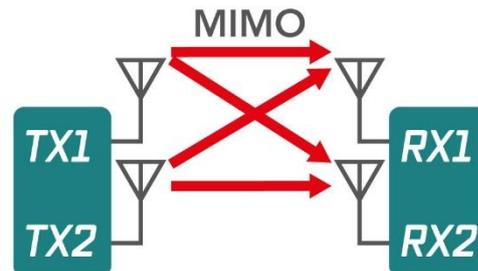


Imagen 4 Cómo funciona MIMO

- Simplificación de arquitectura de red: se dota de más inteligencia a las EB, repartiendo recursos, esto permite reducir el número de nodos de la red. Y con ello también se consigue reducir la latencia de la red.
- Todo IP, servicios de conmutación de paquetes: la red es de protocolo IP, una arquitectura «*all IP*» de extremo a extremo.
- Transmisión de contenidos multicast/broadcast: Para poder soportar un gran número de usuarios consumiendo el mismo servicio simultáneamente, es necesario hacer transmisiones en modo difusión. Este tipo de transmisiones utilizan una conexión punto a multipunto para todos los usuarios, no suponiendo ninguna limitación el número de usuarios que pueden recibir el servicio dentro del área de cobertura.

## 2.3. Interfaz radio

Flexibilidad Espectral LTE: El ancho de banda asignado para la transmisión con LTE puede ser mayor o menor. Esta flexibilidad espectral puede hacer que haya una migración de otras tecnologías de acceso radio a LTE además de despliegues progresivos en bandas compartidas con 2G y 3G. Teóricamente el ancho de banda de transmisión varía de 1MHz a 20 MHz en pasos de 180 KHz.

Duplexado LTE: Es esencial que cualquier sistema de comunicación celular debe poder transmitir en ambas direcciones simultáneamente, por esto, las transmisiones se realizan del terminal a la EB, como a la inversa. Los enlaces pueden ser:

- Enlace ascendente (*Uplink* o UL): la transmisión desde el equipo de usuario o UE al eNodoB o estación base.
- Enlace descendente (*Downlink* o DL): la transmisión desde el eNodoB o la estación base al equipo de usuario o UE.

<b>Banda</b>	<b>DL(MHz)</b>	<b>UL(MHz)</b>	<b>Separación UL/DL</b>	<b>Multiplex.</b>	<b>Ancho Banda max. (MHz)</b>
7	2620 -2690	2500 – 2570	50	FDD	20
3	1805 - 1880	1710 - 1785	20	FDD	20
1	2110 - 2170	1920 - 1980	130	FDD	20
20	791 - 821	832 -862	10	FDD	20

Tabla 3 Bandas de Frecuencias en Europa

LTE puede utilizar tanto FDD, dúplex de división de frecuencia como dúplex de división de tiempo TDD. Para la mayoría de las implementaciones de LTE normales, se utiliza el dúplex de división de frecuencia, FDD.

El FDD se recibe y transmite en dos canales de frecuencia simétricos separados, y la banda de guarda se usa para separar los canales de recepción y transmisión. La desventaja de FDD es que debe usar pares de frecuencias, basándose en la frecuencia para distinguir entre el enlace ascendente y el enlace descendente, y sus recursos unidireccionales son continuos en el tiempo. Aunque FDD puede utilizar completamente el espectro de enlace ascendente y de enlace descendente cuando admite servicios simétricos, la utilización del espectro se reducirá en gran medida cuando se admitan servicios asimétricos.

En contraste, TDD usa el tiempo para separar los canales de recepción y transmisión. Se lleva a cabo en un canal. En el sistema de comunicación móvil del modo TDD, se reciben diferentes intervalos de tiempo que usan la misma portadora de frecuencia y se transmiten como portadores del canal, y los recursos de tiempo se asignan en dos direcciones. La estación base envía una señal a la estación móvil durante un cierto período de tiempo, y el intervalo de tiempo en el medio es enviado por la estación móvil a la estación base, y la estación base y la estación móvil deben cooperar para funcionar sin problemas.

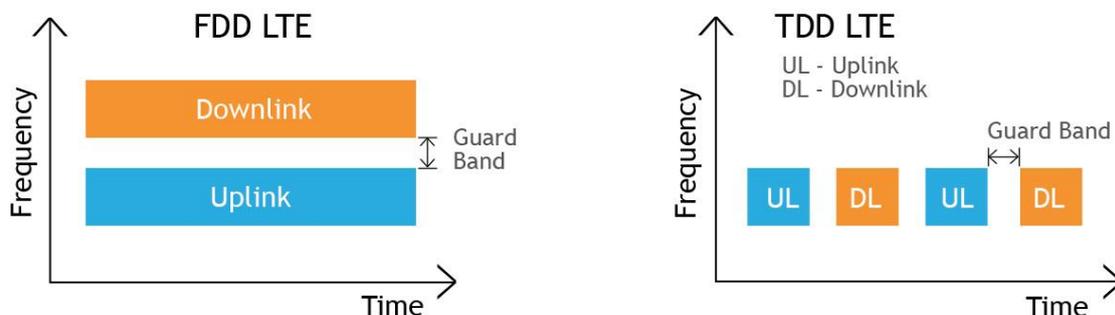


Imagen 5: FDD vs TDD

Tecnologías de Transmisión en LTE: La interfaz aérea ha sido rediseñada completamente para que se puedan conseguir mayores anchos de bandas tanto en el enlace ascendente como en el descendente. También con su rediseño se pretende evitar los desvanecimientos multicamino o *multipath*, empleando OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). En lugar de una única transmisión, los datos se dividen en muchos flujos más lentos y se transmiten simultáneamente. Incrementando el número de portadoras de banda estrecha, aumentamos el canal y así también la velocidad de trasmisión.

Las modulaciones multiportadora, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Acces* (OFDMA) en el enlace descendente o *Downlink* (DL) y *Single Carrier-Frequency Division Multiple Acces* (SC-FDMA) en el enlace ascendente o *Uplink* (UL), aportan ortogonalidad tanto en DL como UL.

Para el enlace descendente LTE, con *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), la información que se trasmite se divide en varios flujos más lentos y se envían mediante portadoras simultáneas. La ventaja del envío simultáneo en paralelo es mayor que la desventaja del efecto *multipath*.

En la tabla se puede observar la relación entre el número de portadoras y el Ancho de Banda utilizado, como se aprecia, al aumentar el ancho de banda, son necesarias mayor número de subportadoras.

Ancho de Banda (MHz)	Número de subportadoras	Tamaño de la FFT
1.25	76	128
2.5	150	256
5	300	512
10	600	1024
15	900	1536
20	1200	20148

Tabla 4 Tabla Ancho de Banda y número portadoras

Para no desperdiciar ancho de banda, el espaciado de las subportadoras es el que permite que el lóbulo lateral del espectro de cada una es cero en la frecuencia central de la adyacente, de tal forma que son ortogonales, como se muestra en la Imagen 6.

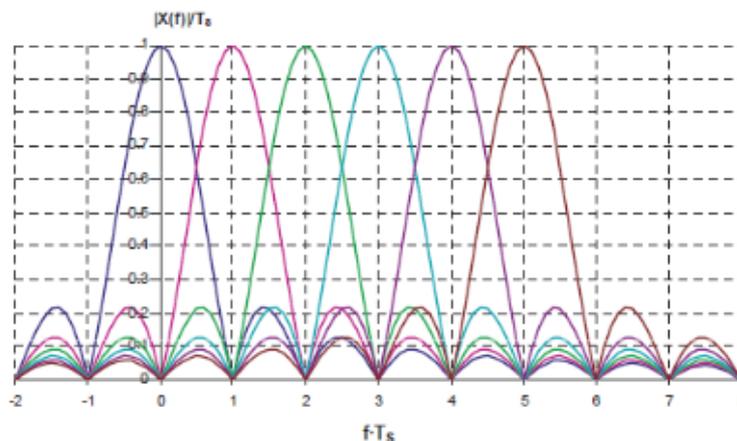


Imagen 6 Espaciado subportadoras

Los datos se ponen en flujos paralelos, y se mapean con una subportadora, pasan por la transformada inversa de Fourier para trasladar la señal al dominio frecuencia al del tiempo, se modula y envía al receptor. En el receptor se demodula y se le aplica la transformada de Fourier FFT para convertirla del dominio del tiempo a la frecuencia de nuevo para poder separar cada una de las subportadoras. Finalmente los flujos se unen de nuevo en uno solo y se entregan a la capa superior de la pila de protocolos. Ver ANEXO A.

Los parámetros de las subportadoras son:

- Espaciado: 15 kHz
- Duración de símbolo: 66.667  $\mu$ s
- Prefijo estándar cíclico: 4.7  $\mu$ s. Transmitido antes de cada símbolo para prevenir interferencia entre símbolos, debido a las diferentes longitudes de cada camino.

En el enlace ascendente OFDMA no se utiliza debido a su alto pico de consumo medio o *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) al combinar los diferentes flujos. Se utiliza *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), que es similar a OFDMA pero la señal en el dominio del tiempo es convertida a una en el dominio de la frecuencia mediante una función Transformada Inversa de Fourier. Repartiendo la información de cada bit en todas las subportadoras, reduciendo así el PARP. El número de subportadoras depende de las condiciones de la señal, la potencia de transmisión del dispositivo y el número de usuarios simultáneos en el enlace ascendente.

En lugar de dividir primero el flujo y ponerlo en diferentes flujos la señal se convierte al dominio de la frecuencia mediante una transformada de Fourier. De esta forma la información se distribuye a cada una de las subportadoras. Ver ANEXO B.

En la transmisión de datos la unidad de transmisión más pequeña en cada subportadora es de 66.667  $\mu$ s que corresponde a un símbolo. El número de bits por símbolo dependerá de la codificación escogida y de las condiciones del entorno. A mejores condiciones modulación mayor y por tanto más bits por símbolo.

Se añade una cabecera para asignar cada símbolo individual a un usuario. Siete símbolos consecutivos en 12 subportadoras son agrupados en un *Resource Block* (RB). Un RB ocupa un slot, duración de 0.5 ms. Ver imagen 10.

Una subtrama formada por 2 slots con una duración de 1 ms, en ese tiempo la estación base decide a cuántos usuarios están permitidos y cuantos recursos se les asigna a cada uno de ellos. Y finalmente 10 subtramas se combinan en una trama de radio LTE, la cual tiene una duración de 10 ms. Ver ANEXO C.

## 2.4. Arquitectura de red LTE

La arquitectura de 4G es la *Evolved Packet System* (EPS). La EPS es una evolución de la arquitectura de GPRS con una arquitectura simplificada y una red todo IP (*all IP network*, AIPN). El sistema EPS tiene por un lado una parte radio, la LTE y la Evolved Packet Core o Core Network.

La *Core Network* (EPC), está compuesta por:

- *Mobility Management Entity* (MME): nodo principal de control que tiene asignadas multitud de funciones como procedimientos de seguridad (cifrado y autenticación), gestión de la sesión terminal-red, gestión de la localización en estado idle (paging), establecimiento y liberación de portadoras (bearers).

- *Serving gateway (SGW)*: Funciones de *routing* local para los paquetes IP de datos y enrutado al PDN GW para las redes externas. Conexión entre núcleo de red y la red de transporte.
- *Packet Data Network (PDN) gateway*: servicio y conectividad a redes de paquete externas. Envío de datos necesarios a PCRF.
- *Policy and Charging Rules Function (PCRF)*: servicio y control de tarificación.

En la parte radio, la E-UTRAN, el sistema está formado por:

- *User Equipment (UE)*: el terminal de usuario.
- *Evolved Node B (eNodeB)*: estación que proporciona la interfaz radio. Se dota de mayor inteligencia a la estación base. Están conectadas entre sí, para que se realicen con mayor facilidad los traspasos entre ellas o *handovers*.

La interfaz entre la eNodeB y la *Core Network* se realiza mediante el protocolo S1-U para los datos de usuario y S1-MME para información de control (*handovers*, *paging*, etc.) También hay conexión directa entre diferentes eNodeB mediante la interfaz X2. Como muestra la Imagen 7.

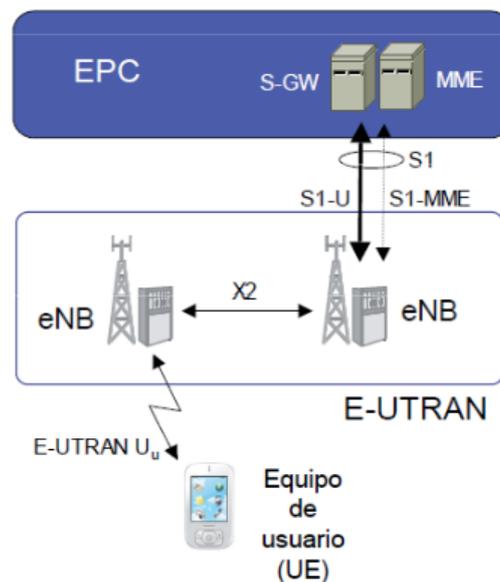


Imagen 7 Arquitectura Evolved Packet System

En la red troncal, el PDN Gateway está conectado con el SGW mediante la interfaz S5 si es del mismo operador o S8 si es de un operador diferente. En este interfaz se implementa el protocolo GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol-User*) para transportar datos del PDN Gateway al SGW. También existe el túnel GTP-C el cual transporta información de control.

En EPC existe una entidad llamada Home Subscriber Service (HSS), que reúne funcionalidades de los sistemas predecesores como el Home Location Register (HLR) y el Authentication Center (AuC). El HSS está conectado con el MME para el mantenimiento de la información de gestión de la información o la autorización de

acceso a la red LTE entre otras. La interfaz S6a que se utiliza para conectar el MME con el HSS, utiliza el protocolo *diameter* orientado a conexión (como TCP). Ver Imagen 8.

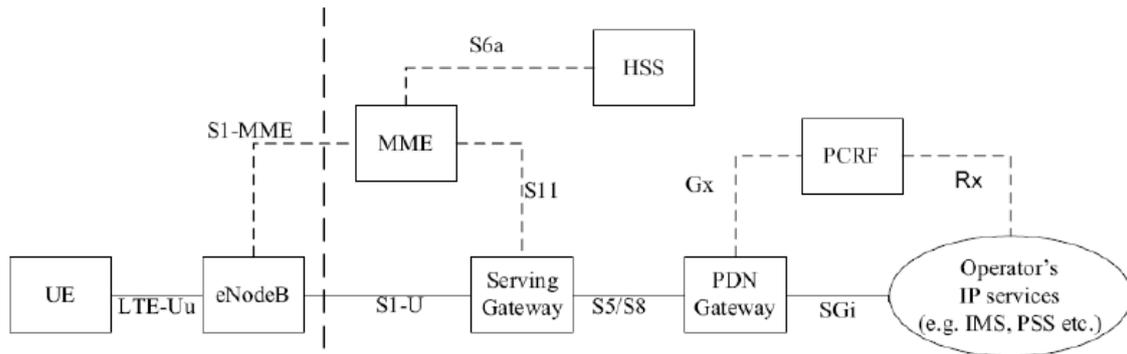


Imagen 8 Arquitectura Evolved Packet System I

## 2.5. LTE Advanced o 4G+

La tecnología LTE es una mejora de 2G y 3G, y aunque se ha comercializado como 4G la realidad es diferente, porque no cumple con los requisitos de velocidad, por ejemplo, establecido en 100 Mbps en condiciones de alta movilidad y 1Gbps en condiciones de baja movilidad de acuerdo a la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y en 1 Ghz para puntos de acceso fijos, sin cortes de conexión. Sin embargo, debido a la mejora sobre 3G, la UIT permitió a los fabricantes y proveedores etiquetarlo como 4G.

LTE evolucionó de nuevo y llegó el llamado LTE – Advanced (LTE-A), 4G LET, LTE + o True 4G. Cumple con todos requisitos estándar para una red 4G los ratios de velocidad se acercan mucho a 1 Gbps. Por ello, identificamos esta como tecnología de cuarta generación.

La diferencia principal con el LTE estándar es la comunicación entre dispositivos. EL LTE-A usa la agregación de operadores que se basa en la utilización de varias bandas de frecuencia y antenas LTE, simultáneamente para transmitir y recibir. Esto reduce la congestión, aumenta el ancho de banda y la velocidad de la conexión. La red también emplea repetidores más eficientes e inteligentes que reducen la latencia y soportan más usuarios.

Tanto los dispositivos LTE como LTE-A tienen varias antenas (omnidireccionales, direccionales y sectoriales) y conectores, que se utilizan dependiendo de su uso. Aunque las preferidas son las MIMO para LTE-A.

Debido a la variación en las bandas de frecuencia en diferentes países, sólo los dispositivos con radios de banda dual podrán funcionar. La recepción LTE-A requiere más potencia que el LTE, siendo ineficiente en terminales con una capacidad de potencia muy limitada.

A modo de ejemplo, para distinguir entre LTE y 4G, al descargar una película de un 1Gbyte, LTE tardaría medio minuto, mientras que 4G tardaría 6 ó 7 segundos.

## 3. NetMonitor

### 3.1. Introducción

NetMonitor es una aplicación disponible para Android en la que podremos ver detalles de nuestra conexión, intensidad de señal, tipo de conexión, datos de la antena a la que estamos conectados, antenas cercanas, etc. [15]

Es una aplicación gratuita que se descarga desde Play Store. Al abrirla veremos un resumen de las antenas cercanas y la intensidad de señal con cada una de ellas, recordar que los resultados dependerán del móvil utilizado para hacer medidas. También podemos observar el tipo de conexión de datos (EDGE, HSDPA, LTE, etc).

