

Análisis de cobertura en estaciones base para antenas de 4G y 5G.

UOC

Mónica Ramírez Panduro

Tecnología de Antenas

Nombre Tutor/a de TFM

Dr. Jaume Anguera Pros

Dr. Aurora Andújar Linares

**Profesor/a responsable de
la asignatura**

Dr. Germán Cobo Rodríguez

30/01/2023

Universitat Oberta
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Análisis de cobertura en estación base para antenas de 4G y 5G.</i>
Nombre del autor:	<i>Mónica Ramírez Panduro</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Dr. Jaume Anguera, Dr. Aurora Andújar</i>
Nombre del PRA:	<i>Dr. Germán Cobo</i>
Fecha de entrega (01/2023):	<i>30/01/2023</i>
Titulación o programa:	<i>Máster Ingeniería de Telecomunicaciones</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnología de antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Castellano</i>
Palabras clave	<i>ATOLL, cobertura, antena</i>

Resumen del Trabajo

Actualmente los operadores de telefonía móvil se enfrentan al despliegue masivo de la tecnología radio 5G. La introducción del 5G en red exige un replanteamiento de los modelos de balance de enlace y los estudios de cobertura, ya que supone la utilización de bandas nuevas de frecuencia y el uso de modernas tecnologías aplicadas a las antenas para hacerlas más eficientes (MIMO, *Beamforming*, etc.). En este trabajo se realiza un análisis en profundidad de los distintos factores que impactan en la huella de cobertura móvil. Factores tales como la banda de frecuencia, la tecnología, la orografía o la interferencia que son elementos clave en la realización de una buena planificación de la red móvil.

En el trabajo se destacan las bondades del 5G con respecto a su predecesor el 4G a través de un estudio detallado de la cobertura radio conseguida a partir de diversas simulaciones. Estas simulaciones se llevarán a cabo por medio del entorno de predicción de cobertura y planificación radio ATOLL.

Los resultados obtenidos en el estudio han sido procesados y preparados para su posterior análisis, y aportan a la investigación una visión completa del entorno radio, desde el examen de las antenas y sus apuntamientos hasta el entendimiento del panorama radioeléctrico como las características de las bandas de frecuencia o el desvanecimiento de la señal.

Abstract

Nowadays, mobile phone operators are facing a massive 5G technology deployment. Due to new requirements about the utilization of new frequency bands and use of modern technologies applied to antennas for doing them more efficient (MIMO, beamforming, etc.), 5G introduction in the existing mobile network, demand a stakeout in the link budget and coverage studies. In this white paper it is performed a deep analysis of the different factors that have an important impact on the mobile coverage footprint. Factors such as frequency band, technology, orography, or interference are key elements in the development of a good mobile network planification.

In this research, 5G related benefits are highlighted in comparison with its predecessor 4G. This is accomplished through a detailed radio coverage study achieved according to diverse simulations. Aforesaid simulations will be executed by means of radio coverage prediction and planification environment, with ATOLL software.

The results obtained during the study have been processed and arranged for further determination. These conclusions bring to the investigation a wide vision about the radio context, from the antenna examination and their pointing to the characteristics of frequency band, signal fading as well as understanding the radio panorama.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	1
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO	1
1.3. IMPACTO EN SOSTENIBILIDAD, ÉTICO-SOCIAL Y DE DIVERSIDAD	2
1.4. ENFOQUE Y MÉTODO SEGUIDO	2
1.5. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	2
1.5.1. RUTA CRÍTICA	3
1.5.2. DIAGRAMA DE GANTT	3
1.6. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS OTROS CAPÍTULOS DE LA MEMORIA	4
2. MATERIALES Y MÉTODOS	5
2.1. ATOLL	5
2.2. LONT TERM EVOLUTION (LTE)	5
2.3. NEW RADIO (5G)	5
2.4. INCLINACIÓN DE LAS ANTENAS	6
2.4.1. MECHANICAL DOWNTILT (MDT)	6
2.4.2. REMOTE ELECTRICAL TILT (RET)	7
2.5. MIMO	7
2.5.1. BEAMFORMING	8
2.5.1.1. FORMA DE HAZ	8
2.5.1.2. MODOS DE <i>BEAMFORMING</i>	10
2.5.2. ANTENAS <i>MASSIVE MIMO</i>	10
2.6. ÁREA DE COBERTURA DE UNA CÉLULA	10
2.7. POTENCIA DE LA SEÑAL Y NIVELES DE RUIDO	10
2.7.2. POTENCIA DE LA SEÑAL	10
2.7.3. NIVEL DE RUIDO	10
2.7.4. RELACIÓN SEÑAL A RUIDO (SNR: <i>SIGNAL TO NOISE RATIO</i>)	11
2.8. DESVANECIMIENTO DE LA SEÑAL	11
2.8.1. DESVANECIMIENTO POR SOMBRA RÁPIDO: <i>MULTITRAYECTO</i>	11
2.8.2. DESVANECIMIENTO POR SOMBRA LENTO: <i>SOMBRA</i>	12
3. RESULTADOS	13
3.1. CONFIGURACIÓN DE LAS MEDIDAS EN ATOLL	13
3.1.1. MADRID	15
3.1.2. SANTA POLA	15
3.1.3. SANTA CILIA DE PONZANO	15
3.2. TILT	15
3.2.1. MDT	15
3.2.2. RET	17
3.3. BANDA	18
3.4. TECNOLOGÍA	19
3.4.1. MADRID	19
2.5.1.3. BANDAS BAJAS	19
2.5.1.4. BANDAS ALTAS	20
3.4.2. SANTA POLA	21
3.4.2.1. BANDAS BAJAS	21
3.4.2.2. BANDAS ALTAS	22
3.4.3. SANTA CILIA DE PONZANO	23

3.4.3.1.	BANDAS BAJAS.....	23
3.4.3.2.	BANDAS ALTAS	23
3.5.	POTENCIA DE LA SEÑAL	24
3.5.1.	MADRID	24
3.5.1.1.	SECTOR 1.....	24
3.5.1.1.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	24
3.5.1.1.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	26
3.5.1.2.	SECTOR 2.....	26
3.5.1.2.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	26
3.5.1.2.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	28
3.5.1.3.	SECTOR 3.....	28
3.5.1.3.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	28
3.5.1.3.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	30
3.5.2.	SANTA POLA.....	30
3.5.2.1.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	30
3.5.2.2.	SECTOR 1.....	30
3.5.2.2.1.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	32
3.5.2.3.	SECTOR 2.....	33
3.5.2.3.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	33
3.5.2.3.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	34
3.5.2.4.	SECTOR 3.....	35
3.5.2.4.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	35
3.5.2.4.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	35
3.5.3.	SANTA CILIA	36
3.5.3.1.	SECTOR 1.....	36
3.5.3.1.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	36
3.5.3.1.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	38
3.5.3.2.	SECTOR 2.....	38
3.5.3.2.1.	MEDIDAS DE SEÑAL.....	38
3.5.3.2.2.	MEDIDAS DE INTERFERENCIA.....	40
3.5.3.3.	SECTOR 3.....	40
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	41
4.1.	CONCLUSIONES	41
4.2.	ANÁLISIS CRÍTICO DE LA PLANIFICACIÓN Y LOS IMPACTOS PREVISTOS E IMPREVISTOS	42
4.3.	LÍNEAS FUTURAS	43
5.	GLOSARIO.....	44
6.	BIBLIOGRAFÍA	46