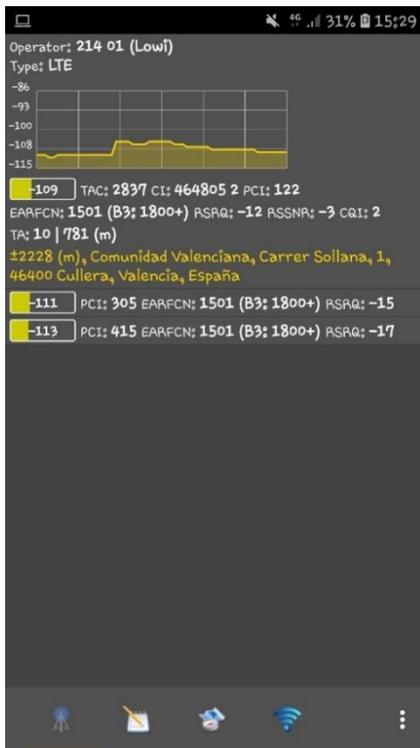


Imagen 9: Vista aplicación Netmonitor

Los acrónimos que aparecen en la Imagen 9, son:

- TA (*Tracking Area*): El conjunto de varios eNodeB constituye un área de seguimiento, definida por el operador. Mientras el terminal está en estado inactivo su ubicación es conocida por la red LTE a nivel TA en lugar de nivel celular.
- TAC (*Tracking Area Code*): Cada área de seguimiento tiene un código único llamado código de área de seguimiento de 16 bits
- CI ó CID (*Cell Identifier*): es un número generalmente único que se utiliza para identificar cada EB o sector de una EB dentro de un código de área de ubicación.
- CQI (*Channel Quality Indicator*): Es la información que UE envía a la red, por tanto, un indicador de calidad del canal.
- EARFCN LTE (*Evolved-UTRA Absolute Radio Frequency No*): identifica de forma única la banda LTE y la frecuencia de la portadora en MHz.

- RSSNR (*Reference Signal Signal To Noise Radio*) que mide el ruido de nuestra línea móvil en dB.
- RSRP (*Reference Signal Received Power*): señal de referencia de potencia recibida.
- PCI (*Physical Cell Identity*): identificadores de células físicas, en redes LTE proporcionan un valor pseudo- único para identificar eNodeBs.
- RSRQ (*Reference Signal Received Quality*): Calidad de la señal de referencia recibida.
- RSSNR (Reference Signal Signal to Noise Ratio): la relación señal / ruido de la señal dada.

En la parte inferior de la aplicación hay 3 pestañas. Si pulsamos sobre el segundo botón podremos acceder a un historial con todas las EB a las que nos hemos conectado anteriormente. Podremos ver la situación de dichas antenas y el tipo de conexión que teníamos en ellas mediante el círculo que aparece a la izquierda de cada entrada. En la Imagen 10 también puede verse que la precisión ubicación es de +/- 2228 metros.

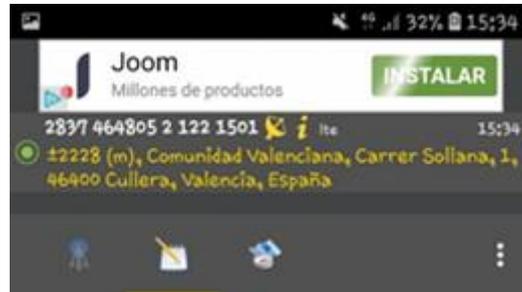


Imagen 10 NetMonitor segunda pestaña

Si pulsamos sobre la tercera pestaña podremos ver en un mapa la situación de las estaciones base cercanas disponibles así como la ubicación de la estación a la cual estamos conectados. Con la ayuda de este mapa podremos ayudarnos a buscar la estación base que mejor red nos ofrezca u organizar una ruta en la que no perdamos cobertura.

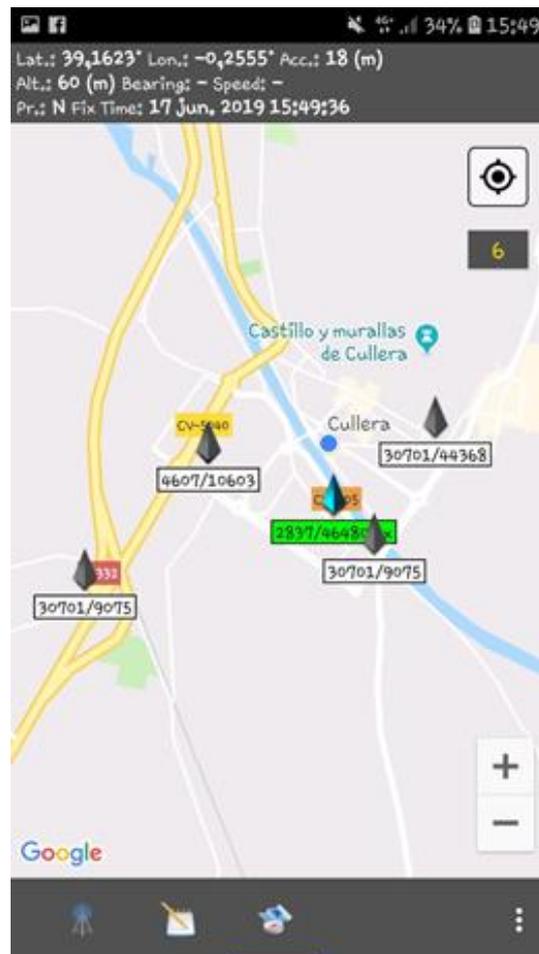


Imagen 11 NetMonitor tercera pestaña

### 3.1.1. Configuración

EL primer paso será configurarlo, para ello pulsaremos el menú que son los tres puntos del margen inferior derecho. Aparecerá un desplegable y deberemos marcar:

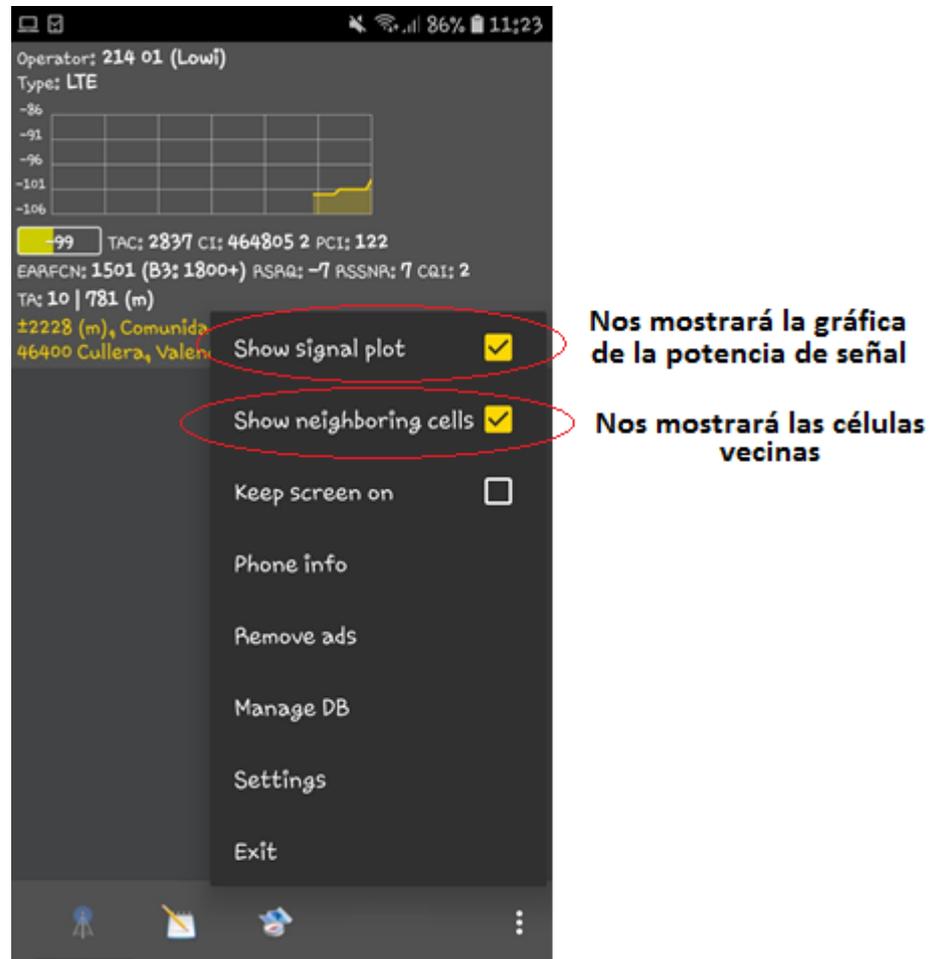


Imagen 12 Menú principal de NetMonitor

Las opciones marcadas dentro de los submenús Manage DB y Settings se muestran en el ANEXO D y E.

### 3.1.2. Realización de medidas

El primer paso es activar el GPS, pues sin él la aplicación no funciona correctamente. En segundo lugar abriremos la aplicación NetMonitor. En tercer lugar realizaremos el recorrido donde deseamos conocer el nivel de cobertura de nuestro operador móvil, la situación de las EB y a que EB se conecta en cada instante.

Hay que recordar que las conexiones a las diferentes EB no serán exactamente iguales aunque se realice el mismo recorrido en diferentes días o momentos del día, pues esto depende del gestión que realice cada EB, dependiendo del tráfico que soporte en ese instante, saturación de la red, etc, por lo que puede decidir realizar un *handover* a otra EB menos saturada.

Una vez hayamos hecho el recorrido, accederemos al menú > *Manage DB* > *Export to KML*. Nos generará un archivo con dicha extensión que estará almacenado en el siguiente directorio: Mis archivos > Memoria interna > *data* > *NetMonitor*.

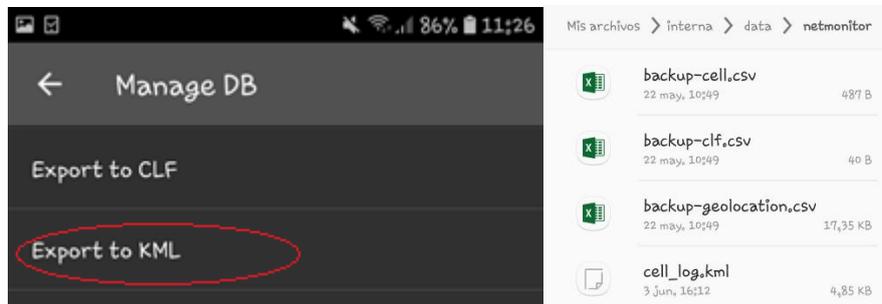


Imagen 13 Cómo exportar datos y directorio de datos

El archivo recibe el nombre de *cell\_log.kml*, deberemos renombrarlo o cambiarlo de directorio porque si exportamos de nuevo el nuevo archivo reescribe el anterior. Otra pauta que hay que tener en cuenta es que cada vez que se desee hacer una nueva medida se debe cerrar la aplicación por completo en el Menú > *Exit*, de no hacerlo de esta forma al exportar guardaremos los datos desde que se abrió la aplicación, no desde la última exportación.



Imagen 14 Salir de la aplicación

El hecho de que se borren los datos cada vez que se sale del programa es debido a la configuración previa, en la que le decimos que borre todo cada vez que se abra la aplicación.

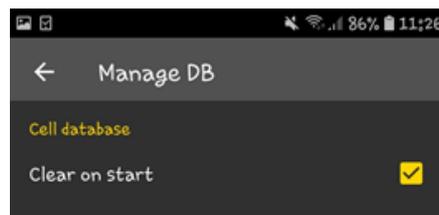


Imagen 15 Borrado de datos al abrir la aplicación

## 4. Procesado de Datos

### 4.1. Excel

El archivo .kml generado por NetMonitor puede abrirse también en formato tabla en Excel. Al abrirlo al no ser un fichero .xlsx nos mostrará el siguiente diálogo:

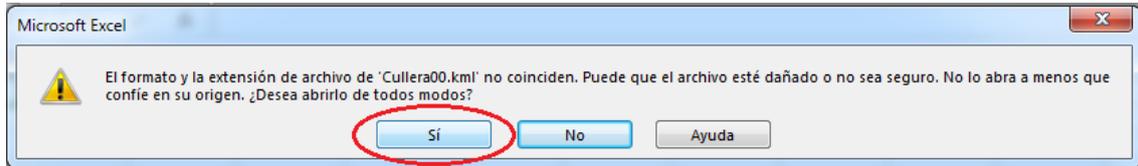


Imagen 16 Abrir archivo .kml en Excel

Seleccionaremos cómo deseamos abrirlo:

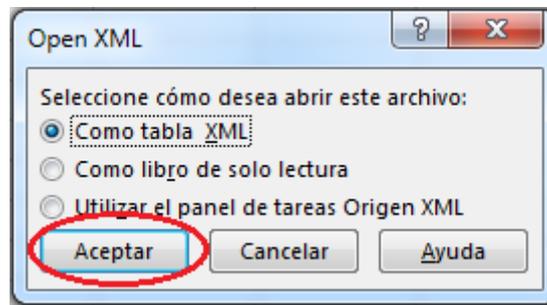


Imagen 17 Cómo archivo .kml en Excel

Nos avisa que no tiene esquema predefinido para Excel, de manera que le dará el formato que considere con los datos que hay en .kml

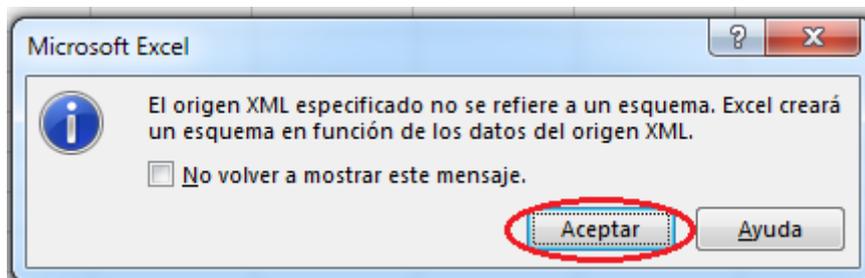


Imagen 18 Creación esquema del archivo .kml

Una vez abierto el archivo los datos se organizan en columnas de las siguientes se puede extraer la siguiente información:

- Columna L:
  - MCC (*Mobile Country Code*): Este código identifica el país.
  - MNC (*Mobile Network Code*): Este código identifica al operador móvil.
- Columna N:
  - LAC (*Location Area Code*): El código de área de ubicación es un número único de área de ubicación actual. Un área de ubicación es un conjunto de estaciones base que se agrupan para optimizar la señalización.
  - CID (*Cell Identifier*): es un número generalmente único que se utiliza para identificar cada estación transceptora base (BTS) o sector de un BTS dentro de un código de área de ubicación.

- RNC (*Radio Network Controller*): Controlador de red de radio responsable de gestionar la célula.
- PSC (*Primary Scrambling Code*): código primario de aleatorización. organiza las medidas por su PSC (*Primary Scrambling Code*) el código primario de aleatorización de la celda servidora.
- Columna O: Numeración EB y los valores de señal
- Columna P: Aparece de nuevo la información de la columna N y además
  - ACCURACY: exactitud en la localización de las medidas.
  - CHANGE\_TYPE: CELL, DBM, GPS
  - TIMESTAMP: Tiempo de medida, indica la fecha y la hora en la que se ha realizado cada medición.

Tener los datos ordenados por columnas nos servirá para el siguiente paso de procesado de los datos en Matlab.

## 4.2. Matlab

Utilizaremos el programa Matlab para obtener dos gráficas que nos ayudarán a clasificar de forma más visual la información que poseemos de medidas en los archivos .kml.

Vamos a crear un Script, para ello seguiremos los siguientes pasos:

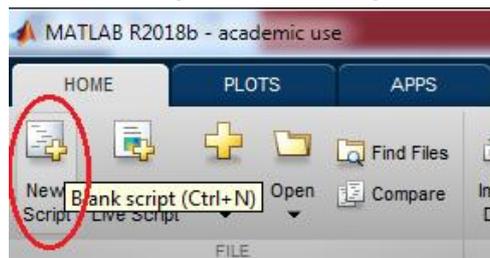


Imagen 19 Crear un nuevo Script en Matlab

El siguiente paso es escribir el código y dentro de la variable que guardará los valores, pegar las medidas de la columna O del archivo Excel de todos los archivos kml. Como puede observarse en el ANEXO F, se tiene un total de 7556 medidas de potencia de la señal a lo largo de todo el municipio de Cullera.

Realizamos una CDF, *Comulative Distribution Function*, en Matlab con el objetivo de conocer cómo es el nivel de señal de potencia registrado por el terminal, determinando así la calidad de la cobertura en el Municipio.

También necesitamos un histograma para conocer la cantidad de puntos que se tienen con un cierto nivel de señal, esto también será un indicador de la calidad de cobertura.

### 4.3. Google Earth

En el programa Google Earth abriremos cada uno de los archivos .kml que se han generado resultado de las medidas con la aplicación NetMonitor.

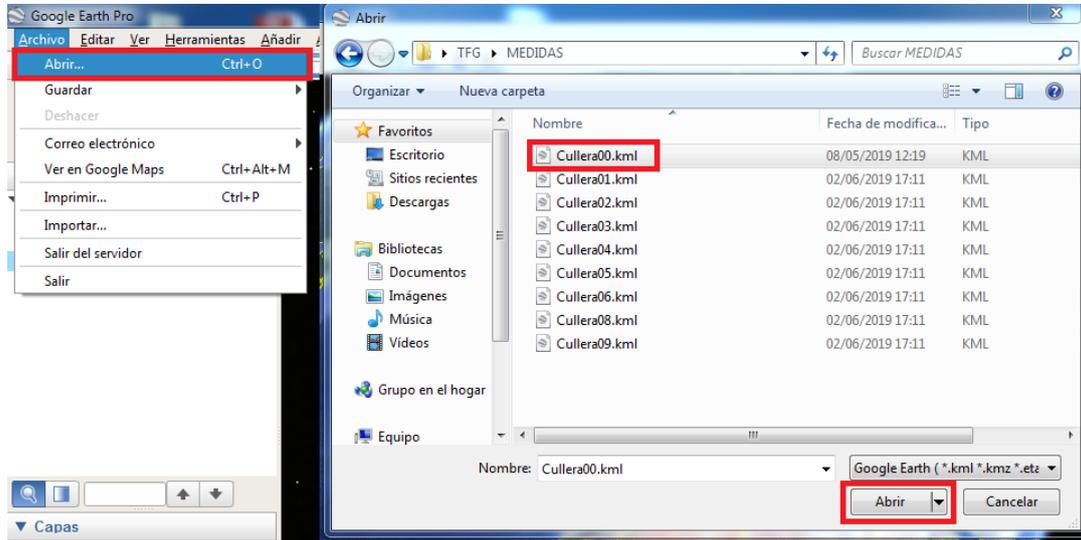


Imagen 20 Abrir archivo kml

Al desplegar podremos ver una serie de carpetas, cada una de las cuales contiene la ubicación de una EB y los puntos que representan las medidas de potencia que ha obtenido el móvil en el recorrido conectándose a dicha antena. Las medidas además de llevar un indicador numérico también están representadas por colores: verde amarillo, naranja y marrón según la potencia sea mayor o menor respectivamente.

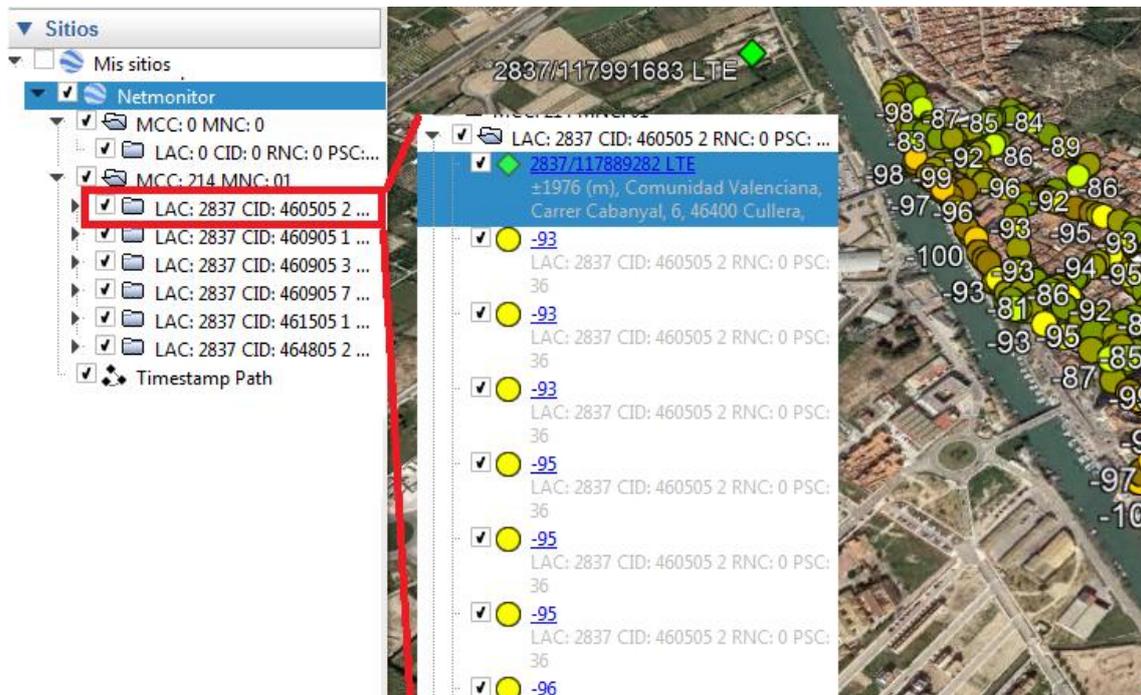


Imagen 21 Estación base y medidas asociadas a su conexión

Por defecto se situarán en la carpeta de *Mis sitios*, pero como hemos de procesar los datos, pasaremos todos los archivos a *Sitios Temporales*. Se utiliza como el Explorador de Windows.

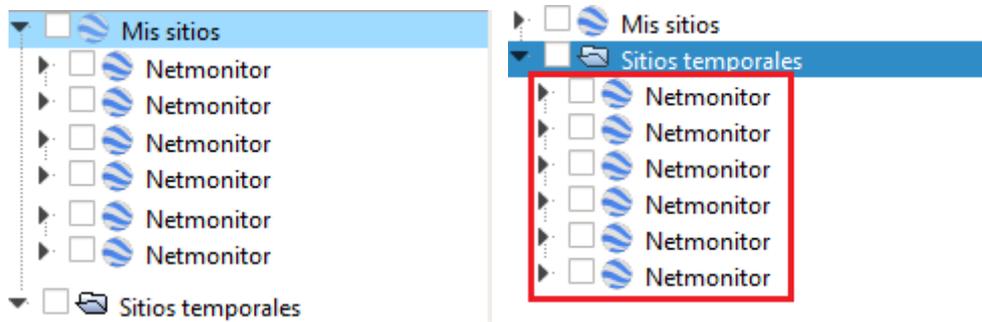


Imagen 22 Para Procesado de datos mejor hacerlo desde la carpeta sitios temporales

En *Mis sitios* crearemos las siguientes carpetas (botón derecho Añadir > Carpeta):

- Cobertura EB: Clasificación de colores, para un efecto visual, permitiendo observar que zonas de cobertura tiene cada antena.
  - EB LTE: Se almacenarán todas las antenas que dan cobertura al terminal, cada una codificada con un color.
  - Medidas: Donde se guardarán los puntos de medida, que estarán codificados según el color de la EB a la que se conectan.
- Calidad de cobertura: Clasificación por niveles de potencia de señal.
  - Muy Baja: color rojo
  - Baja: naranja;
  - Media: amarillo;
  - Muy Buena: verde;
  - Excelente: azul.

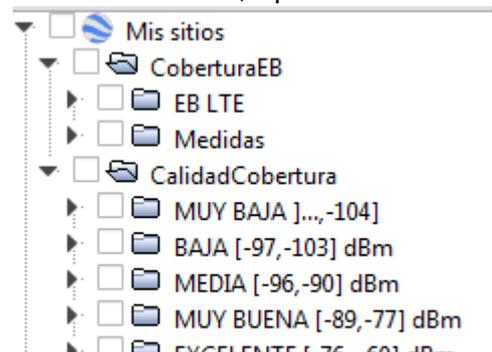


Imagen 23 Creación de carpetas para almacenamiento de datos

Para parametrizar los datos según **Zona de cobertura ofrecida por las EBs**, en cada carpeta seleccionaremos la EB y la arrastraremos hasta la carpeta EB LTE, este será el directorio destinado para almacenarlas.

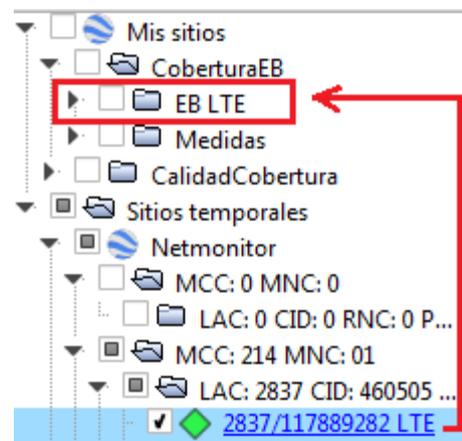


Imagen 24 Directorio para almacenar las EB

Modificaremos su color.

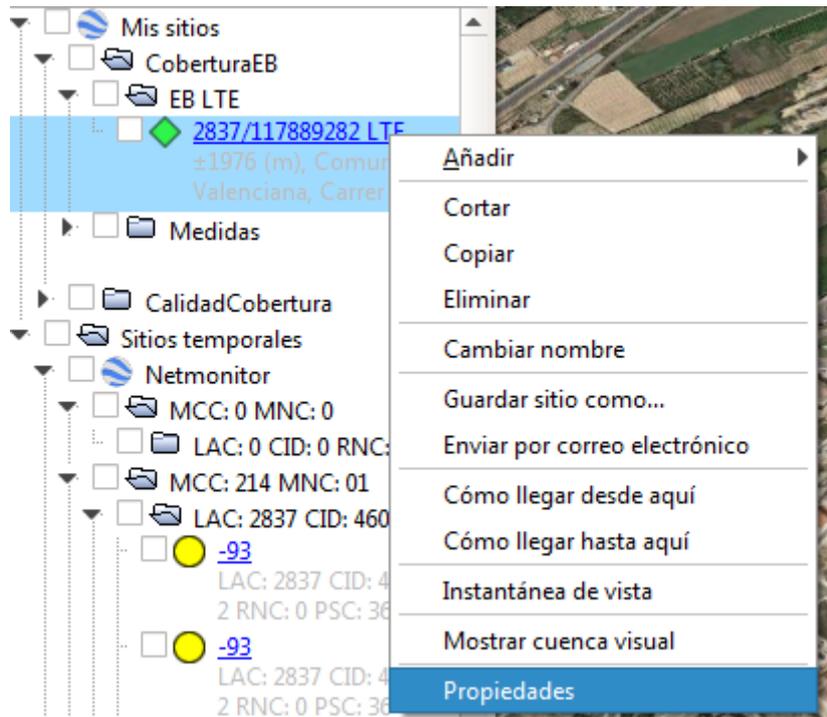


Imagen 25 Pasos para modificar diferentes parámetros de las EBs

Podremos elegir o modificar:

- Forma del icono, en nuestro caso se queda tal cual (1).
- Icono, cada EB tendrá un color diferente (3) y su tamaño será de 1 (4).
- Etiqueta: La eliminaremos puesto que como tenemos código de colores (2).

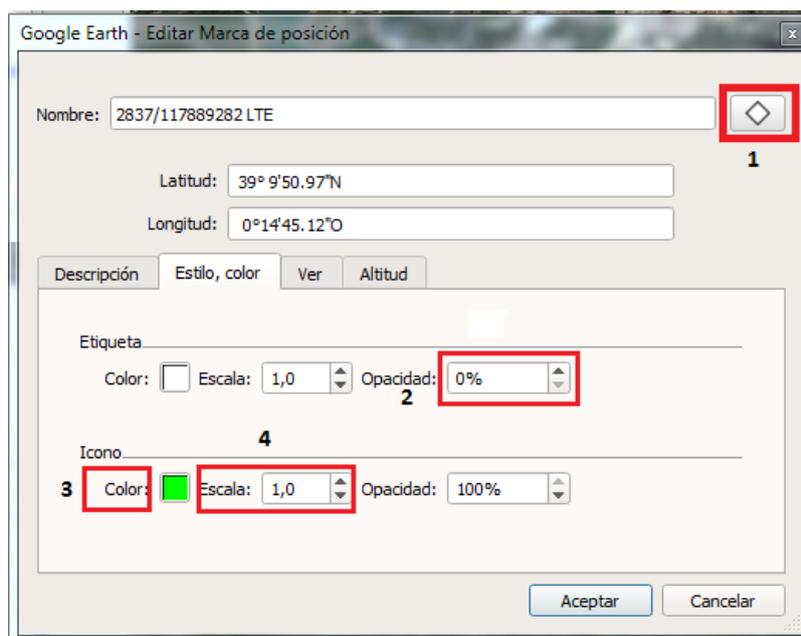


Imagen 26 Modificación de icono y etiqueta de las EBs

Daremos el mismo formato de color a los puntos de medida que a las EB a las que se conectan.

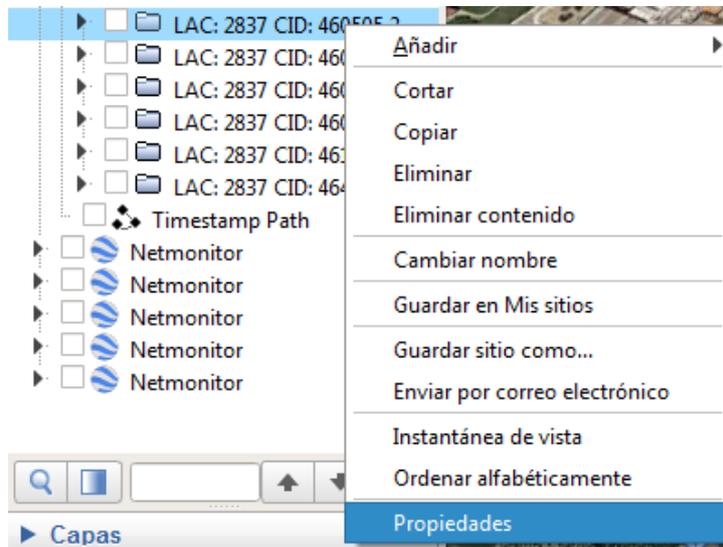


Imagen 27 Pasos para modificar diferentes parámetros de las medidas

Deberemos compartir el estilo de todos los puntos que están dentro de una misma carpeta. Eliminaremos las etiquetas porque no queremos saber el nivel de potencia de la señal sino a que EB está conectado el terminal, el color se elegirá el mismo que la EB en la que se está midiendo la señal y dejaremos la misma escala para los puntos.

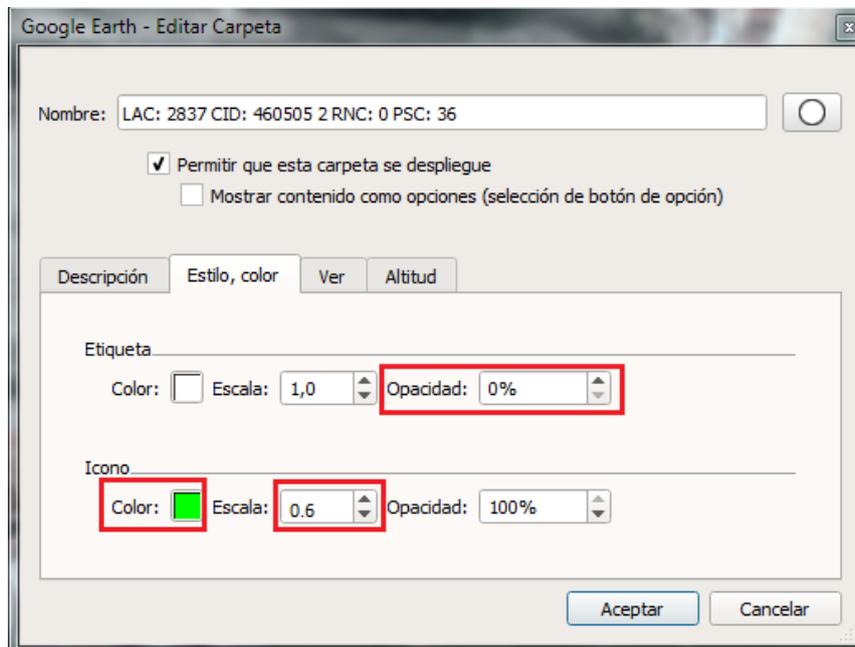


Imagen 28 Modificación de icono y etiqueta de los puntos de medidas

Una vez realizados los cambios, moveremos los datos a la carpeta medidas. Y su resultado será el siguiente:

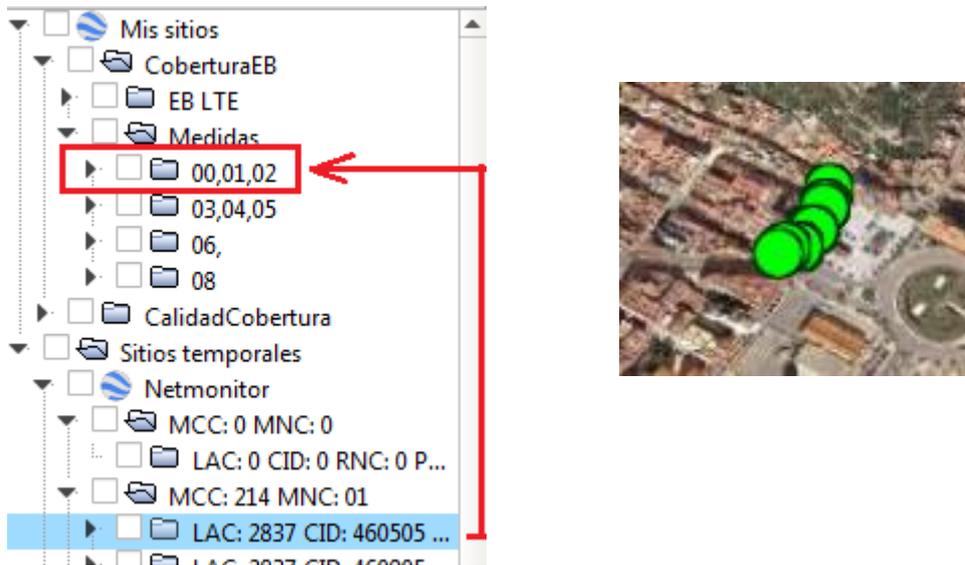


Imagen 29 Almacenamiento de medidas

Ahora haremos otra clasificación de los datos para esclarecer cuál **la calidad de la señal o nivel de potencia**, en el área.

Para esto volveremos a abrir todos los archivos obtenido del NetMonitor y ordenaremos los datos dentro de cada carpeta alfabéticamente para que sea más fácil coger los datos por rangos.

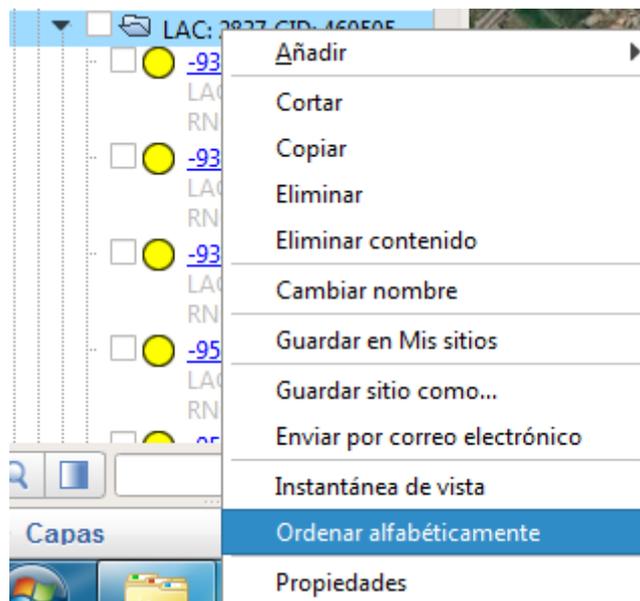


Imagen 30 Ordenar las medidas alfabéticamente

Iremos seleccionando los datos por rangos y trasladándolos a las carpetas de CalidadCobertura según el nivel de señal [17]. Se han tomado como modelo:

- Muy Baja [..., -104] dBm, codificado en color rojo.
- Baja [-103, -97] dBm, codificado en color naranja.
- Media: [-96, -90] dBm, codificado en color amarillo.
- Muy Buena [-89,-77] dBm, codificado en color verde.
- Excelente [-76, ....] dBm, codificado en color azul.

Finalmente para guardar todos estos datos o clasificaciones tenemos dos formas de hacerlo:

- Mantener la distribución por carpetas para poder ver o representar los datos por EB, por colores, por zonas,... etc. separados o todos juntos.