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1: Ruta crítica del proyecto. Actividades para realizar en el proyecto y su duración en semanas.....	3
Ilustración 2: Diagrama de Gantt del proyecto. Ruta crítica marcada en rojo. ...	3
Ilustración 3: Diagrama de radiación de una antena con MDT [6].....	6
Ilustración 4: Diagrama de radiación de una antena con RET [6].	7
Ilustración 5: Nomenclatura de modos de transmisión de antenas según el número de transmisores y receptores [9].	7
Ilustración 6: <i>Layers</i> de las antenas SU-MIMO y las de MU-MIMO [10].	8
Ilustración 7: Representación de radiación según el número de elementos radiantes alimentados en fase [11].....	9
Ilustración 8: Representación de una antena con cuatro elementos radiantes con un desfase de alimentación de 45° [11].....	9
Ilustración 9: Funcionamiento de una antena <i>beamforming</i> dando servicio a varios usuarios [13].	9
Ilustración 10: <i>Layers</i> de las antenas SU-MIMO frente a MU-MIMO.....	10
Ilustración 11: Diferentes haces de MU-MIMO en función de las alturas de edificios	10
Ilustración 12: Propiedades de los emplazamientos.	13
Ilustración 13: Propiedades de los transmisores utilizados.	14
Ilustración 14: Ejemplo de emplazamiento. 3 sectores.	14
Ilustración 15: Leyenda de las potencias medidas en ATOLL.....	15
Ilustración 16: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. 0° de inclinación.....	16
Ilustración 17: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Downtilt mecánico (MDT) de 4° (izquierda) y 10° (derecha).....	16
Ilustración 18: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Uptilt mecánico (MDT) de 4° (izquierda) y 10° (derecha).....	17
Ilustración 19: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Downtilt eléctrico (RET) de 10°.	17
Ilustración 20: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Uptilt eléctrico (RET) de 10°.	18
Ilustración 21: Madrid. Simulación de la banda LTE 2600. Tilt de referencia (0°).	19
Ilustración 22: Madrid. Simulación de la banda NR 700. Tilt de referencia (0°).	20
Ilustración 23: Madrid. Simulación de la banda NR 3500. Tilt de referencia (0°).	20
Ilustración 24: Santa Pola. Simulación de la banda LTE 800. Tilt de referencia (0°).....	21
Ilustración 25: Santa Pola. Simulación de la banda NR 700. Tilt de referencia (0°).....	22
Ilustración 26: Santa Pola. Simulación de LTE 2600 (izquierda) y NR 3500 (derecha). Tilt de referencia (0°).....	22
Ilustración 27: Santa Cilia de Ponzano. Simulación de LTE 800 (izquierda) y NR 700 (derecha). Tilt de referencia (0°).....	23
Ilustración 28: Santa Cilia de Ponzano. Simulación de LTE 2600 (izquierda) y NR 3500 (derecha). Tilt de referencia (0°).....	23

Ilustración 29: Madrid. Sector 1. Lugar del punto de medida a 500 m.	24
Ilustración 30: Madrid; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	24
Ilustración 31: Madrid; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).	25
Ilustración 32: Madrid. Sector 1. Lugar del punto de medida a 2.000 m.	25
Ilustración 33: Madrid; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).	25
Ilustración 34: Madrid; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).	26
Ilustración 35: Madrid; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	26
Ilustración 36: Madrid; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	26
Ilustración 37: Madrid. Sector 2. Punto marcado a 500 m.	27
Ilustración 38: Madrid; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	27
Ilustración 39: Madrid; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).	27
Ilustración 40: Madrid; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).	27
Ilustración 41: Madrid; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	28
Ilustración 42: Madrid; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	28
Ilustración 43: Madrid. Sector 3. Punto marcado a 500 m.	28
Ilustración 44: Madrid; Sector 3. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	29
Ilustración 45: Madrid; Sector 3. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).	29
Ilustración 46: Madrid. Sector 3. Punto marcado a 2.000 m.	29
Ilustración 47: Madrid; Sector 3. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).	29
Ilustración 48: Madrid; Sector 3. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).	30
Ilustración 49: Madrid; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	30
Ilustración 50: Madrid; Sector 3. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	30
Ilustración 51: Santa Pola. Sector 1. Punto marcado a 500 m.	31
Ilustración 52: Santa Pola; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	31
Ilustración 53: Santa Pola; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).	31

Ilustración 54: Santa Pola. Sector 1. Punto marcado a 2.000 m.	32
Ilustración 55: Santa Pola; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).	32
Ilustración 56: Santa Pola; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).....	32
Ilustración 57: Santa Pola; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	32
Ilustración 58: Santa Pola; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	32
Ilustración 59: Santa Pola. Sector 2. Punto marcado a 500 m.	33
Ilustración 60: Santa Pola; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	33
Ilustración 61: Santa Pola; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).....	33
Ilustración 62: Santa Pola. Sector 2. Punto marcado a 2.000 m.	34
Ilustración 63: Santa Pola; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).	34
Ilustración 64: Santa Pola; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).....	34
Ilustración 65: Santa Pola; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	34
Ilustración 66: Santa Pola; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	34
Ilustración 67: Santa Pola. Sector 3. Punto marcado a 500 m.	35
Ilustración 68: Santa Pola; Sector 3. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	35
Ilustración 69: Santa Pola; Sector 3. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).....	35
Ilustración 70: Santa Pola; Sector 3. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	36
Ilustración 71: Santa Pola; Sector 3. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	36
Ilustración 72: Santa Cilia de Ponzano. Sector 1. Punto marcado a 500 m.	36
Ilustración 73: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	36
Ilustración 74: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).	37
Ilustración 75: Santa Cilia de Ponzano. Sector 1. Punto marcado a 2.000 m. .	37
Ilustración 76: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).....	37
Ilustración 77: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).	37

Ilustración 78: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	38
Ilustración 79: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).	38
Ilustración 80: Santa Cilia de Ponzano. Sector 2. Punto marcado a 500 m.	38
Ilustración 81: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).	39
Ilustración 82: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).	39
Ilustración 83: Santa Cilia de Ponzano. Sector 2. Punto marcado a 2.000 m. .	39
Ilustración 84: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).	40
Ilustración 85: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).	40
Ilustración 86: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	40
Ilustración 87: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo está pensado para poder entender en profundidad el funcionamiento de las antenas utilizadas para comunicaciones móviles, así como los diferentes parámetros que afectan a la red radio. Las antenas utilizadas en comunicaciones móviles no son las mismas en todas las tecnologías radio, y a través de este estudio veremos de qué manera influirá en la huella cobertura móvil de cada tecnología aspectos como el tipo de antena, la banda de frecuencia o la orografía.

Es importante entender en profundidad todos los aspectos que afectan a la cobertura radio en las comunicaciones móviles para así realizar un estudio de cobertura óptimo. Si se consigue, también podremos reducir al máximo los costes de despliegue de red y minimizar el impacto radioeléctrico que pudiera suponer un exceso de elementos radiantes.

Al comenzar el trabajo se clasificaron una serie de aspectos radio para su posterior estudio. Se eligieron pensando en la implicación radio que tienen los mismos, para así conseguir un trabajo completo y que pueda servir de base a estudios posteriores.

1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El principal objetivo de este trabajo es analizar y comparar el rendimiento de las antenas utilizadas en New Radio (5G) y LTE (4G) en términos de huella de cobertura alcanzada.

Para conseguirlo se empleará una herramienta software de simulación de coberturas radioeléctricas denominada ATOLL, creada por la empresa FORSK [1]. A través de esta herramienta se conseguirán parámetros necesarios para el diseño de una red móvil en diferentes entornos:

- Ciudad: núcleo urbano denso.
- Costa: núcleo suburbano llano.
- Montaña: núcleo rural montañoso.

Una vez elegidos los diferentes entornos de simulación, esta constará de las siguientes pruebas:

- Tilt: positivos y negativos de diferente calibre.
- Banda de frecuencia: diferentes bandas.
- Tecnología: LTE y NR.
- Altura de las edificaciones: casas bajas, edificios altos, parques, etc.
- Potencia de la señal: huella de cobertura en diferentes puntos.
- Interferencia: medida en varios lugares de referencia.

Con la ayuda de estas simulaciones se podrán determinar los parámetros necesarios para el diseño de una red en función del entorno y el resto de condicionantes que afectan a las comunicaciones inalámbricas.

1.3. IMPACTO EN SOSTENIBILIDAD, ÉTICO-SOCIAL Y DE DIVERSIDAD

Este proyecto tendrá un impacto positivo si hablamos de sostenibilidad energética y radioeléctrica. Al estar enfocado en ver de qué manera actúan los transmisores radioeléctricos ante diferentes medios y obstáculos y los resultados en cobertura, podemos llegar a la conclusión de cuál sería la posición óptima de los mismos. Esta posición será la que ayude a reducir el número de antenas, y de esta manera poder reducir el uso radioeléctrico, que en muy grandes cantidades podría afectar a la salud de las personas, o animales. Es por ello por lo que podemos pensar que supondría un impacto ético-social positivo, ya que pasaríamos a desplegar sitios radio pensando en algo más que los beneficios económicos.

Al reducir el número de antenas y emplazamientos también se reducirá el consumo eléctrico total de un operador móvil, ya que necesitará de menos electricidad para alimentar su red de telecomunicaciones.

Es importante que las medidas que se sacan de este software tengan una gama tonal variada, y que pueda ser modificada de forma dinámica y rápida para la fácil comprensión de las personas con dificultades para distinguir colores. Por esta parte, ATOLL ofrece una gran gama de colores y tonos que se pueden modificar de forma sencilla en caso de que fuera necesario. En este trabajo se han resaltado los puntos importantes para que sea fácil la diferenciación de las marcas de interés.

1.4. ENFOQUE Y MÉTODO SEGUIDO

Las estrategias seguidas para el correcto desarrollo del proyecto serán las dirigidas a utilizar un software de simulación radio para conseguir una serie de resultados.

Realizaremos simulaciones en el software ATOLL y las guiaremos hacia los puntos que consideremos oportunos para sacar conclusiones válidas.

Consideramos que la mejor técnica para lograr deducciones válidas sobre antenas 4G y 5G será la utilización de un software de simulación, ya que es mucho más barato y rápido que cualquier otra opción para cálculo de medidas; estudios de cambio, drive test, etc. Se ha elegido la herramienta de ATOLL ya que es un software que incluye todas las variables radio y la combina de forma muy precisa. ATOLL también permite elegir los parámetros del medio y permite la carga de mapas precisos.

1.5. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

El proyecto para realizar constará de las actividades descritas en la Ilustración 1. Este proyecto estará dimensionado con seis diferentes actividades que habrá que llevar a cabo a lo largo de las catorce semanas de las que disponemos. Es por ello, que, con el fin de conseguir realizar cada actividad en el tiempo correspondiente, y sin que una tarea afecte a la realización de su predecesora, hemos realizado un estudio previo de las actividades componentes del proyecto.

1.5.1. RUTA CRÍTICA

Para gestionar el seguimiento del proyecto, así como el control de progreso de cada una de las etapas de este, nos guiaremos a través de un diagrama de Gantt planificado en base a la ruta crítica.

ACTIVIDAD	PREDECESOR	DURACIÓN (Semanas)
ACTIVIDAD A	-	2
ACTIVIDAD B	-	4
ACTIVIDAD C	B	3
ACTIVIDAD D	C	5
ACTIVIDAD E	C, D	3
ACTIVIDAD F	E	1

Ilustración 1: Ruta crítica del proyecto. Actividades para realizar en el proyecto y su duración en semanas.

En la Ilustración 1 se pueden ver las partes de las que constará nuestro proyecto, etiquetadas desde la A hasta la F, así como la actividad a la que se refiere cada una de estas. En la tercera columna de la tabla titulada como “Predecesor”, se encuentran situadas según la etiqueta, la actividad que se debe empezar inmediatamente antes que la actividad del inicio de esa fila. De esta manera la tarea “Simulaciones de cobertura” podrá llevarse a cabo una vez terminados el “Configuración de emplazamientos” (actividades B y C respectivamente). Es a partir de esta tabla como llegamos a calcular el diagrama de Gantt, y exponer la información de una manera más intuitiva.

1.5.2. DIAGRAMA DE GANTT

A continuación, en la Ilustración 2 se muestra el diagrama de Gantt del proyecto de este TFM.

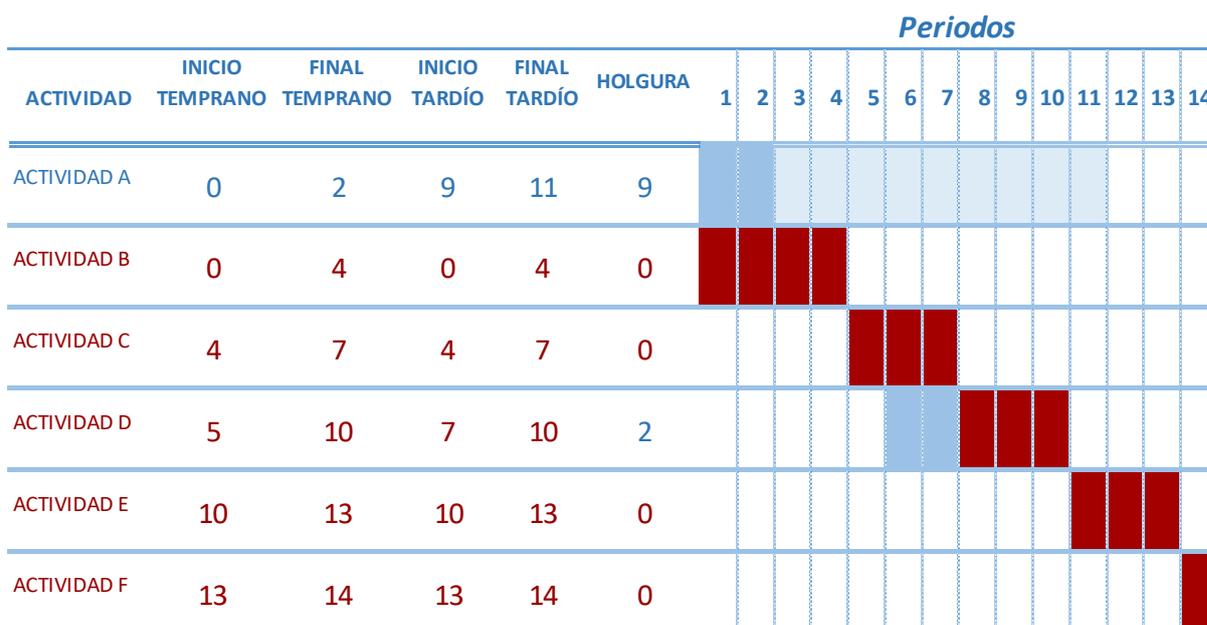


Ilustración 2: Diagrama de Gantt del proyecto. Ruta crítica marcada en rojo.

En rojo se representan las actividades que forman parte del camino crítico, ya que no puede retrasarse el final de estas. La “Actividad A” que no pertenece a la ruta crítica se representa con dos casillas azules, la parte más oscura es la duración de semanas que conlleva la actividad, y el azul más claro representa hasta que semana podría alargarse la actividad sin afectar al final previsto del proyecto.

Con este diagrama también vamos a poder conocer cuál es primer momento en el que se puede comenzar una actividad (Inicio Cercano) y cuál es el más próximo para poder terminar una actividad (Término Cercano). Adicionalmente, también se representa lo más tarde que podríamos terminar una tarea sin que afectase a las fechas de inicio y fin del resto del proyecto (indicado en el diagrama como Final Tardío), y lo más tarde que podríamos empezar una actividad sin retrasar el trabajo (denominado Inicio Tardío). De esta manera, la Holgura será el tiempo máximo que se puede retrasar el inicio de una actividad sin que la fecha de fin de la última actividad se vea alterada. La holgura sobre la ruta crítica será siempre igual a cero, siendo esta la ruta marcada en rojo.

1.6. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS OTROS CAPÍTULOS DE LA MEMORIA

En este punto vamos a hacer una breve introducción de los contenidos de cada una de las partes de este proyecto:

Primeramente, encontramos la parte de “Materiales y métodos”, dónde se detalla la información necesaria para la posterior comprensión de los resultados obtenidos en el estudio. Se aporta información sobre la herramienta utilizada, las tecnologías radio con las que trabajaremos, explicamos que es el tilt de una antena, así como los modos de transmisión de antena (MIMO) y las formas de conformación de haces (*beamforming*). También se detallan los campos para la comprensión de los resultados, tales como la potencia de señal, de interferencia y que es un desvanecimiento y sus formas.

Una vez entendidos los conceptos básicos, pasamos al punto de “Resultados” donde puede verse de manera extensa y detallada todas las simulaciones de cobertura realizadas, así como anotaciones explicando los resultados para facilitar su comprensión.

Por último, nos encontramos el punto de “Conclusiones y trabajos futuros”, dónde se resume la parte de resultados, haciendo énfasis en las principales resoluciones obtenidas. También se hace una pequeña observación de lo que podría aportar el 6G en un estudio posterior.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ATOLL

ATOLL [1] es una herramienta que modela las diferentes tecnologías radio, desde 2G hasta 5G y ofrece la posibilidad de tener un escenario multitecnología. A través de esta herramienta se pueden conseguir cálculos de cobertura teórica, estudios de interferencia o capacidad, análisis de cobertura, etc. En estas simulaciones pueden hacerse medidas de nivel de señal, mejor servidora, cobertura en un punto determinado, comparación de resultados, etc.

ATOLL permite la elección de los modelos de propagación, así como de adaptación de los diferentes parámetros de los elementos de red, tales como transmisores, pasivos, etc.