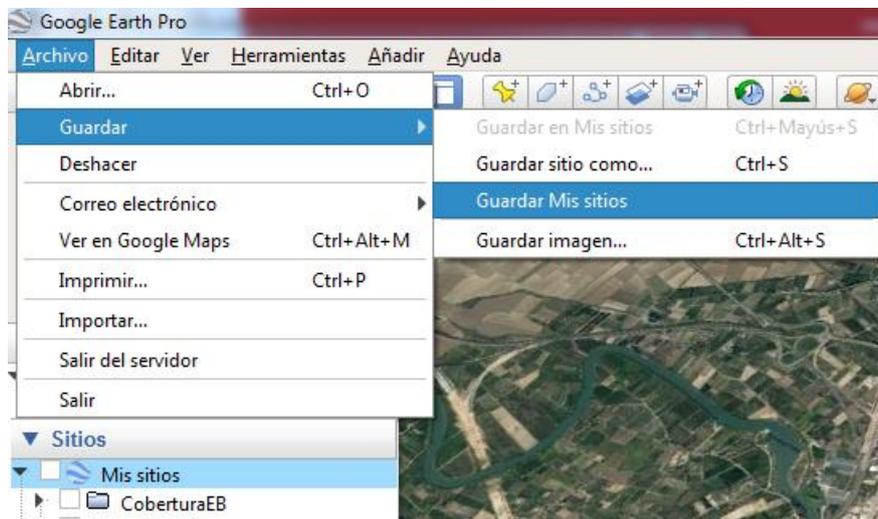


Imagen 31 Guardar archivo en Google Earth

- Haciendo un archivo .kml que mostrará todo lo que hayas seleccionado con un  $\sqrt{\quad}$  antes de guardarlo, sin tener poder de elección alguna al abrirlo.

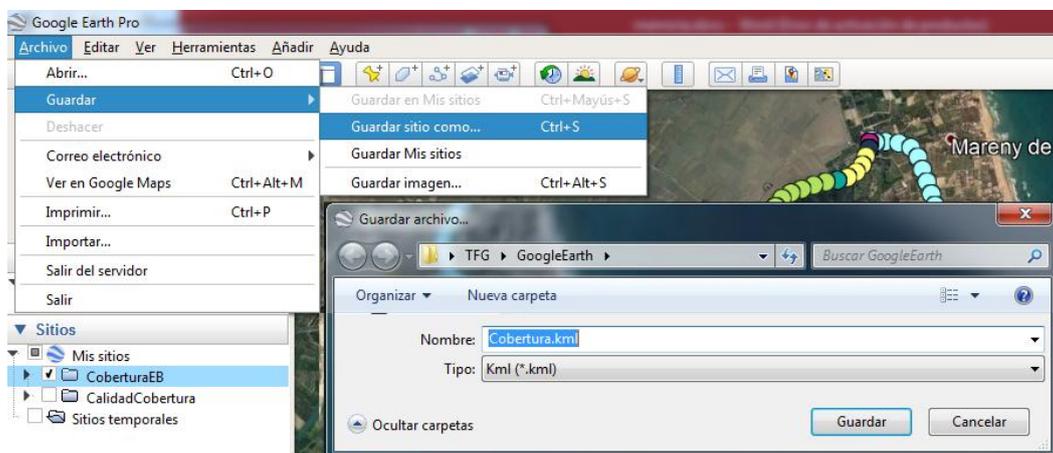


Imagen 32 Guardar archivo en formato kml

Para abrir el archivo.kml sin que borre o sobrescriba el trabajo que hemos hecho anteriormente, deberemos cerrar el programa por completo y abriremos el archivo kml. Por defecto lo tendremos en Sitios temporales y en mis sitios seguiremos teniendo los datos clasificados en carpetas.

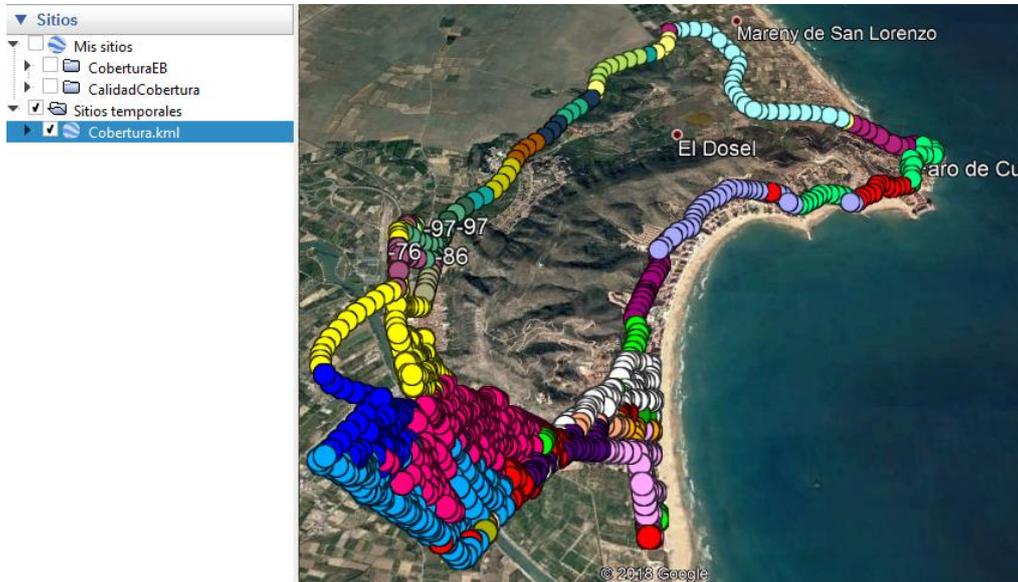


Imagen 33 Abrir archivo kml sin borrar lo guardado en Google Earth

## 5. Xirio Online

### 5.1. Introducción

Xirio *Online* es una plataforma donde se pueden realizar simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica. No requiere instalación o actualizaciones y se accede desde cualquier explorador. [12]

Permite calcular, compartir y publicar resultados en la red sin necesidad de disponer de herramientas de planificación ni cartografía digital propias, siguiendo un modelo SaaS (*Software as a Service*). La versión en internet, Xirio *Online*, ofrece un acceso abierto y gratuito de baja resolución o de pago en los cálculos de alta resolución.

Se pueden ubicar las EB y configurar sus parámetros radioeléctricos o utilizar los datos genéricos de cada tecnología.

### 5.1. Situación de las EB

Para la simulación en Xirio se necesita ubicación, altura, número de sectores y su orientación. La información sobre la ubicación se ha extraído de la página de Infoantenas [13] y Google Maps. En referencia a los demás parámetros se ha tenido que visitar cada emplazamiento. Ver ANEXO G.

### 5.2. Creación nuevos estudios

Para la creación de un nuevo estudio de cobertura ver ANEXO H, y para multitransmisor ver ANEXO I.

## 6. Análisis y Resultados

La recolección de todos los datos de las medidas se ha hecho en 8 días, con una media de entre 4 y 4.5 horas. Se ha recorrido el municipio en coche para agilizar este paso. Para las medidas con la aplicación para Andoid NetMonitor, se ha utilizado un terminal de la marca Samsung, modelo game s7 Edge. El dispositivo puede conectarse a la red LTE-A y su sensibilidad TRS (total radieted sensivity) es de -120dBm, los datos han sido obtenidos de sus especificaciones técnicas.

### 6.1. Resultados de las medidas

#### 6.1.1. Nivel de Señal

Como resultado de procesar los datos obtenidos en Netmonitor se han obtenido los **mapas de cobertura del municipio de Cullera según el nivel de la señal** en el Google Earth. Las siguientes imágenes muestran las medidas clasificadas por su potencia. Hemos considerado los márgenes basándonos en un foro oficial de Vodafone, operador con el que medimos la cobertura, dónde habla orientativamente sobre lo que se considera como calidad de cobertura [17]. También hemos tenido en cuenta la cosideración de NetMonitor en su rango de colores. Se han considerado los siguientes márgenes:

- $]-\infty, -104]$  dBm: Muy baja cobertura (imagen 34)
- $[-103,97]$  dBm: Baja cobertura (imagen 35)
- $[-96,90]$ , dBm: Media cobertura (imagen 36)
- $[-89,-77]$  dBm: Muy alta cobertura (imagen 37)
- $[-76,+\infty]$ dBm: Excelente cobertura (imagen 38)

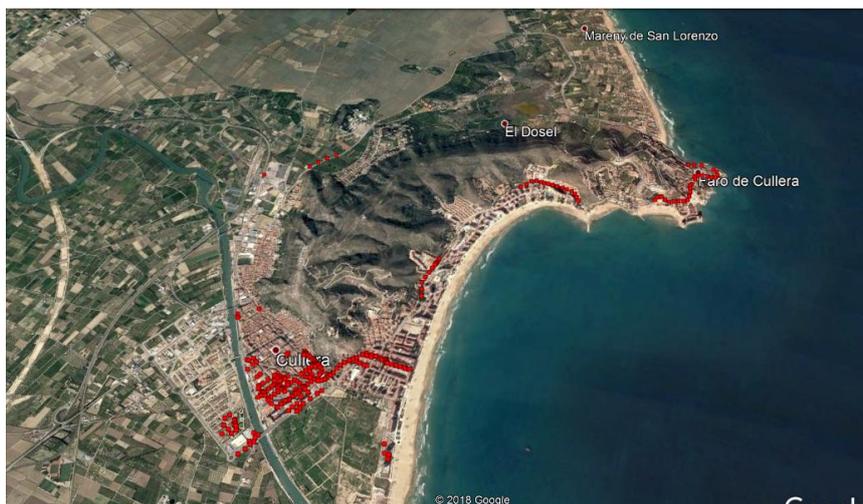


Imagen 34 Nivel de señal muy bajo  $]-\infty, -104]$  dBm

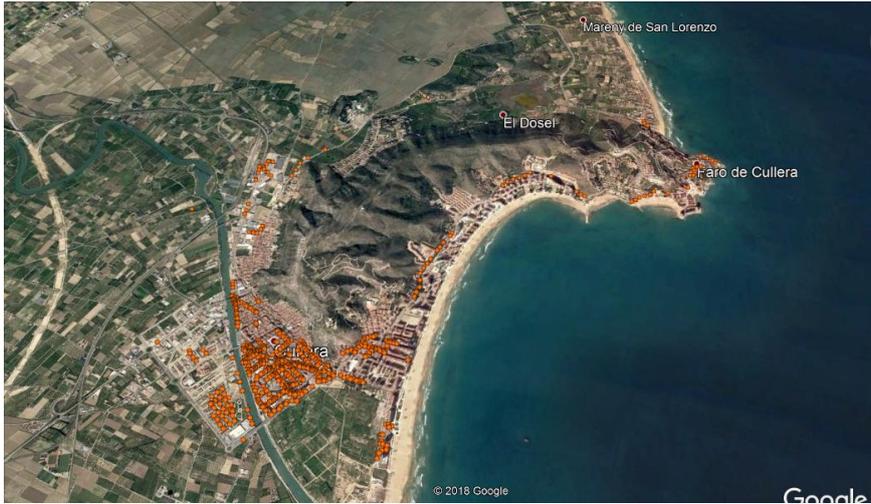


Imagen 35 Nivel de señal bajo [-103,97] dBm

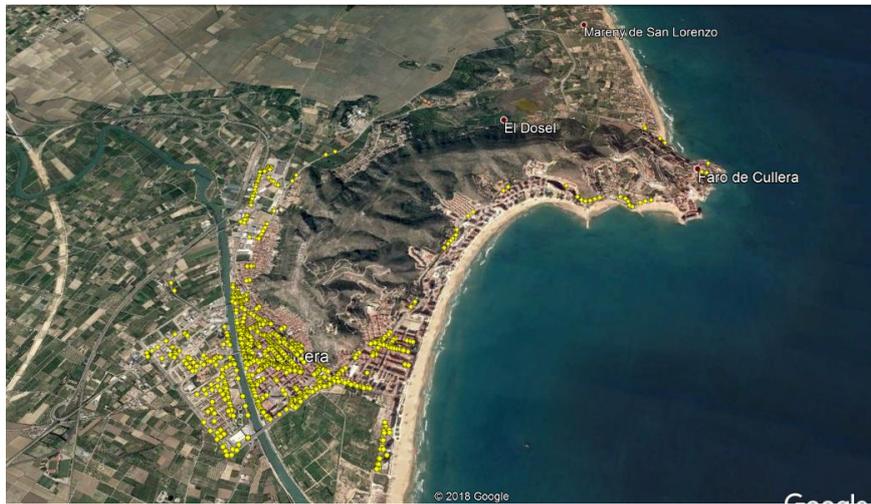


Imagen 36 Nivel de señal medio [-96,90] dBm

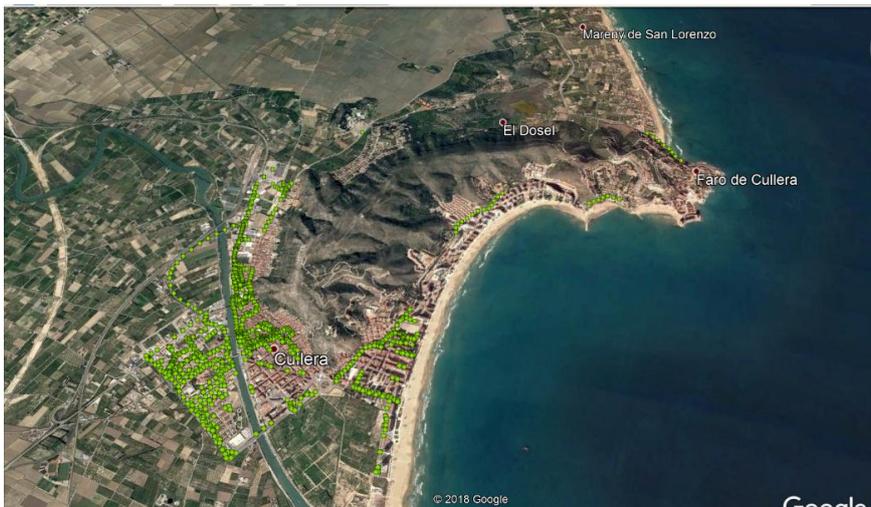


Imagen 37 Nivel de señal muy alto [-89,-77] dBm



Imagen 38 Nivel de señal excelente [-76,+Infinito] dBm

Finalmente podemos observar cómo se distribuye la potencia de la señal por el municipio por colores. Correspondiendo el rojo a un nivel muy bajo, naranja bajo, amarillo medio, verde muy alto y azul excelente.



Imagen 39 Nivel de potencia de señal catalogado en colores

### 6.1.2. Análisis

Las principales conclusiones obtenidas del procesamiento de las medidas de potencia, al observar la imagen obtenida al representar el nivel de señal a lo largo de municipio de Cullera, son:

- Se puede afirmar que la cobertura en Cullera que ofrece el operador Vodafone, es buena. Se han analizado casi 7600 puntos de medida y de ellos sólo 818 son inferiores a -104 dBm (10.76%) y de ellos 54 menores -112dBm que sería la sensibilidad de nuestro terminal, para que pase a una tecnología inferior (0.71%). Y si eliminamos los que se producen en las zonas a consecuencia del efecto ping-pong, de ahí a la mala calidad de la señal, sólo nos queda una zona muy pequeña en la carretera donde la cobertura es muy baja (imagen 40), que coincide con la cobertura que tiene Vodafone en su página oficial(imagen 41).



Imagen 40 Niveles de potencia menores que -112dBm/

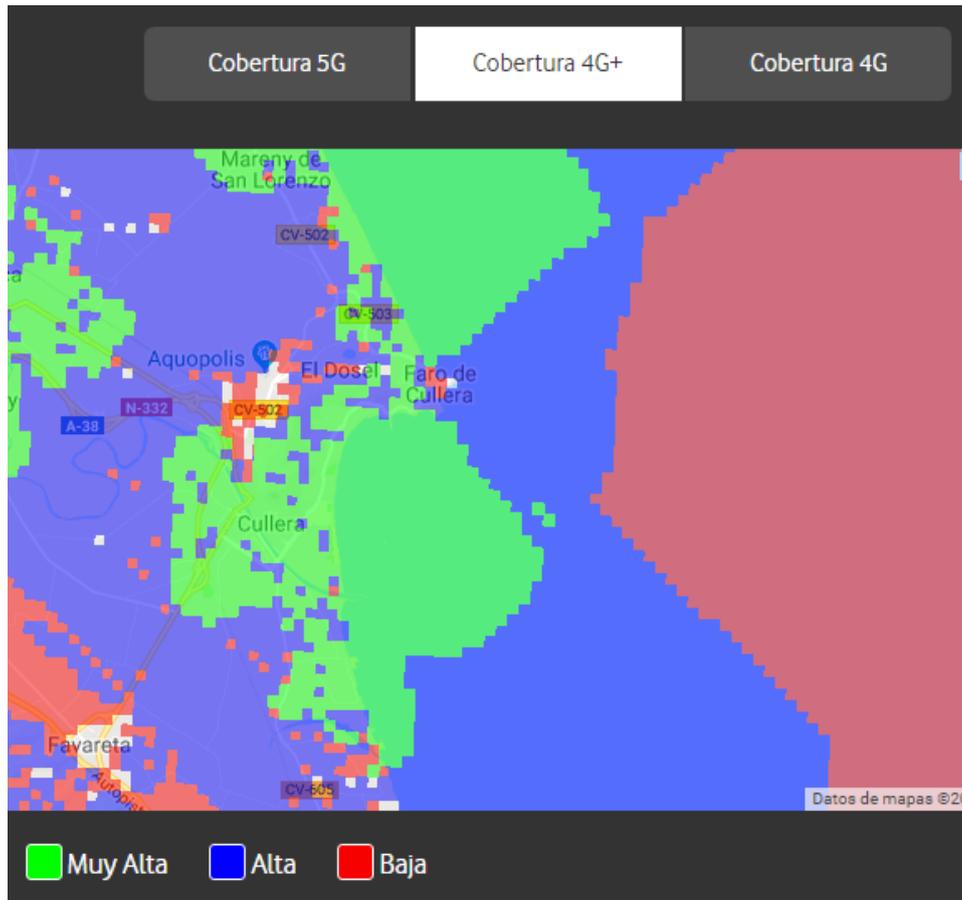


Imagen 41 Cobertura oficial 4G+ de Vodafone

- Haciendo un historial de las medidas se puede apreciar que la suma de los puntos que se encuentran comprendidos entre las zonas de cobertura de excelente, pasando por muy buena y terminando en media, son más numerosos que los que se han medido con una intensidad de señal baja o muy baja. En la imagen puede apreciarse este hecho.