La interfaz utilizada por la máquina de ATOLL es compatible con Windows, flexible y abierta a la hora de incluir información específica como modelos de antenas datos de red o cartografía. Los datos obtenidos pueden ser exportados a herramientas Windows como Excel para su posterior uso.

Esta aplicación nos brindará la oportunidad de realizar simulaciones complejas a partir de métodos de predicción de la cobertura sobre escenarios topográficos de alta resolución.

2.2. LONG TERM EVOLUTION (LTE)

El LTE 4G [2] es una tecnología inalámbrica de alto rendimiento para sistemas de comunicaciones móviles. Es la llamada cuarta generación de tecnologías radio diseñada para incrementar la capacidad y la velocidad de las redes móviles anteriores (3G).

El LTE persigue dar las prestaciones de la fibra óptica (alta velocidad de transferencia, de hasta 1Gbps de velocidad de descarga [3]), ya que los usuarios de esta nueva generación quieren la misma velocidad de transmisión de datos en su casa, como fuera de casa.

Las tarifas planas hicieron que el operador de telefonía buscase una mayor eficiencia de costes.

Según el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), el 4G es una tecnología global, que ofrece una experiencia de usuario mejorada, con picos de velocidad de bajada de 10Mbps y de 50 Mbps en subida. El LTE se caracteriza por tener una baja latencia, por debajo de los 10 ms.

El ancho de banda del LTE es escalable. Con esta nueva tecnología se busca reducir el coste por bit a través de una eficiencia espectral incrementada.

2.3. NEW RADIO (5G)

Históricamente, cada nueva generación de tecnología móvil inalámbrica se estandariza cada diez años. Lo que ha ocurrido con el 5G es que se esperaba que fuese con la llegada de una nueva generación la que diese el salto tecnológico que aumentara la capacidad y eficiencia espectral de las redes, pero esto mismo ya estaba pasando en 4G. Actualmente, el aumento de la capacidad no se ha traducido en un incremento de ingresos para las

operadoras, ya que los clientes esperan pagar lo mismo o menos para servicios y capacidades mejoradas.

Por otro lado, se espera que el 5G genere nuevos ingresos de nuevos clientes (nuevos usos del IoT a través de cosas como clientes), así como de sectores industriales. Al ser una tecnología más eficiente, aunque los márgenes de beneficio se mantengan, los ingresos aumentarán [4].

La estandarización del 5G se llevó a cabo antes de lo previsto. Los dos modos de despliegue del 5G que están llevándose a cabo son:

- NSA: 5G *non-standalone*, donde la red de telefonía 5G es soportada por la infraestructura red de 4G. La especificación de 5G *non-standalone* (NSA) se completó en 2017, seis meses antes de lo previsto debido a los intereses del mercado por su despliegue

- SA: Stand Alone. En este modo el 5G trabaja de manera independiente a la red LTE, con su propio equipamiento y *core* radio. Esta especificación se terminó en junio de 2018.

Esta nueva generación de comunicaciones móviles ha traído consigo nuevas opciones de manejo del espectro radio, MMIMO, agregación de portadoras y multiconectividad, una trama radio más flexible y una arquitectura distribuida más flexible, entre otros.

El 5G conseguirá tasas de descargas de datos de hasta 10Gbps. Esta nueva generación de dispositivos soportará el tráfico de muchos más dispositivos conectados de manera simultánea, así como de una disponibilidad del 99,999% y una menor latencia que las generaciones anteriores [5].

2.4. INCLINACIÓN DE LAS ANTENAS

Puede considerarse que uno de los primeros sistemas de optimización de una red radio es el ajuste de la inclinación de las antenas emisoras. Se considera "*downtilt*" al estado de inclinación de la antena hacia el suelo. Si la inclinación fuese hacia arriba se denominaría "*uptilt*". Mediante el tilt conseguimos enfocar la energía de la antena hacia la dirección deseada. Existen dos tipos de tilt, el mecánico y el eléctrico:

2.4.1. MECHANICAL DOWNTILT (MDT)

El *mechanical downtilt* o tilt mecánico es el proceso mediante el cual se ajusta una antena de forma mecánica. El *tilt* mecánico cambia el plano de radiación de las antenas, es decir, cambia el azimut vertical de los haces, por esta razón, cuando la antena es inclinada hacia abajo, se inclina el total del plano de radiación, apuntando hacia el suelo el lóbulo principal, y quedando elevado el lóbulo secundario. Podemos verlo gráficamente en la Ilustración 3.

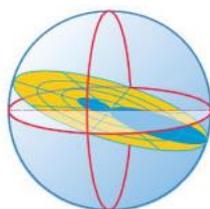


Ilustración 3: Diagrama de radiación de una antena con MDT [6].

2.4.2. REMOTE ELECTRICAL TILT (RET)

El *remote electrical tilt* o tilt eléctrico cambia el plano del diagrama de radiación que es modificado eléctricamente. De esta manera se consigue que el lóbulo secundario apunte también hacia abajo como vemos en la Ilustración 4. Mediante este tipo de tilt se consigue un gran control sobre el plano de radiación, ya que permite al operario realizar cambios precisos de forma remota.

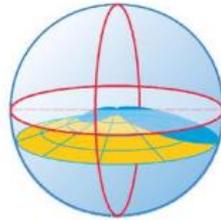


Ilustración 4: Diagrama de radiación de una antena con RET [6].

2.5. MIMO

MIMO [7] es el acrónimo de *Multiple Input – Multiple Output*, lo que significa que habrá más de una antena transmisora, y más de una antena receptora (podemos ver los diferentes tipos de modos de transmisión según el número de transmisores y receptores en la Ilustración 5). La transmisión multi-antena busca de manera simplificada dos posibles objetivos no simultáneos; mejorar la SINR de la conexión y compartir la SINR de la conexión. En general los sistemas MIMO se benefician de ganancia de diversidad frente a desvanecimientos *multicamino* o *fading* y en sus modelos 2x2 o 4x4 está presente en las tecnologías móviles desde hace años.

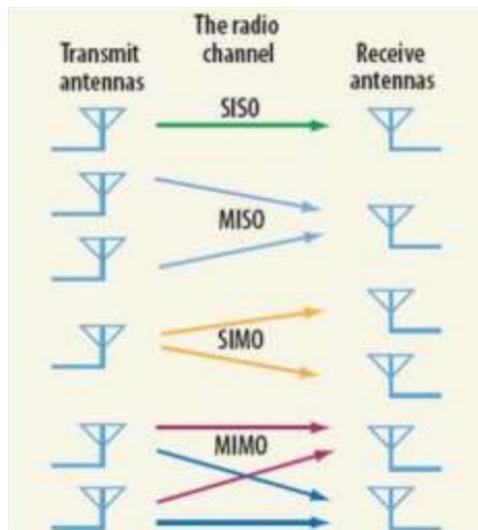


Ilustración 5: Nomenclatura de modos de transmisión de antenas según el número de transmisores y receptores [9].

Las técnicas MIMO son las especificadas a continuación.

- SU-MIMO (Single User MIMO): Técnica que intenta maximizar el número de *layers* que puede utilizar un terminal o grupo de terminales co-ubicados. Hoy en día se soporta un máximo de 4 *layers*, utilizando dos

apuntamientos distintos y las dos polarizaciones. Podemos ver en la Ilustración 6 como 4 layers diferentes con la misma información, irán a parar a un mismo terminal.

- **MU-MIMO (*Multi User MIMO*)**: Técnica que intenta maximizar el número total de *layers* que se están usando en la celda. Para ello utiliza diferentes apuntamientos, agrupando en cada uno terminales sin correlación espacial, para reusar los recursos radio. En esta ocasión, podemos ver en la Ilustración 6 parte derecha, como serán parejas de 2 *layers* las que irán a parar a cada terminal con información diferente.

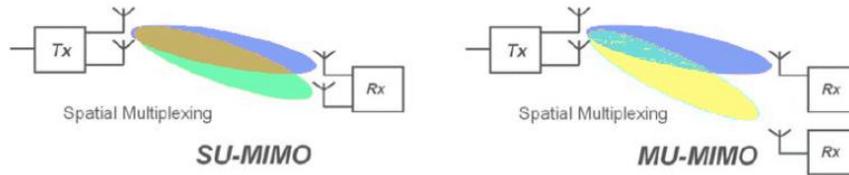


Ilustración 6: Layers de las antenas SU-MIMO y las de MU-MIMO [10].

Una distancia menor entre emplazamientos incrementará la densidad de la red mejorando la capacidad y el rendimiento. Un ISD (Inter Site Distance) mayor reduce la dispersión angular del usuario. También traerá aparejado una reducción de oportunidades para el uso de MU-MIMO y una menor ganancia.

Los lugares con edificios altos y rascacielos con muchos usuarios ampliamente distribuidos en el dominio vertical son adecuados para un despliegue MU-MIMO de orden superior. La ganancia total de la antena depende del número de elementos de antena.

2.5.1. BEAMFORMING

Se considera *beamforming* [12] a la capacidad de generar y dar forma a diversos haces mediante un conjunto de antenas manipulando la fase y la amplitud de la señal, de modo que el haz acabe apuntando a un área de servicio específica. El *beamformig* es posible con antenas activas y pasivas.

2.5.1.1. FORMA DE HAZ

Dividiendo la antena en *subarrays* y enviando la misma señal con las amplitudes y fases adecuadas a los diferentes *subarrays* es posible cambiar dinámicamente tanto la forma, la dirección del haz y la directividad. Será el nodo radio el que decidirá la dirección y forma del haz. En la Ilustración 7 podemos ver cómo, según el número de *arrays* y *subarrays*, conseguimos una mayor directividad y movimiento del haz.

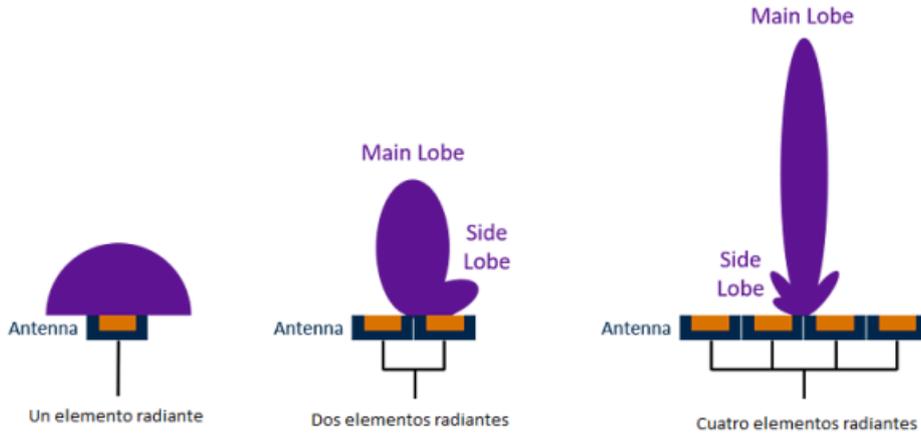


Ilustración 7: Representación de radiación según el número de elementos radiantes alimentados en fase [11].

Con una SINR alta, el nodo radio dividiría la potencia entre diferentes flujos de datos para explotar los beneficios del MIMO. Se envían múltiples flujos de datos a la antena, cada flujo de datos utiliza su propio canal y un conjunto de amplitudes y fases (haces), podemos verlo en la Ilustración 8.

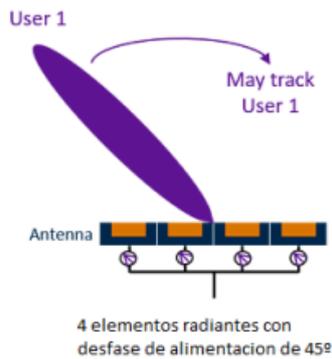


Ilustración 8: Representación de una antena con cuatro elementos radiantes con un desfase de alimentación de 45° [11].

Cuando esté activo el MIMO, la potencia de los haces decrecerá, ya que la potencia total de la celda se dividirá entre los diferentes haces activos.

Sin *beamforming*, la potencia se transmite en toda el área de cobertura de la celda, la señal de un usuario en la celda llega a todos los demás usuarios distribuidos en la misma. Con *beamforming*, la potencia es transmitida principalmente en la dirección del UE receptor, lo que hace que el entorno radio esté menos interferido y consiga *bitrates* más altos. Podemos ver un ejemplo en la Ilustración 9.

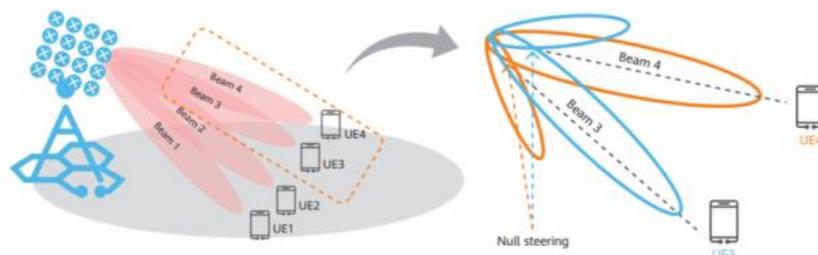


Ilustración 9: Funcionamiento de una antena *beamforming* dando servicio a varios usuarios [13].

2.5.1.2. MODOS DE BEAMFORMING

Existen dos tipos de haces; de tráfico broadcast y de tráfico de usuario. Los haces de broadcast serán los que envíen los canales comunes a todos los usuarios y siempre se estarán emitiendo. Por el contrario, los haces de tráfico serán los encargados de transmitir los datos de usuario a cada UE. Por lo general, serán haces más directivos, con ganancias más altas que dependerán del número de transmisores.

Los haces de broadcast serán los que definan la cobertura de la celda, por lo que no habrá tráfico de usuario fuera de la huella de cobertura de estos haces.

El *beamforming* analógico se utiliza principalmente para la radio de banda alta, denominada *mmWave*. Con la formación de haces analógica, la cuadrícula de haces es predefinida y estática, y en cualquier momento solo se puede usar un haz predefinido para la transmisión o recepción en todo el dominio de frecuencia, es decir, no hay multiplexación de frecuencia de haces de diferentes propiedades espaciales (diferentes direcciones).

2.5.2. ANTENAS MASSIVE MIMO

La introducción del 5G ha traído consigo el despliegue de las antenas *Massive MIMO*. Estas antenas son altas agrupaciones de *arrays* que pueden llegar a componerse de hasta cientos de antenas [14].

El principal beneficio que trae consigo este tipo de antenas es el aumento en capacidad de transmisión. A mayor número de *arrays* por antena, mayor será el número de haces que pueden generarse.

2.6. ÁREA DE COBERTURA DE UNA CÉLULA

Las redes celulares suelen plantearse teniendo disposición hexagonal teórica. En la práctica, la cobertura de una determinada celda variará en función del terreno, las construcciones que pudieran interferir, la ubicación de los transmisores, etc.

Otro factor que interviene de manera considerable en la huella de cobertura es la frecuencia utilizada. Las frecuencias más bajas tienen mejor penetración en obstáculos que las frecuencias más altas. Estas últimas se caracterizan por tener grandes pérdidas de transmisión.

2.7. POTENCIA DE LA SEÑAL Y NIVELES DE RUIDO

2.7.2. POTENCIA DE LA SEÑAL

Es la fuerza de la señal radio recibida por el terminal móvil en un punto concreto. Se mide en dBm ($0\text{dBm}=1\text{mW}$). La potencia de la señal está directamente relacionada con la calidad de la transmisión.

Las señales radio suelen tener una potencia de recepción comprendida entre los -60 y los -130 dBm. Cuanto menor es la señal radio, peor será la calidad de la transmisión.

2.7.3. NIVEL DE RUIDO

Esto indicará la cantidad de ruido o interferencia que hay en un punto específico. Este nivel de ruido se medirá en dBm. A menor ruido percibido, mejor será la transmisión.

Todos los dispositivos electrónicos generan un determinado ruido de fondo que estará presente mientras que este dispositivo esté en funcionamiento [15].

En ocasiones el nivel de ruido total es expresado como la Interferencia generada por fuentes externas, más el ruido procedente del entorno; I+N.

2.7.4. RELACIÓN SEÑAL A RUIDO (SNR: *SIGNAL TO NOISE RATIO*)

Se puede definir como la proporción comprendida entre la potencia de la señal y el nivel de ruido del entorno. Una mayor relación SNR [16] permitirá comunicaciones a mayor distancia y con mayor fiabilidad.

Si contamos con mucho ruido de fondo y nuestra potencia de señal no es muy buena debido a las interferencias generadas sobre esta, al aumentar la potencia de señal, también aumentará nuestra señal de ruido, manteniéndose estable la SNR y no mejorando la comunicación.