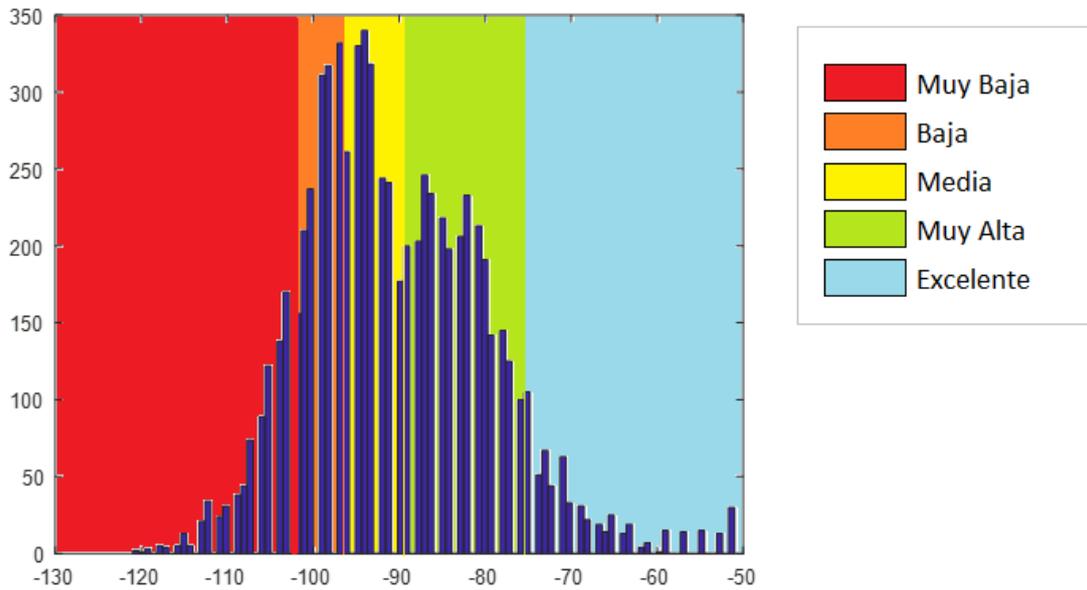


Imagen 42 Historial sobre los resultados obtenidos de la medición

- Al realizar la CDF, Cumulative Distribution Function, en Matlab que devuelve la función de distribución acumulativa, se observa, como puede verse en la imagen que hay una cobertura media o superior en un porcentaje del 71% de las medidas reales en Cullera, con lo que se corrobora que la cobertura ofrecida en el municipio es buena.

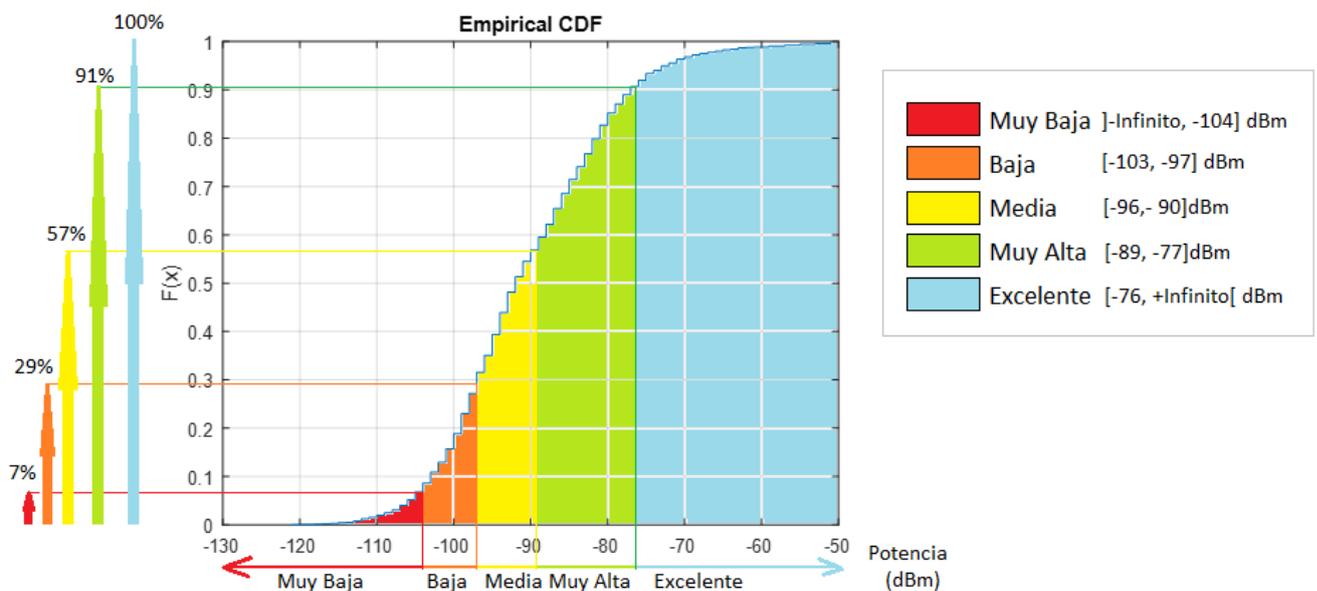


Imagen 43 CDF sobre los resultados obtenidos de la medición

### 6.1.3. Cálculos de Capacidad

Se han realizado unos cálculos de capacidad según los rangos citados anteriormente la CDF; para ello hemos cogido como sensibilidad los valores frontera entre rangos: -103.5, -96.5, -89.5 y -76,5 dBm.

#### Datos

Ruido térmico =  $k \cdot T = -174 \text{dBm/Hz}$ ;

Factor de Ruido downlink =  $NF_{dw} = 8$ ;

BW= Ancho de Banda = 10MHz.

Busy hour 50%

Tráfico diario 15%

$$P_N \text{ (dBm)} = k * T + 10 * \log(BW) + NF$$

Vamos a calcular la SNR, para los diferentes márgenes de sensibilidad,

$$S \text{ (dBm)} = P_N \text{ (dBm)} + SNR$$

Atendiendo a la gráfica de MCS podremos hallar a partir de la SNR la Modulación, Tasa de Codificación (MCS) y el Throughput en bps/Hz. Ver ANEXO J. Los cálculos siguientes se encuentran en el ANEXO K.

Calculamos la Eficiencia Espectral o Throughput,

$$\text{Eficiencia Espectral (EE)} = \text{bits} * \text{CR}$$

Calcularemos la Capacidad (usuarios/Estación),

$$C_{\text{celda}} \text{ (Gb/h)} = \text{EE} * \text{BW} * 3600 / 8192;$$

$$C_{\text{celda}} \text{ (Gb/día)} = C_{\text{celda}} \text{ (Gb/h)} * \text{BusyHour} * 30 / \text{Tráfico};$$

$$C_{\text{celda}} \text{ (Gb/mes)} = C_{\text{celda}} \text{ (Gb/día)} * 30;$$

Suponiendo 10 Gbytes/usuarios y 3 sectores/estación

$$C_{\text{celda}} \text{ (usuarios/sector)} = C_{\text{celda}} \text{ (Gb/mes)} * 10$$

$$C_{\text{celda}} \text{ (usuarios/estación)} = C_{\text{celda}} \text{ (usuarios/sector)} * 3;$$

SENSIBILIDAD	SNR	MCS	MOD	TASA COD.	THROUGHPUT (BPS/HZ)	CAPACIDAD (USUARIOS/ ESTACION)
-103,5	-7.5	1	QPSK	1/8	0.25	32
-96,5	-0.5	4	QPSK	1/3	2/3	87
-89,5	6.5	8	16QAM	1/2	2	263
-76,5	19,5	13	64 QAM	4/5	4.8	632

Tabla 5 Cálculo de Capacidad (usuarios/estación)

## 6.2. Según zona de cobertura

### 6.2.1. Resultados

Como resultado de procesar los datos obtenidos en Netmonitor se han obtenido los **mapas de cobertura del municipio de Cullera según la zona de cobertura que tiene cada EB** en Google Earth. Las siguientes imágenes muestran las medidas clasificadas por colores, en la Imagen 44 se pueden ver las EBs y en la Imagen 45 la cobertura o alcance de cada EBs.



Imagen 44 EB que dan cobertura a lo largo del recorrido según NetMonitor



Imagen 45 Resultado de cobertura de cada EB

## 6.2.2. Análisis

NetMonitor usa la localización orientativa, que se consigue mediante la triangulación de antenas, y la localización exacta usando el receptor GPS de nuestro teléfono. Podremos hacernos una idea de la distancia a la que estamos de la antena o saber la posición estimada, ya que, para localizar la antena no puede hacerse con el GPS, estos cálculos serán siempre aproximados.

Al seleccionar cada EB, nos aparece información sobre la identificación de ésta y dónde se encuentra situada. Un dato bastante interesante es q aparece la precisión del emplazamiento. En la Imagen 46, podemos ver como la precisión de esta EB en concreto, es de +/-3200m.



Imagen 46 Información sobre una EB

En la Imagen 47 se han trazado varias circunferencias, alrededor de unas cuantas EB al azar como ejemplo, de radio igual a la precisión indicada por NetMonitor, para poder apreciar el área en la que puede estar realmente ubicada cada EB. Esto nos indica que la aplicación de NetMonitor no tiene precisión sobre las ubicaciones de las EB, con lo que este dato en concreto no puede ser utilizado por no ser fiable.

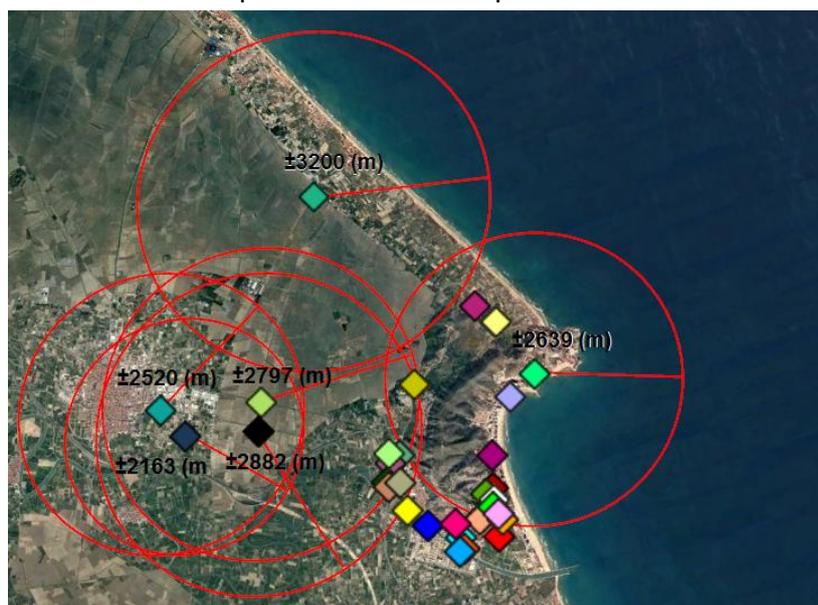


Imagen 47 Precisión de la ubicación de algunas EBs

Se han tenido que buscar las EB por la zona y corroborar que estuviese en lo cierto con la página oficial del Ministerio, Infoantenas.[13]

Las principales conclusiones obtenidas del procesamiento de las medidas, al observar la imagen obtenida que representa las zonas de cobertura a lo largo de municipio de Cullera, son:

De acuerdo al desplazamiento del terminal a lo largo de la población se producen *handovers* o cambio de celda, un proceso en el que se transfiere el servicio de una estación a otra al disminuir la calidad del enlace, garantizando así la conexión en todo momento del terminal a la red. Pero hay ciertas zonas en las que se produce un efecto indeseado en las comunicaciones inalámbricas, el llamado efecto ping-pong.

El efecto ping-pong se produce cuando la conexión se transfiere de una celda a otra, pero se devuelve rápidamente a la celda original. Esto causa una señalización innecesaria en las interfaces por una configuración incorrecta de los parámetros de traspaso o un problema de dominio en el área. Este efecto desperdicia recursos de señalización, disminuye el *throughput* del sistema, e incrementa la pérdida de paquetes y la latencia o respuesta del sistema. Estos dos últimos elementos tienen un impacto significativo en la calidad percibida por el usuario en los servicios de voz.

Para disminuir el efecto ping-pong, se define un parámetro conocido como tiempo de disparo (TTT, *time to trigger*). Si se cumple la condición de conexión y durante el TTT, no se cumple la condición de abandono entonces el evento es disparado. Utilizar un TTT elevado ocasionará que se tarde más tiempo en realizar el *handover*, y la señal puede caer hasta un nivel que se produzca la interrupción del servicio. Por ello es importante una selección adecuada del TTT.

En la imagen 48 podemos ver un ejemplo más de cerca del efecto ping-pong en el Puente de Hierro en la población de Cullera, zona resaltada en verde oscuro en la imagen 49. Ver imágenes 49 y 50, para ver donde aparece este efecto.

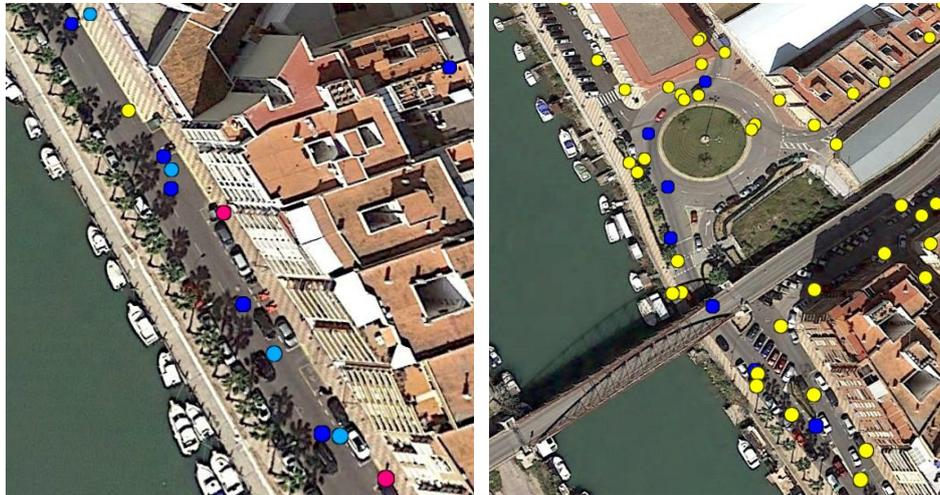


Imagen 48 Ampliación del efecto ping-pong en dos puntos de la población de Cullera. Cada punto está coloreado según la celda a la que se está conectado. Se puede apreciar cómo van intercambiándose varios colores durante la ruta medida



Imagen 49 Efecto ping-pong en la zona centro y Bulevar



Imagen 50 Efecto ping-pong en la zona San Antonio

Una estación base puede tener buena señal a bastante distancia de su ubicación, habiendo estaciones base más cercanas, pero puede ser que la última no tenga una visión directa. Cabe la posibilidad que la antena que da servicio en una zona que no corresponde con la zona para la que fue diseñada esté situada en un lugar elevado y con el *downtilt* bajo, es por esto que al añadirle una visión directa con el terminal se produce sobrealcance, provocándose una degradación progresiva de la señal. Se asocia a un problema en el planteamiento de la red. Para solucionar este problema se debería de replantear la cobertura de la zona en cuestión para que los servidores cercanos sean los que den cobertura o en su defecto instalar un nuevo emplazamiento y en las estaciones base que tienen sobrealcances habría que reducir su altura y/o aumentar su *downtilt*, para reducir de esta forma la visión directa. En la imagen 51 se muestran zonas de sobrealcances.

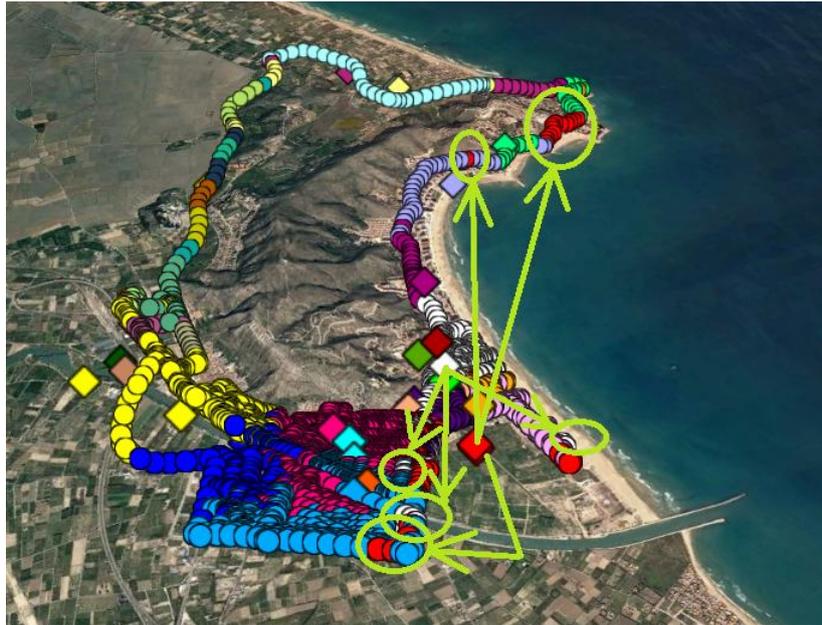


Imagen 51 Sobrealcances en el recorrido de medida de cobertura

## 6.3. Simulación de Cobertura

### 6.3.1. Resultados de Simulación de Cobertura

Anteriormente hemos fijado un valor RSRP threshold de -120 dBm, valor típico en el borde de una celda, a partir del cual hemos definido los rangos por código de colores, por lo que nuestra zona cubierta cumple los valores teóricos de 3GPP. 3GPP establece que el rango de valor debe ir desde -44 a -140 dBm, aunque los valores típicos irían desde -75 dBm hasta -120 dBm en LTE-A. [18]

#### 6.3.1.1. A frecuencia de 1910 MHz

##### 1. Parámetros de configuración:

- Potencia de TX: 32 W.
- Inclinación del sector: 10°.
- Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.