2.8. DESVANECIMIENTO DE LA SEÑAL

2.8.1. DESVANECIMIENTO POR SOMBRA RÁPIDO: MULTITRAYECTO

El multitrayecto o multicamino es un fenómeno producido en las comunicaciones inalámbricas, cuando una señal radio llega al receptor por dos caminos diferentes, en dos tiempos separados. Esto se produce cuando la onda transmitida sufre, entre otros, fenómenos de difracción o de reflexión contra obstáculos y objetos terrestres como edificios o montañas. Este tipo de desvanecimiento es considerado rápido, ya que varía muy rápidamente con la posición del móvil.

La propagación multicamino produce dos tipos de interferencia (como podemos ver en la Ilustración 10) constructiva y destructiva, que provoca desvanecimiento. El fenómeno de desvanecimiento puede provocar que la señal transmitida se vuelva débil en ciertos puntos, provocando así pérdida de la información enviada.

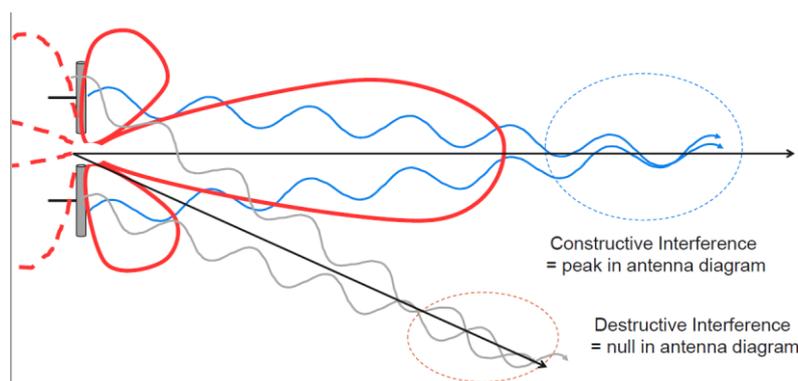


Ilustración 10: Interferencia constructiva e interferencia destructiva [17].

Para tratar de mitigar el multicamino se transmite un flujo de datos por diferentes antenas empleando técnicas de codificación de espaciado en el tiempo que permiten aprovechar el multitrayecto del canal para aumentar la robustez de la transmisión. No requieren un conocimiento previo del canal. Esta tecnología tiene especial importancia en el uso de repetidores.

2.8.2. DESVANECIMIENTO POR SOMBRA LENTO: SOMBRA

Este tipo de desvanecimiento es considerado lento, ya que variará despacio con la posición del móvil. Dependerá de los obstáculos que interfieran en la línea de vista, a la transmisión radio. Puede evitarse apuntando la antena a un lugar donde no haya obstáculos que interfieran en la línea de vista. Podemos ver un ejemplo de los distintos tipos de desvanecimiento en la Ilustración 11.

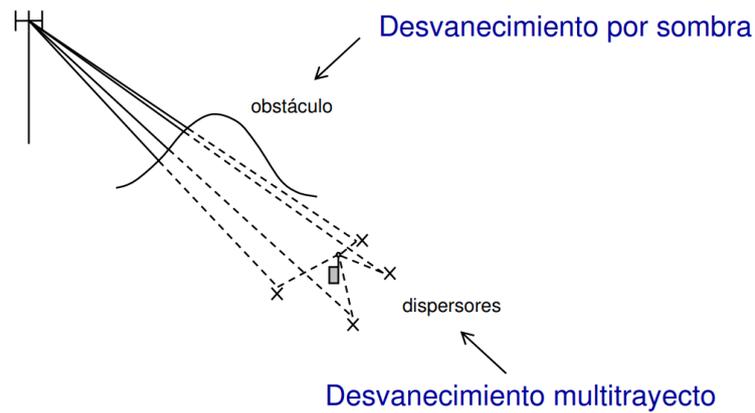


Ilustración 11: Tipos de desvanecimientos de la señal [18].

3. RESULTADOS

En esta parte del proyecto se van a mostrar los resultados conseguidos con las diferentes pruebas. Para conseguirlos se han llevado a cabo diferentes simulaciones en lugares con características diferentes: ciudad, costa y montaña.

3.1. CONFIGURACIÓN DE LAS MEDIDAS EN ATOLL

Los emplazamientos tendrán una altura por defecto calculada por la herramienta ATOLL que dependerá de la altura del suelo en la que se sitúan. Esta altura vendrá nominada como DTM (*Digital Terrain Model*). Puede verse en la Ilustración 12.

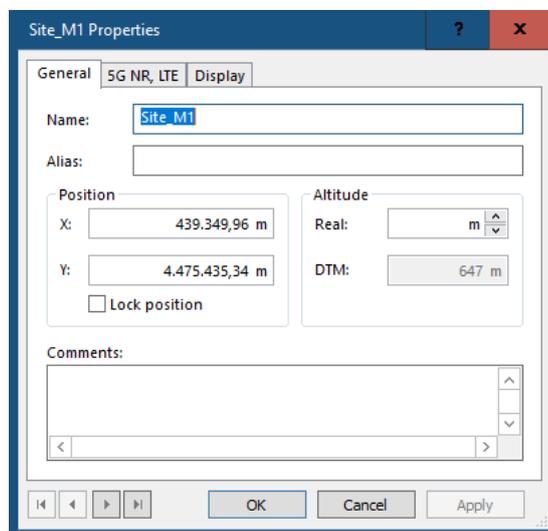


Ilustración 12: Propiedades de los emplazamientos.

Las propiedades elegidas para los transmisores serán de 4° de *downtilt* por defecto, que a partir de ahora tomaremos como referencia y nos referiremos a ellos como 0°. Los tilt de antenas que se hagan a partir de ahora se hará tomando esos 4° como 0°. Se puede ver esto y las propiedades de los transmisores y receptores en la Ilustración 13.

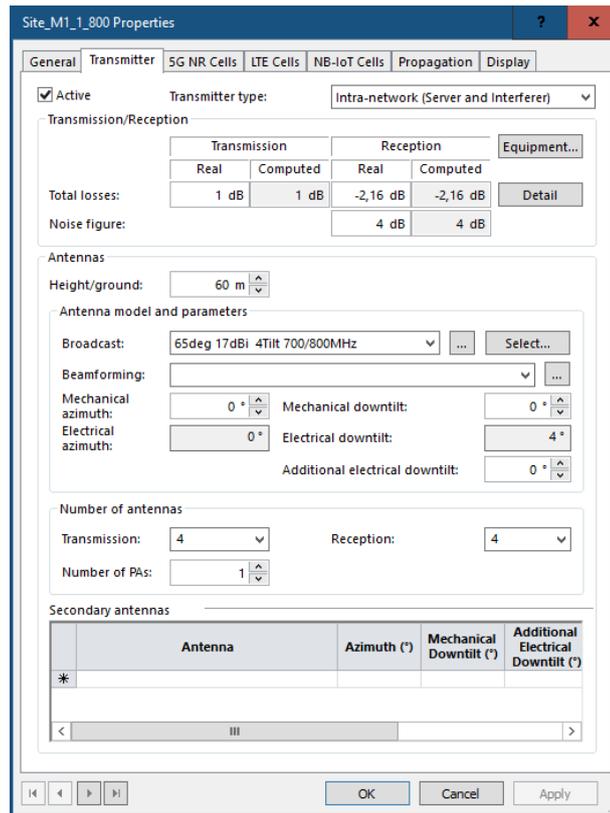


Ilustración 13: Propiedades de los transmisores utilizados.

Las antenas utilizadas para 4G, serán *arrays* de dipolos de 4x4, como puede verse en la parte de “Number of antennas” de la Ilustración 13. En el caso de 5G se utilizarán *arrays* de dipolos de 64x64. En ambos casos el máximo que establece el 3GPP.

Las antenas están formadas por tres sectores, cada uno de ellos creado con un color diferente; sector 1 en verde, sector 2 en amarillo y sector 3 en azul. Puede verse uno de estos emplazamientos en la Ilustración 14.



Ilustración 14: Ejemplo de emplazamiento. 3 sectores.

Se han realizado diferentes medidas donde la leyenda (Ilustración 15) será la mostrada a continuación:

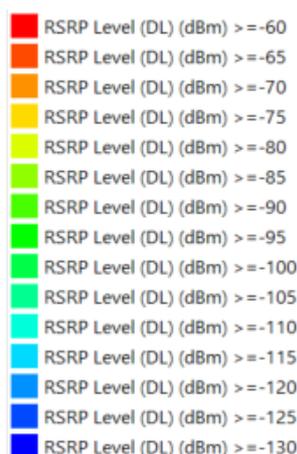


Ilustración 15: Leyenda de las potencias medidas en ATOLL.

Los colores más rojizos y amarillos pertenecen a los puntos con mayor nivel de señal. Será en estos lugares donde la cobertura móvil sea de mejor calidad. Los lugares situados al final de la leyenda en colores azules serán los puntos con ínfima calidad radio, donde las conexiones se realizarán con problemas.

3.1.1. MADRID

Para el escenario de ciudad se eligió Madrid, y se situó la antena de telefonía para que uno de sus sectores (sector 3) apuntase al parque Casa de Campo. Otro de los sectores (sector 2) apunta hacia un edificio de una altura mayor.

3.1.2. SANTA POLA

La antena radio está situada en una zona de costa, con barrios pequeños de casas bajas al lado de la playa. Al este de la antena se encontrará la parte del pueblo más comercial, con alguna edificación más alta.

3.1.3. SANTA CILIA DE PONZANO

En esta ocasión la antena está situada lejos del pueblo, en una zona alta para que la señal radio llegue al pueblo con línea de vista.

3.2. TILT

3.2.1. MDT

Para ver cómo afecta el tilt mecánico a la huella de cobertura móvil, se han realizado diferentes simulaciones sobre el escenario de la ciudad de Madrid.

Primeramente, se realizó la simulación de la banda LTE 800 MHz, puede verse el resultado en la Ilustración 16. Se ve como la parte marcada con un cuadrado blanco que se encuentra más a la izquierda, correspondiente con el parque Casa de Campo, es junto a las proximidades de la antena, las zonas con mejor señal radio (todas marcadas con cuadrados en blanco).

Por su parte, el sector 2 apunta directamente a un edificio de mayor altura, por lo que la señal no se propaga en esa dirección. Este es un claro ejemplo de desvanecimiento lento.

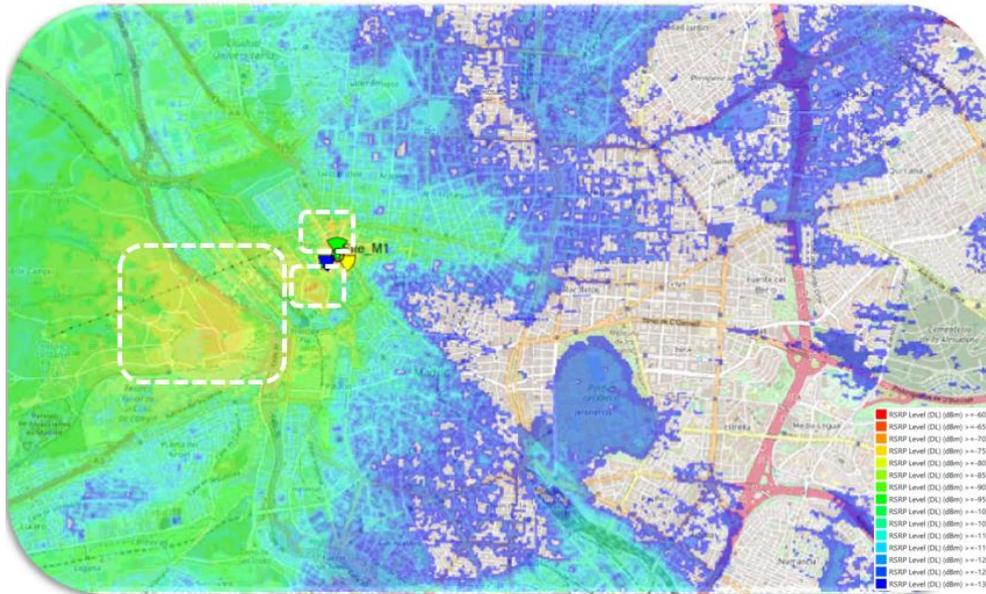


Ilustración 16: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. 0° de inclinación.

Tras realizar inclinaciones mecánicas de la antena se ven los resultados obtenidos en *tilts* de 4 y 10 grados, como podemos ver en la Ilustración 17. Podemos observar cómo las zonas amarillentas que aparecían en el parque a donde apunta el sector 3, van desapareciendo a medida que ponemos un tilt mayor. También podemos observar cómo las zonas de buena cobertura cerca de las antenas van cogiendo un color más rojizo, ya que en esta ocasión la antena está apuntando más directamente hacia el suelo. Por el contrario, las zonas verdes con cobertura considerable se van reduciendo y acercándose más a la antena.

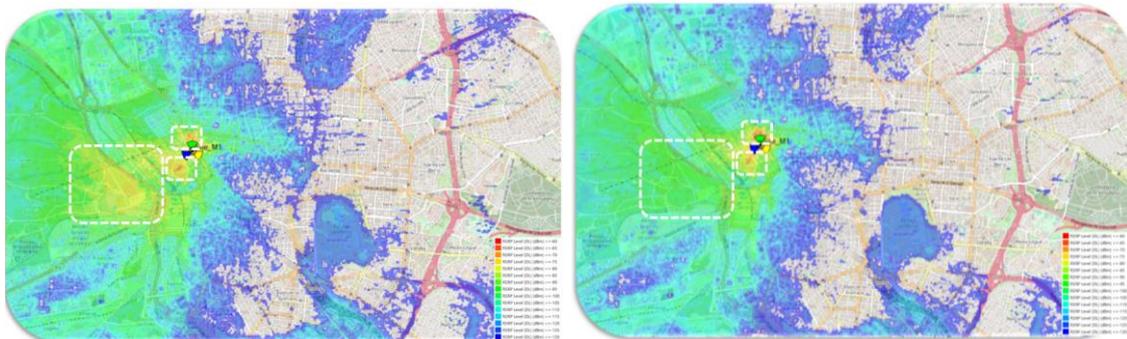


Ilustración 17: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Downtilt mecánico (MDT) de 4° (izquierda) y 10° (derecha).

Se han hecho medidas para *up tilt*, con 4 y 10 grados, podemos verlas en la Ilustración 18. Recordemos que el lóbulo secundario del diagrama de radiación de la antena será en el que en esta ocasión apunte hacia el suelo, siendo el lóbulo principal el que se encuentre apuntando al cielo. Comprobamos como estos resultados (ilustración 14) son peores que en los casos de *downtilt*. Las zonas rojizas son menores, y la cobertura en general se reduce y empeora.

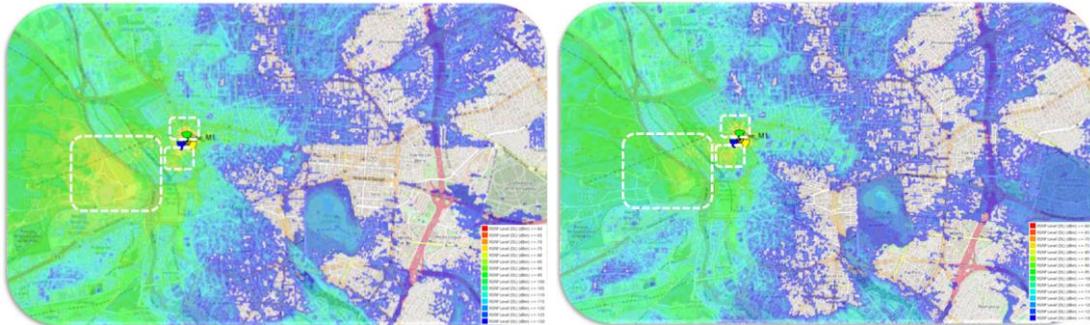


Ilustración 18: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Uptilt mecánico (MDT) de 4° (izquierda) y 10° (derecha).

3.2.2. RET

Como vimos con anterioridad, cuando la inclinación de la antena es mediante RET, se modifica el diagrama de radiación, y el lóbulo secundario pasará a apuntar en la misma dirección que el lóbulo principal.

En esta ocasión seguimos tomando como referencia la medida que se muestra en la Ilustración 16 para comprender los resultados del RET.

Vemos que en un caso extremo de *downtilt* eléctrico a 10° (Ilustración 19), como la huella de cobertura ha disminuido respecto a los 0°. Comparándolo con el caso homólogo de MDT, las huellas de cobertura son muy similares.