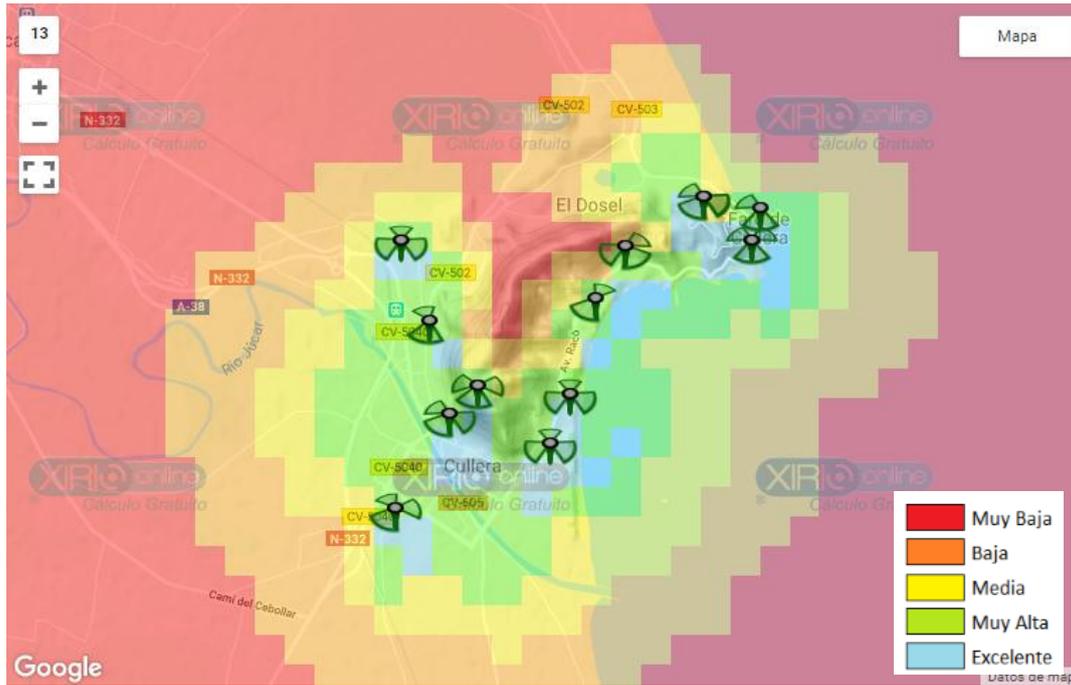


Imagen 52 RSRP: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 32w

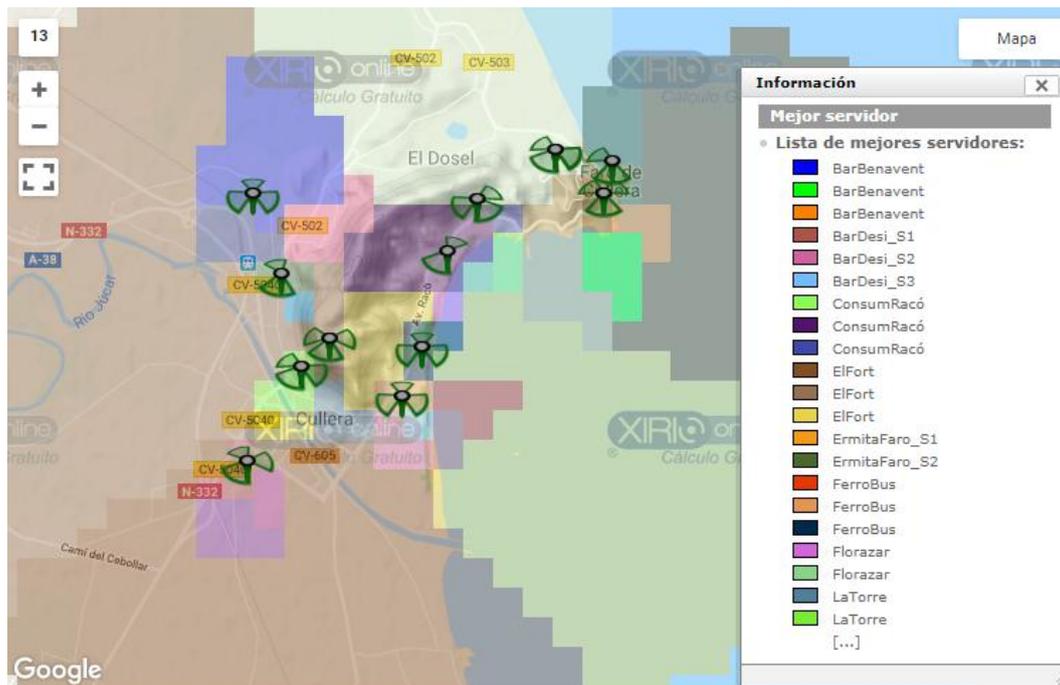


Imagen 53 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 32w

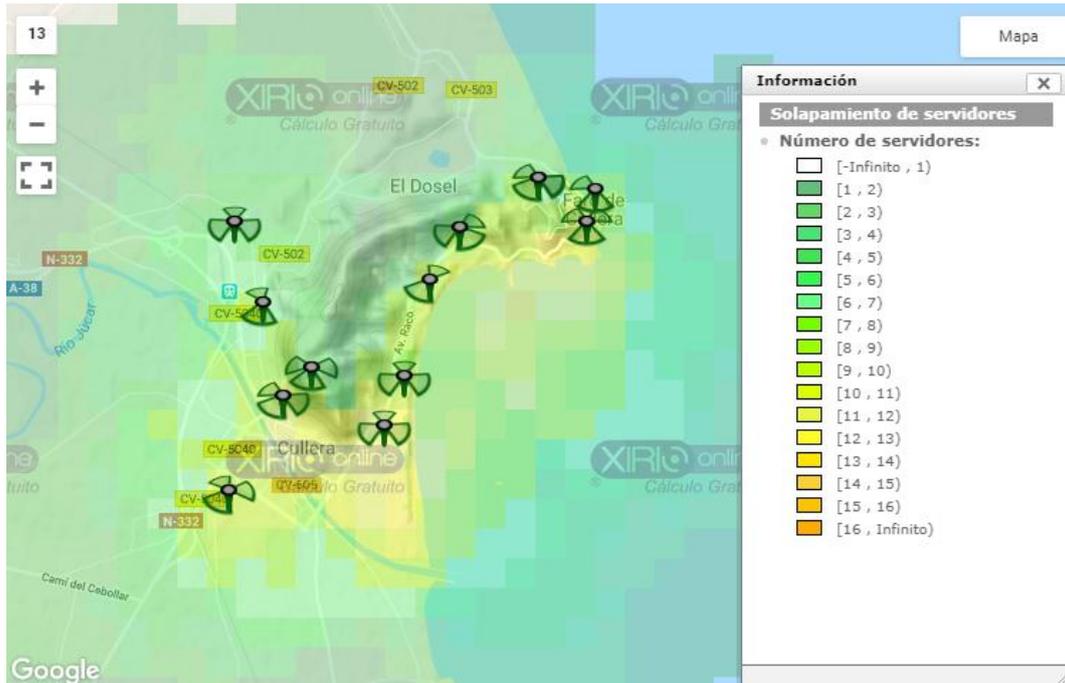


Imagen 54 Solapamiento: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX32w

## 2. Parámetros de configuración:

- Potencia de TX: 20 W.
- Inclinación del sector: 10°.
- Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.



Imagen 55 RSRP: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 20w

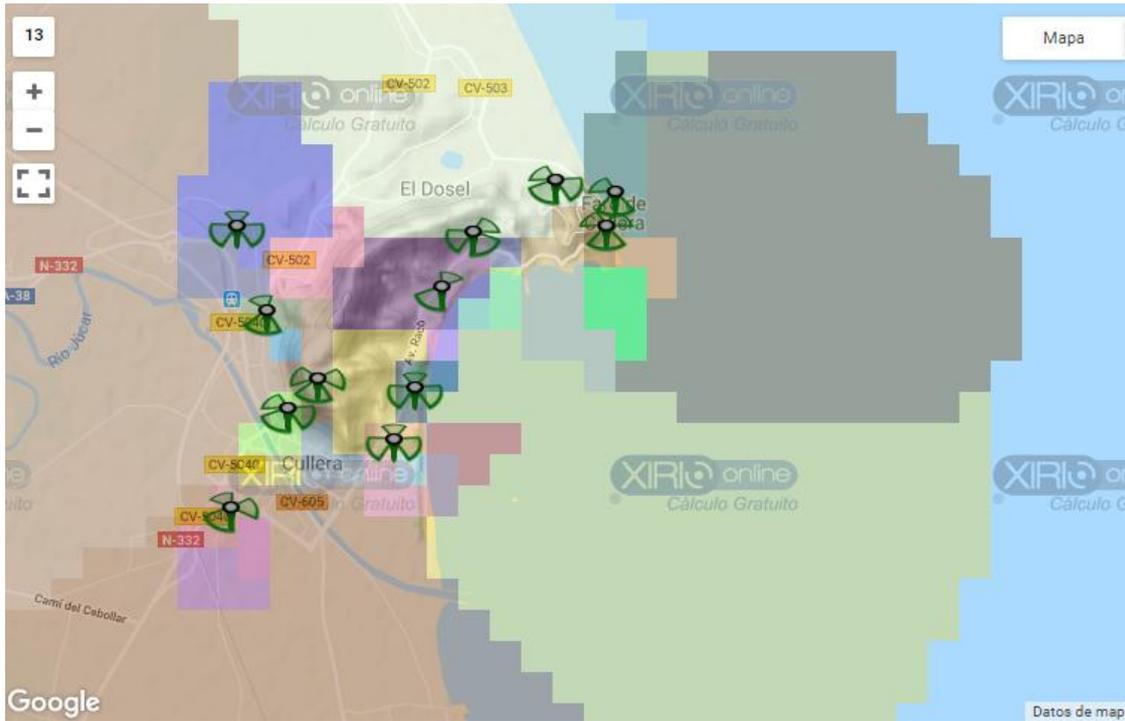


Imagen 56 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 20w

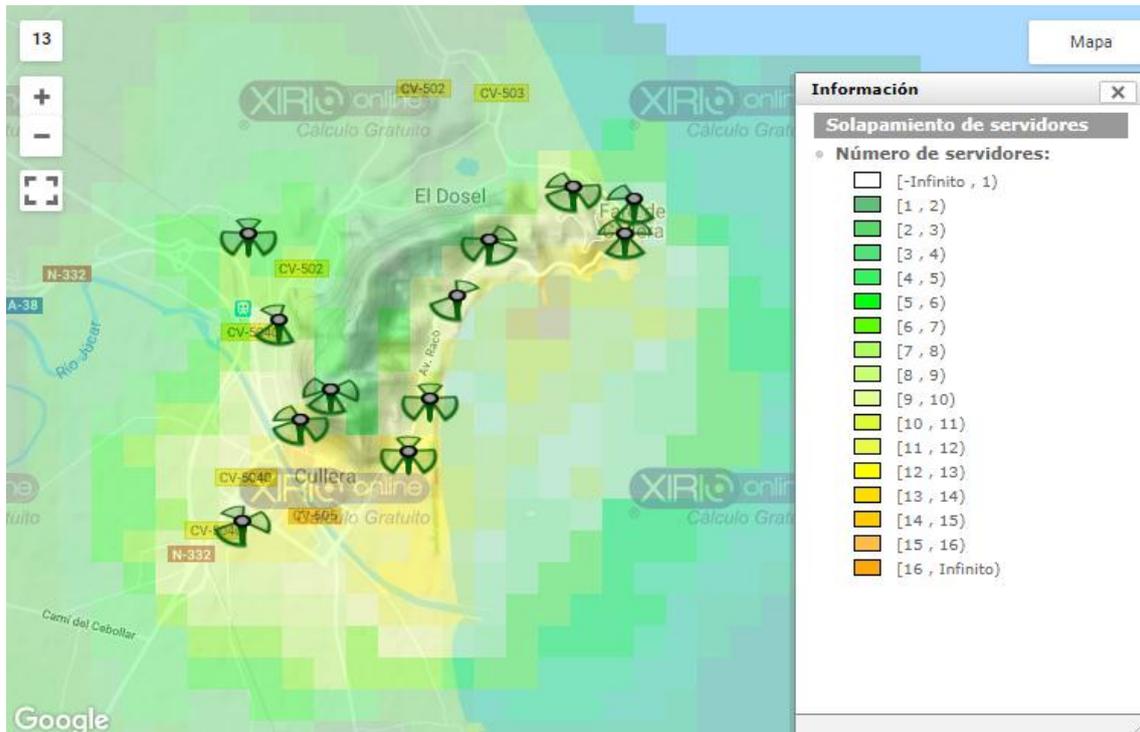


Imagen 57 Solapamiento: 1910MHz, Inclinación 10°, Potencia TX 20

### 3. Parámetros de configuración:

- **Potencia de TX: 20 W.**
- **Inclinación del sector: 10°.**
- **Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.**

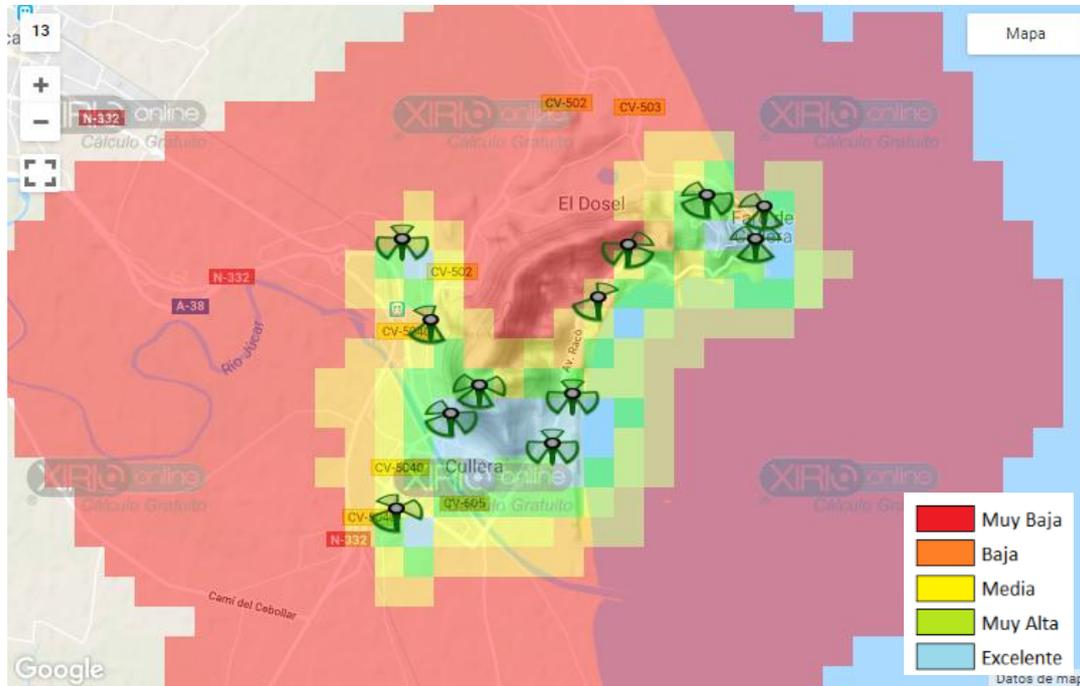


Imagen 58 RSRP: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w

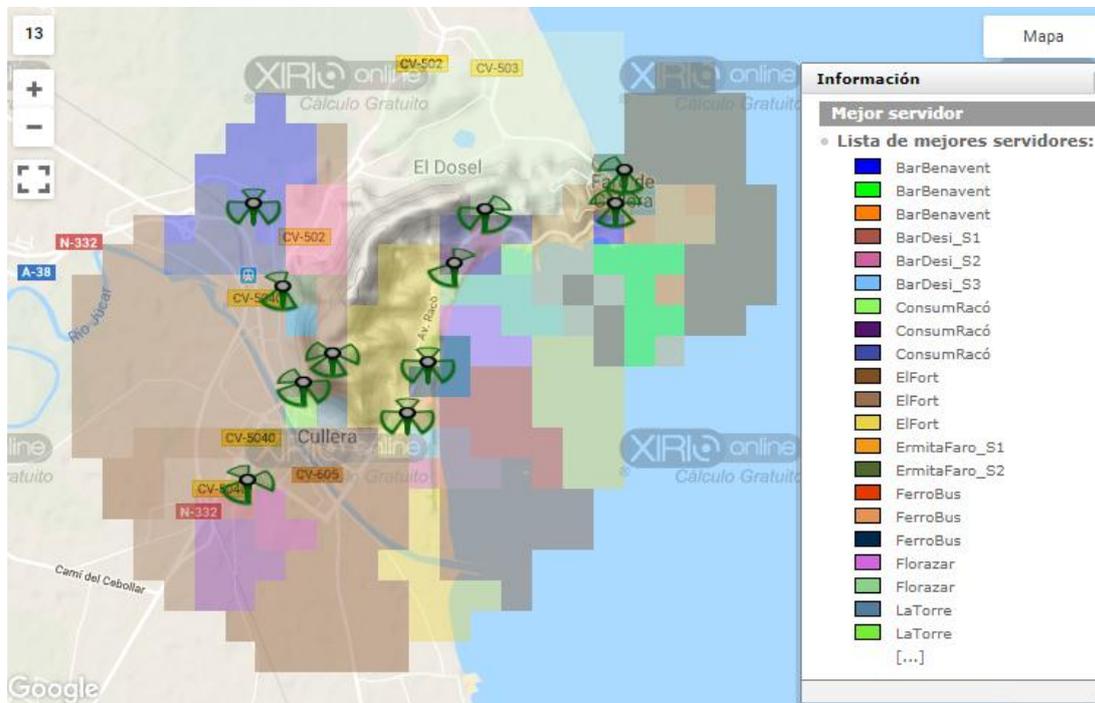


Imagen 59 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w

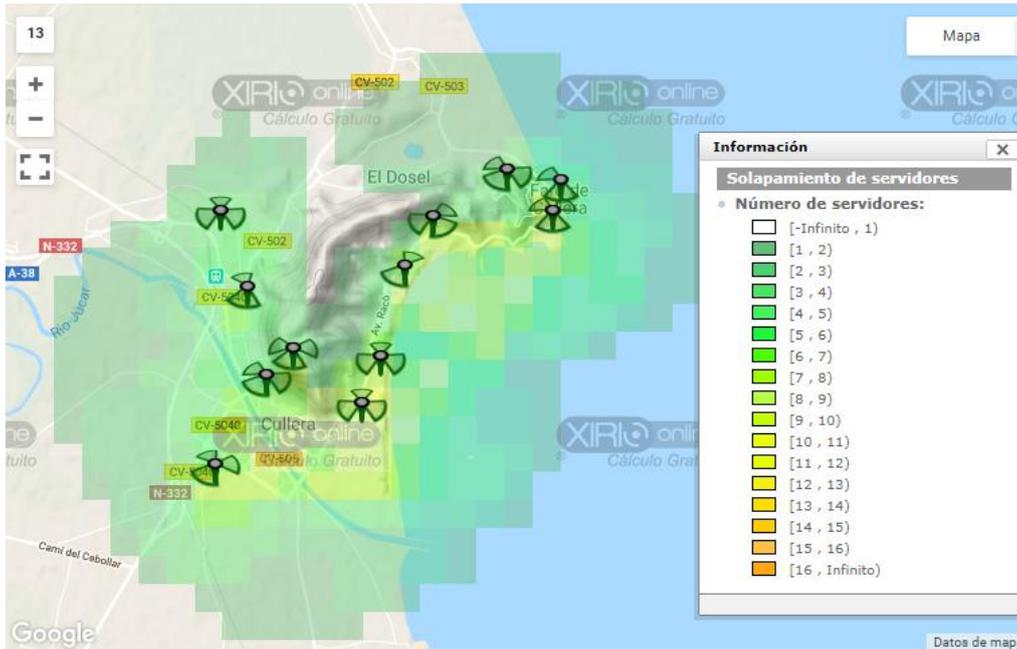


Imagen 60 Solapamiento: 1910MHz, Inclinción 20°, Potencia TX 20w

### 6.3.1.2. A frecuencia de 847 MHz

#### 1. Parámetros de configuración:

- Potencia de TX: 20 W.
- Inclinción del sector: 12°.
- Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.

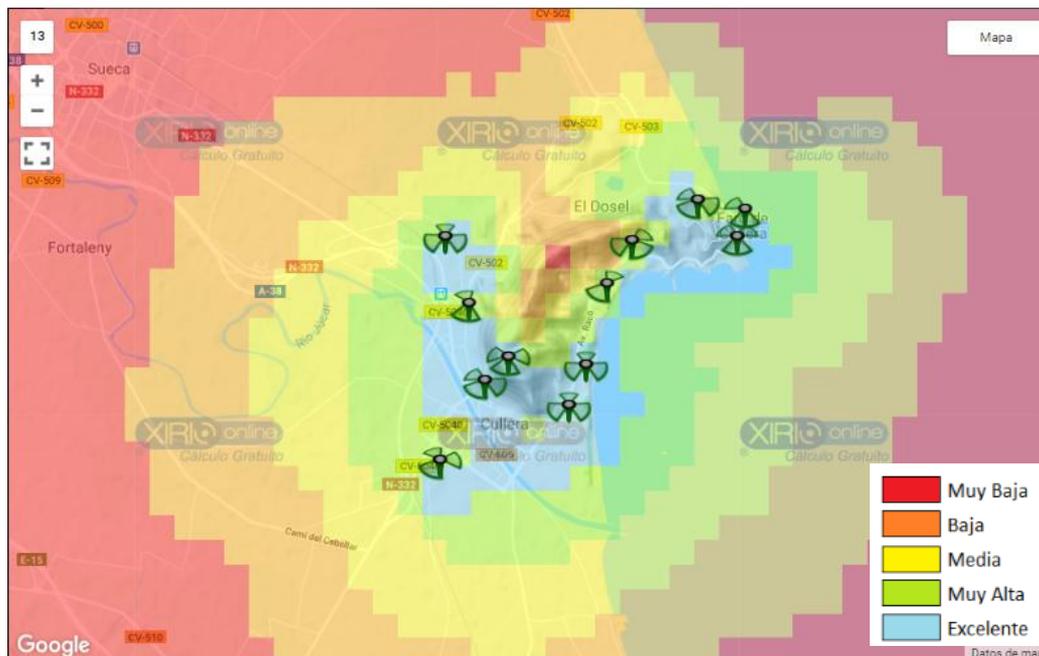


Imagen 61 RSRP: 847MHz, Inclinción 12°, Potencia TX 20w



Imagen 62 Mejor servidor: 1910MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 20w

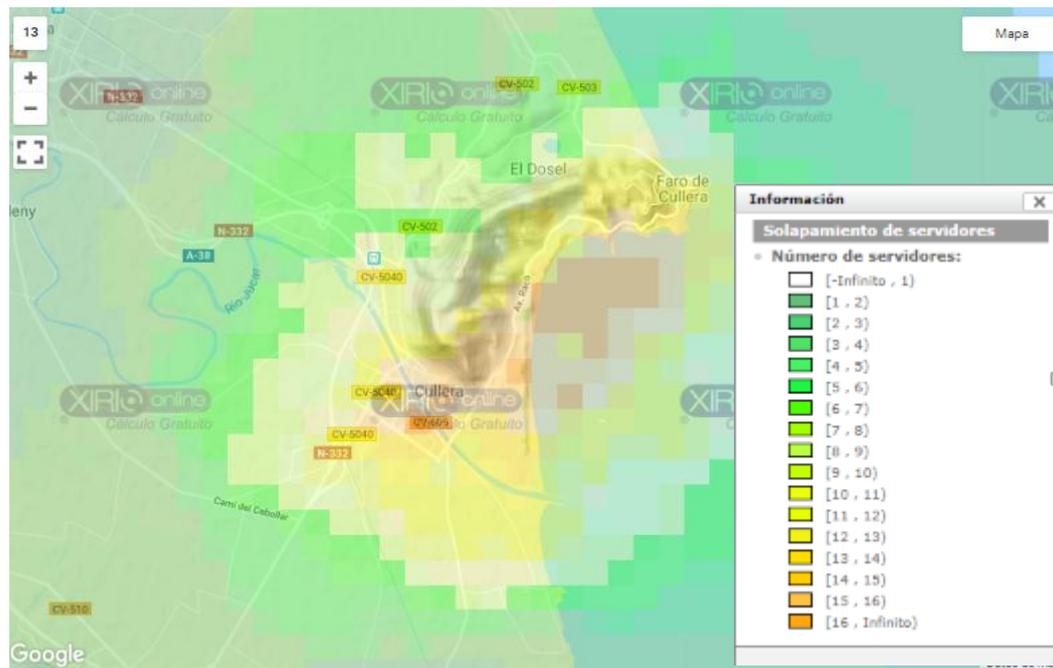


Imagen 63 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 20w

### 6.3.1.3. A frecuencia de 847 MHz

#### 1. Parámetros de configuración:

- Potencia de TX: 15 W.
- Inclinação del sector: 12°.
- Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.

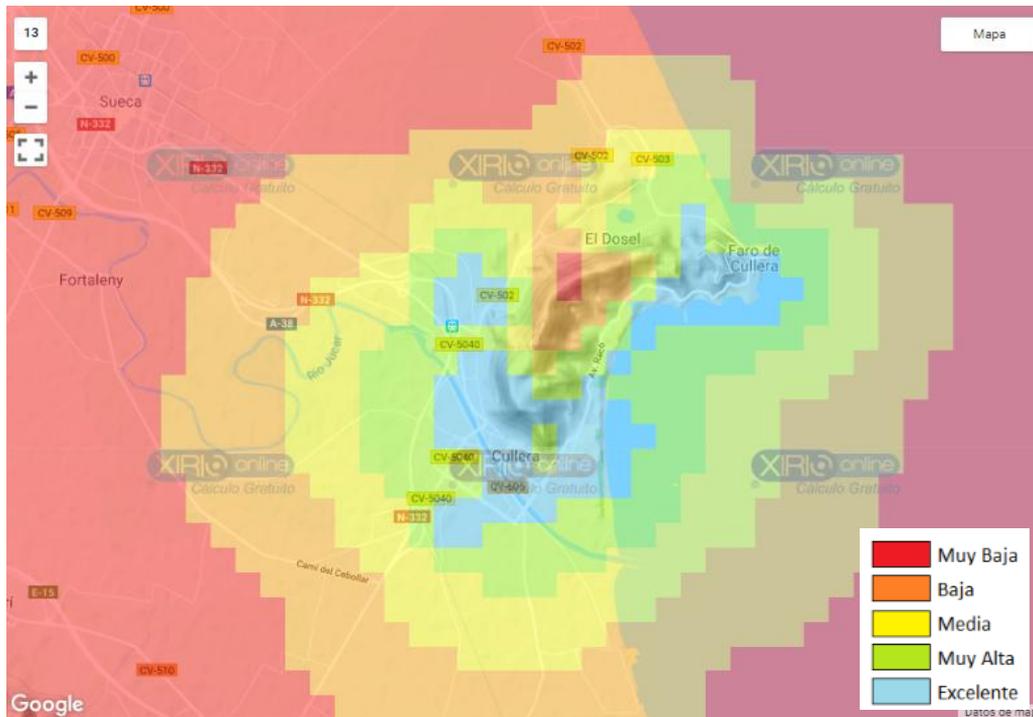


Imagen 64 RSRP: 847MHz, Inclinação 12°, Potencia TX 15w

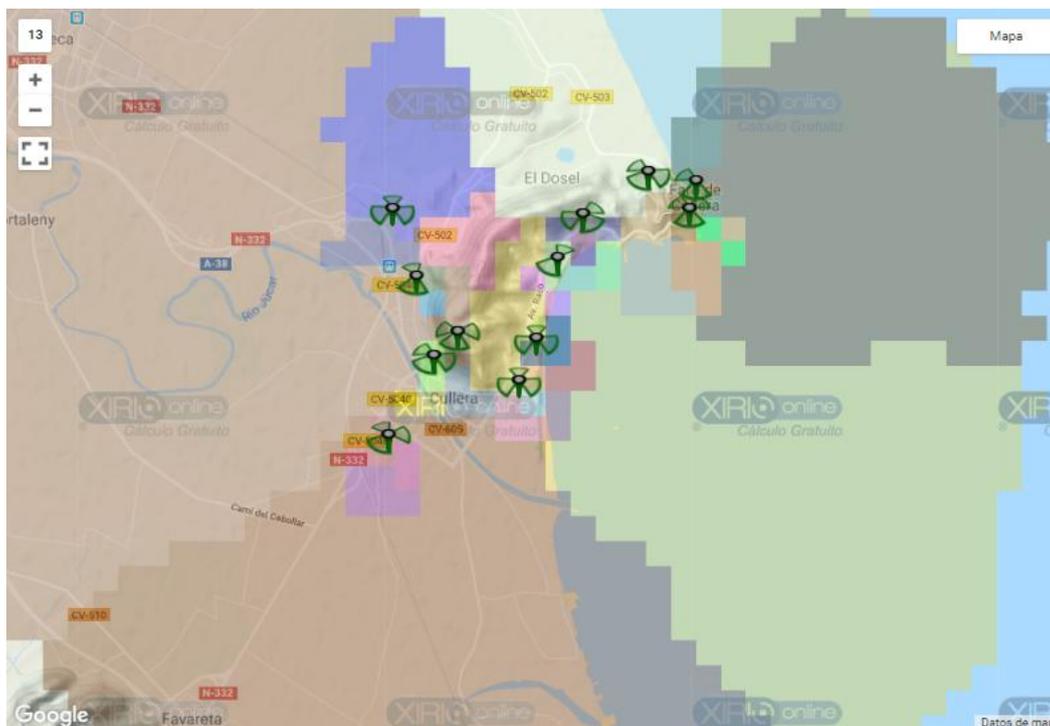


Imagen 65 Mejor servidor: 847MHz, Inclinação 12°, Potencia TX 15w

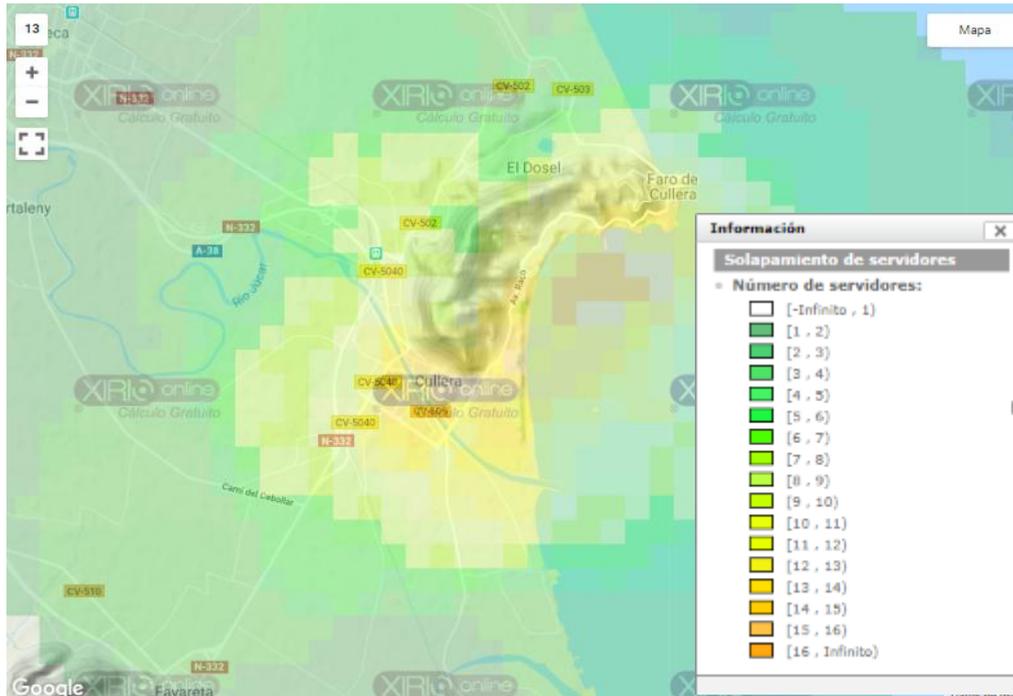


Imagen 66 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 12°, Potencia TX 15w

## 2. Parámetros de configuración:

- Potencia de TX: 15 W.
- Inclinación del sector: 20°.
- Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.

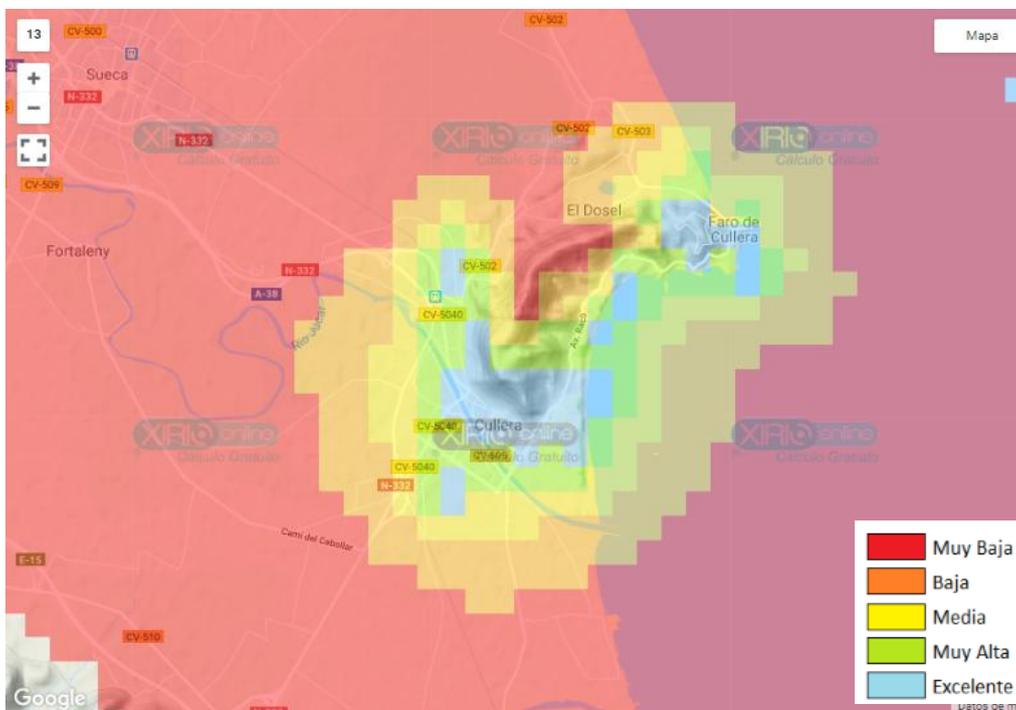


Imagen 67 RSRP: 847MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 15w

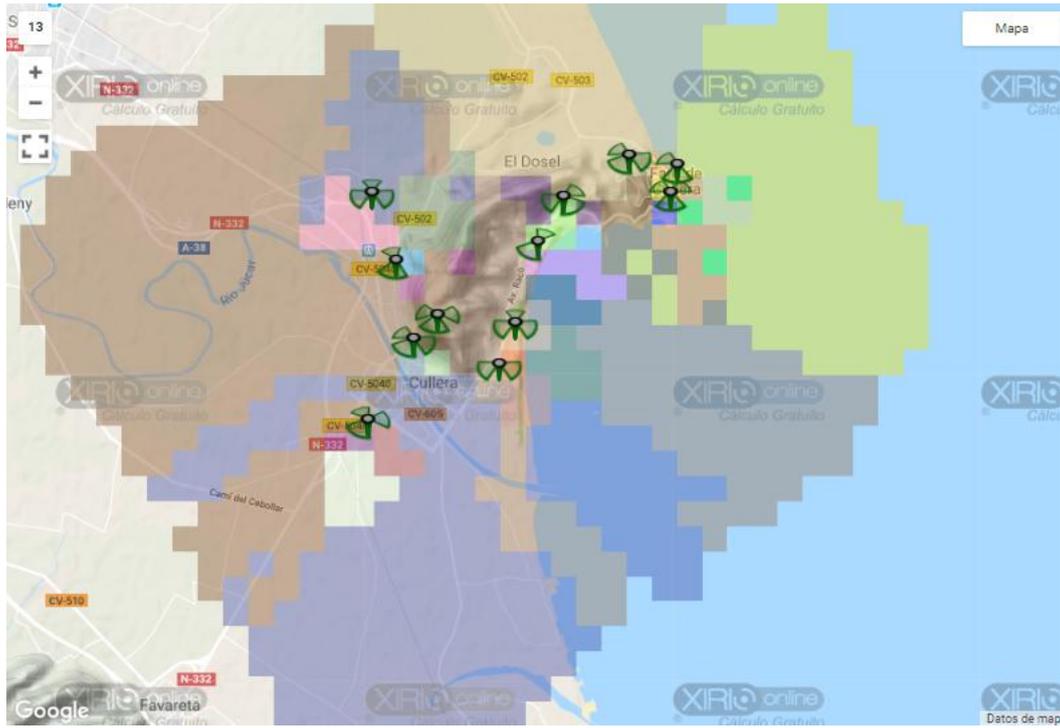


Imagen 68 Mejor servidor: 847MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 15w

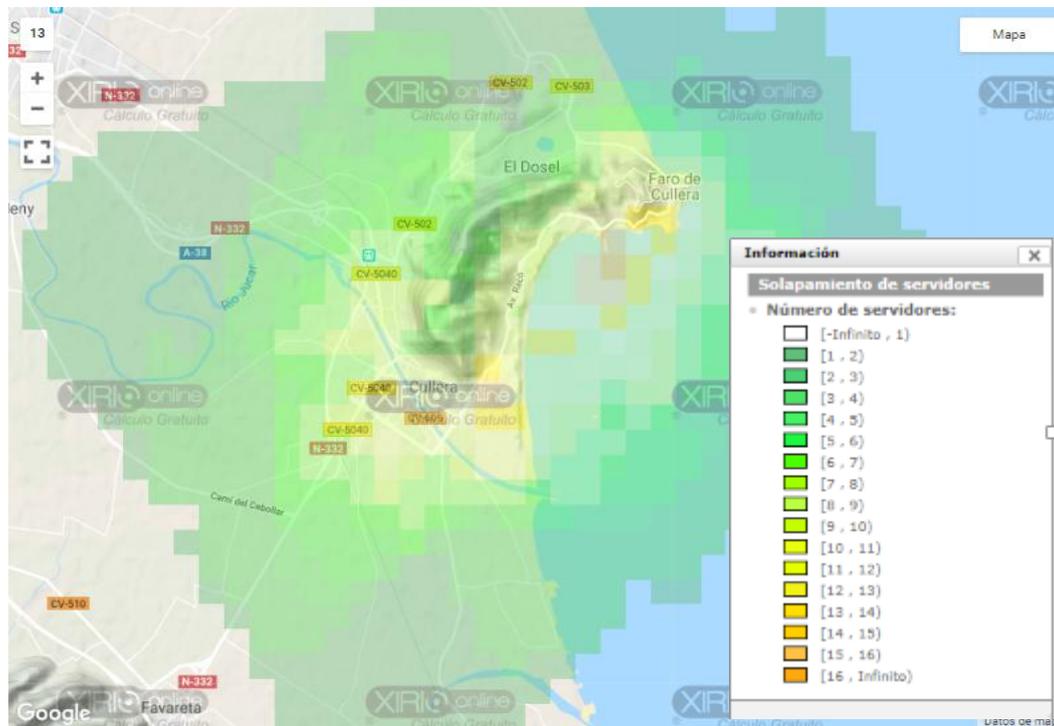


Imagen 69 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 20°, Potencia TX 15w

### 3. Parámetros de configuración:

- **Potencia de TX: 12 W.**
- **Inclinación del sector: 22°.**
- **Modelo cálculo: Okumura-Hata entorno suburbano pequeño.**

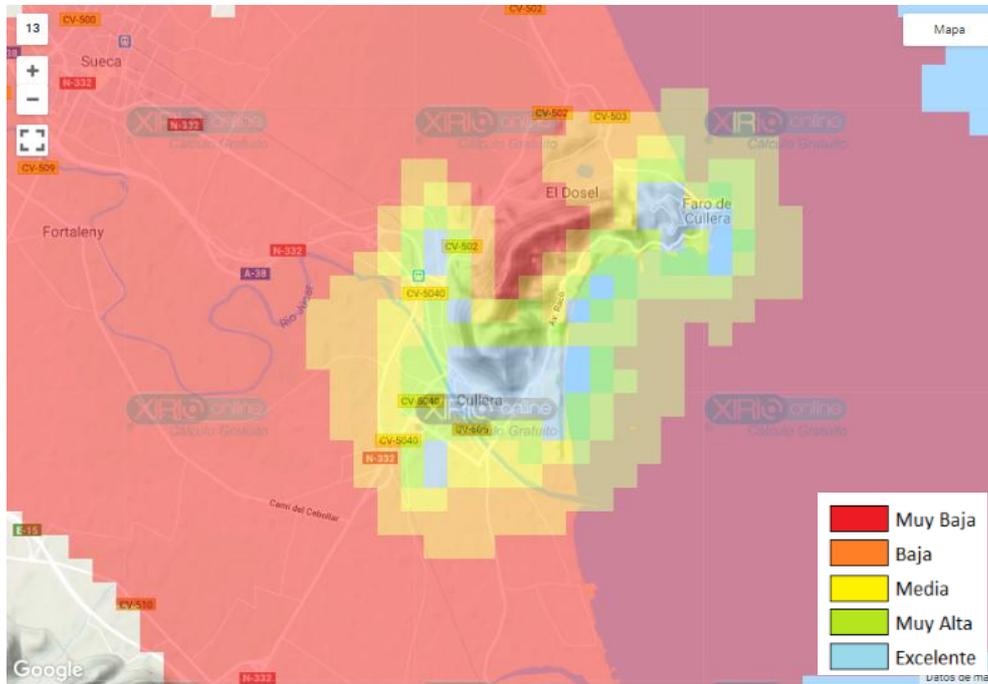


Imagen 70 RSRP: 847MHz, Inclinación 22°, Potencia TX 12w

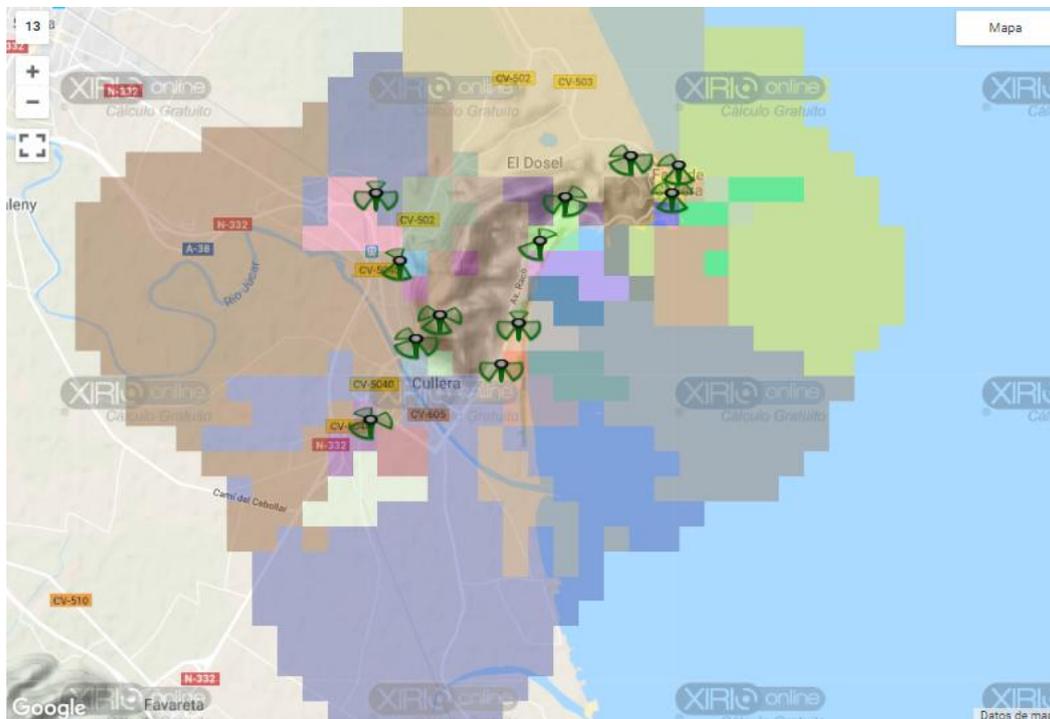


Imagen 71 Mejor servidor: 847MHz, Inclinación 22°, Potencia TX 12w

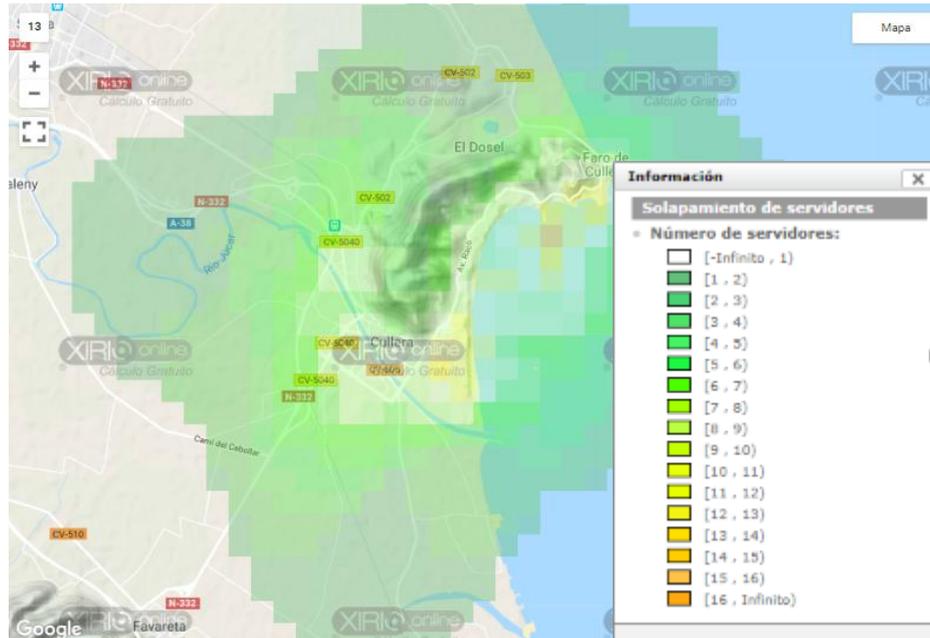


Imagen 72 Solapamiento: 847MHz, Inclinación 22°, Potencia TX 12w

### 6.3.2. Análisis de las simulaciones de Cobertura

Las principales conclusiones obtenidas de las simulaciones de cobertura son las siguientes:

- Al utilizar la frecuencia de 847MHz, dentro de la banda de 800MHz del primer dividendo digital, se ha obtenido una mejora de cobertura respecto a la simulación de 1910MHz. Esto es debido a que las ondas de menor frecuencia y longitud de onda más larga tienen mayor poder de penetración y se amplía la zona de cobertura geográfica.
- Si cotejamos o confrontamos el haber utilizado una banda con la otra, a la frecuencia de 847 MHz se obtienen unas prestaciones mejores, debido a que en la transmisión se producen menos pérdidas y la potencia utilizada para la antena en transmisión es menor. Una mejora en cobertura se traduce en una mejora en capacidad, ya que se obtienen niveles de señal mayores, y por tanto la SNR en el receptor es mayor, y se puede usar un MCS de orden mayor con menor robustez y mayor throughput.
- Cuando la planificación se hace con una frecuencia de 1910 MHz, más utilizada por las estaciones base en la zona donde se ha realizado el estudio, se ha tenido que aumentar la potencia de emisión de la antena transmisora y al abarcar una cobertura menor. El *downtilt* se ha tenido que reducir para que contrarrestara el efecto de que a esta potencia el área de cobertura fuese menor.
- En referencia al solapamiento de las coberturas de las EB, hay zonas que pueden ser susceptibles de sufrir interferencias debido a la alta ocupación radioeléctrica. Una tarea clave en planificación es ajustar el área de la celda de forma minuciosa, puesto que no es un efecto deseado que las coberturas de diferentes servidores se solapen, si se solapan muchas es una indicación de que la zona no ha sido planificada correctamente. Se ha intentado evitar en la medida

de lo posible que una zona tenga servicio por varias estaciones base, para evitar interferencia como hemos nombrado anteriormente, pero también puede ser beneficioso ya que en caso de un fallo o saturación en una estación base, puede darle servicio otra, garantizando así el servicio.

- Parámetros que han hecho que se ampliara o redujese la zona de cobertura han sido la frecuencia de portadora, la potencia de emisión y el *downtilt*. Conforme se reduce la potencia o se aumenta el grado de inclinación se reduce el alcance de las estaciones base. Ver ANEXO L y M.

## 7. Conclusiones

---

Una vez finalizado el desarrollo del Trabajo Fin de Grado, podemos extraer una serie de conclusiones que se han ido obteniendo a lo largo del mismo, tanto en las recolección de las medidas con la aplicación para Android NetMonitor, como de la simulación con el programa online Xirio.

Al intentar emular la cobertura real en la herramienta de planificación Xirio Online, he entendido el trabajo duro que desempeña un ingeniero para planificar una red y ofrecer una buena cobertura y servicio a los usuarios.

Los obstáculos encontrados a lo largo del desempeño de este trabajo han sido los siguientes:

- En la medición de potencia de señal con NetMonitor, la ubicación de las estaciones base ha sido un verdadero trabajo de investigación, porque la situación de éstas no es precisa.
- Encontrar un modelo de simulación que correspondiese de manera fidedigna a las mediciones reales obtenidas.

Las principales conclusiones obtenidas al medir el nivel de señal 4G+ a lo largo de municipio de Cullera, son:

- Se puede afirmar que la cobertura en Cullera que ofrece el operador Vodafone, es buena. Se han analizado casi 7600 puntos de medida y de ellos el 10.75% son inferiores a -104 dBm y 0.75% son inferiores -112dBm que sería la sensibilidad de nuestro terminal. En la mayoría de las zonas con muy mala cobertura se produce un efecto ping-pong entre varias estaciones base debida a la mala calidad de la señal.
- Obteniendo un histograma de las medidas tenemos que 2385 muestras (31.38%) tienen un valor por debajo de 97dBm. Por encima son más numerosos. que los que se han medido con una intensidad de señal baja o muy baja, en concreto 5215 muestras (68.61%).
- Al realizar la función de distribución acumulativa, se observa que la calidad de cobertura es media o superior en un porcentaje del 71% de las medidas reales en Cullera, con lo que se corrobora que la cobertura ofrecida en el municipio es buena.

Las principales conclusiones obtenidas de observar la cobertura de las estaciones base, son:

- Las zonas en las que se produce el efecto ping-pong, se produce una señalización inecesaria, latencia y pérdida de paquetes. Los dos últimos influyen

en la calidad percibida por el usuario en los servicios de voz. Para disminuir el efecto ping-pong, se utiliza el TTT (*time to trigger*). Es importante una selección adecuada del TTT, un valor muy grande retrasaría el *handover* y se podría perder el servicio.

- Existen estaciones base que dan cobertura o servicio a zonas alejadas, para las que no fueron diseñadas, habiendo otras más cerca, esto provoca sobrealcances. La solución pasa por replantear la cobertura de sobrealcance, o bien, las EB cercanas cubran esta zona o de no ser posible instalar un nuevo emplazamiento. También se debería reducir altura y/o downtilt de las estaciones base que dan cobertura fuera de su celda, para reducir de esta forma la visión directa.

Las principales conclusiones obtenidas de las simulaciones de cobertura son:

- Una tarea clave en planificación es ajustar el área de la celda de forma minuciosa, puesto que no es un efecto deseado que las coberturas de diferentes servidores se solapen, si se solapan muchas es una indicación de que la zona no ha sido planificada correctamente.
- Al utilizar la frecuencia de 800MHz, se ha obtenido una mejora de cobertura respecto a la simulación de 1910MHz, debido a que tienen mayor poder de penetración y en consecuencia, se amplía la zona de cobertura geográfica.
- A la frecuencia de 800 MHz se obtienen unas prestaciones mejores, porque se producen menos pérdidas en la transmisión y la potencia utilizada para la antena en transmisión es menor.
- Al planificar con una frecuencia de 1900 MHz, la potencia de emisión de la antena transmisora ha tenido que ser mayor que en el caso de 800 MHz y el *downtilt* se ha tenido que reducir para que contrarrestara el efecto de que a esta potencia el área de cobertura fuese menor.

## 8. Bibliografía

---

### Libros:

- [1] Ayman ElNashar, Mohamed A. El-saidny, Mahmoud Sherif, *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A practical approach*. Editorial Wiley, 2014.
- [2] Narcís Cardona, J.J. Olmos, Mario García y José F. Monserra, *3GPP LTE: hacia la 4G móvil*. Editorial Marcombo, 2011.
- [3] J.M. Huidobro Moya, *Comunicaciones Móviles. Sistemas UMTS, GSM y LTE*. Editorial Ra-ma, 2012.

### Apuntes:

- [4] David Gómez Barquero, *4G LTE de Sistemas de Comunicación Inalámbricas (SCI)*. Curso 2018/19.
- [5] David Gómez Barquero, *Práctica Drive Test de SCI*. Curso 2018/19.
- [6] David Gómez Barquero, *Práctica de Planificación 4G LTE en una carretera de SCI*. Curso 2018/19.
- [7] David Gómez Barquero, *Práctica de Planificación 4G LTE en una zona urbana de SCI*. Curso 2018/19.

### Trabajos Fin de Grado, Proyecto o Máster:

- [8] Rubén Martín Cubero, *Planificación de una red 4G*, Universidad Politécnica, Campus Sur.
- [9] Ignacio Fernández López, *Planificación y dimensionado de una red LTE*. Universitat Politècnica de Catalunya.

### Revistas:

- [10] Revista Telem@tica Vol.5 No.1, enero-abril 2017, p.31-46

### Enlaces web:

- [11] <https://play.google.com/store>
- [12] <https://www.xirio-online.com/>
- [13] <https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do>
- [14] <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>
- [15] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parizene.netmonitor>
- [16] <https://www.digi.com/support/knowledge-base/understanding-lte-signal-strength-values>
- [17] [www.foro.vodafone.es](http://www.foro.vodafone.es)
- [18] <https://blog.arimas.com/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte/>
- [19] [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)
- [20] [www.redeszone.net](http://www.redeszone.net)
- [21] [www.adslzone.net](http://www.adslzone.net)
- [22] [www.cellidfinder.com](http://www.cellidfinder.com)
- [23] <https://pisapapeles.net/aprende-a-verificar-que-equipos-son-compatibles-con-4g/>
- [24] [https://www.gsmarena.com/samsung\\_galaxy\\_s7\\_edge-7945.php](https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_s7_edge-7945.php)
- [25] <https://www.xatakamovil.com/mercado/el-samsung-galaxy-s7-frente-a-otros-moviles-de-gama-alta-resistentes-al-agua>
- [26] <http://aptica.es/que-hacemos/productos/xirio-online/>
- [27] <https://www.xirio-online.com/help/es/propagationmethod.htm>
- [28] <https://es.data-alliance.net/lte-y-lte-a/>