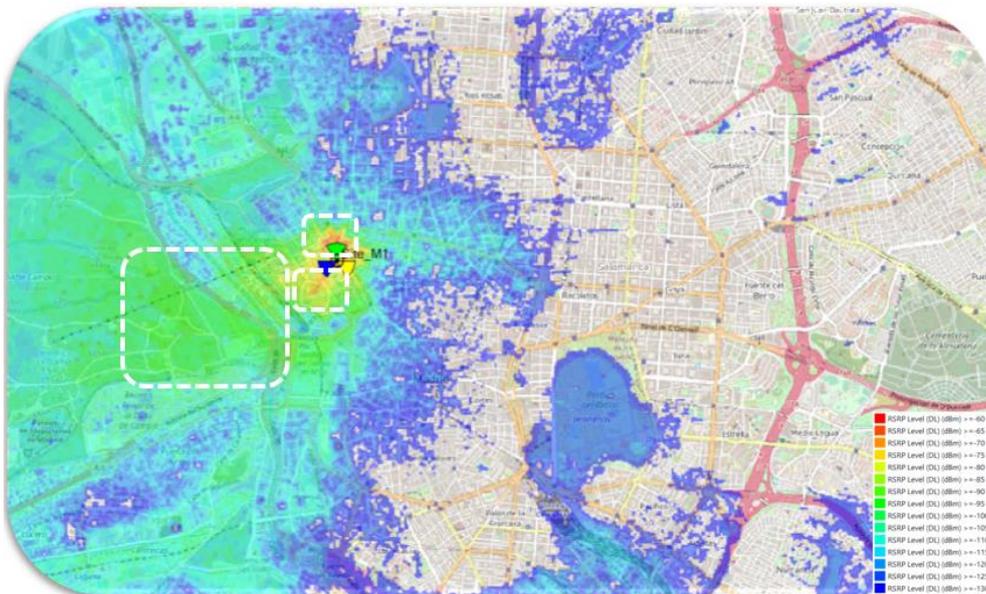


Ilustración 19: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Downtilt eléctrico (RET) de 10°.

En el caso del RET con un *uptilt* de 10° (Ilustración 20), al compararlo con el caso de MDT vemos que las huellas son muy parecidas, pero esta vez sí que podemos apreciar como en el caso de MDT las zonas verdes son más amplias, lo que se traduce en un mayor alcance. Esto sucede así por los lóbulos secundarios del caso de inclinación mecánica, ya que estos seguirán apuntando a la tierra, mientras en el caso del RET no será así. Hay que recordar que al tratarse de ondas radio siempre habrá reflexiones en todas las direcciones, por eso, aunque el completo del diagrama de radiación del caso de

RET negativo apunte al cielo, seguirá existiendo cobertura, aunque de peor calidad.

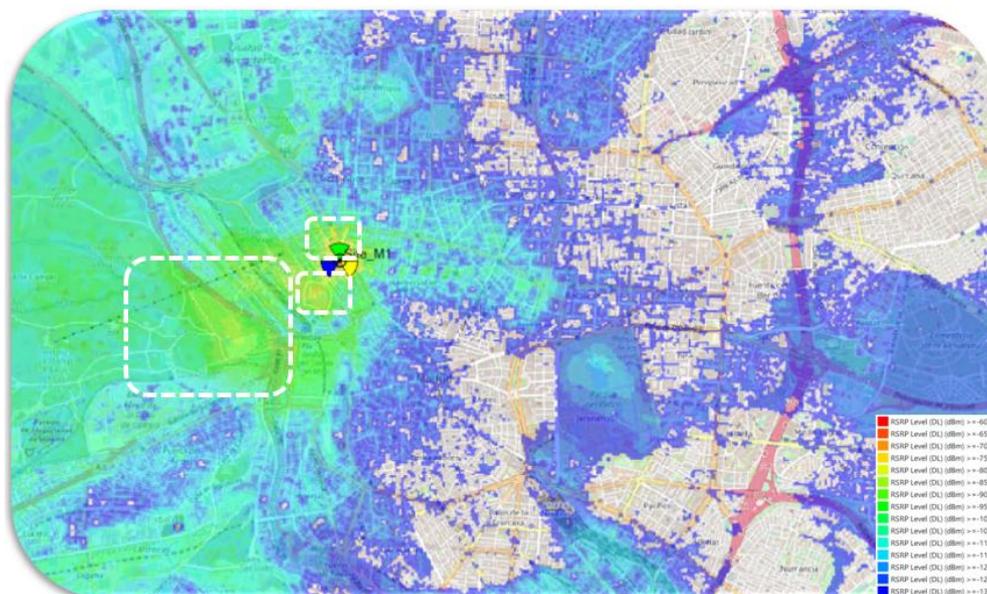


Ilustración 20: Madrid. Simulación de la banda LTE 800. Uplink eléctrico (RET) de 10°.

3.3. BANDA

En este apartado vamos a ver como las diferentes bandas influyen en la huella de cobertura, siendo las bandas más bajas la que tienen una penetración mayor, y por tanto consiguen una mayor huella de cobertura.

En la Ilustración 21 podemos ver el resultado de la simulación de cobertura de la banda de LTE de 2600 MHz en la ciudad de Madrid. La comparamos una vez más con la ilustración 12 donde se podía ver la huella de cobertura de la frecuencia LTE 800 MHz. Podemos comprobar como en esta ocasión, al tratarse de una frecuencia mucho mayor, las pérdidas también lo son, y por ello su alcance se reduce. Desaparecen las zonas rojizas y amarillas. Hay que recordar que las bandas altas tienen muy poca penetración, por lo cual tampoco atraviesan edificaciones, y se ven muy debilitadas con el multitrayecto.

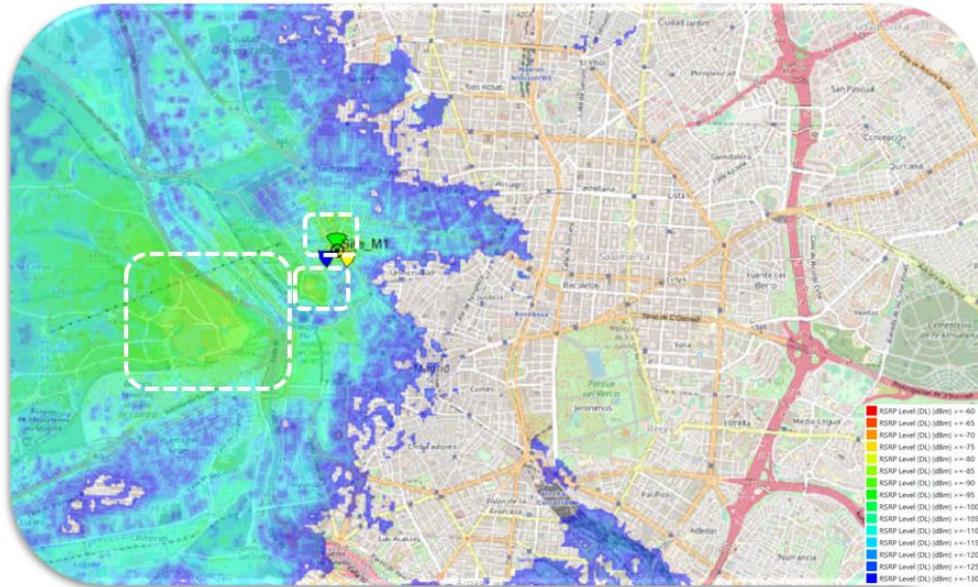


Ilustración 21: Madrid. Simulación de la banda LTE 2600. Tilt de referencia (0°).

3.4. TECNOLOGÍA

En esta ocasión hemos realizados pruebas en NR para ver cómo afecta a la huella de cobertura una tecnología superior a la de 4G. Hemos elegidos las frecuencias de 700 y 3500 MHz ya que actualmente son las utilizadas para el despliegue de 5G en España.

La tecnología 5G utiliza antenas de hasta 64 transmisores y 64 receptores para el envío y recepción de la información. Esto ligado al *beamforming* utilizado para su funcionamiento dan lugar a una mayor cobertura en igualdad de condiciones.

3.4.1. MADRID

2.5.1.3. BANDAS BAJAS

En esta ocasión realizamos las simulaciones en la ciudad de Madrid. Se ha simulado la banda de tecnología 5G en 700 MHz, que es una banda con unas condiciones muy parecidas a la banda de 800 debido a su proximidad, lo vemos en la Ilustración 22. Comparando una vez más los resultados con la Ilustración 16, vemos como la cobertura obtenida es muy parecida, aunque en ocasiones puede verse como las zonas rojas son ligeramente mayores en esta ocasión.

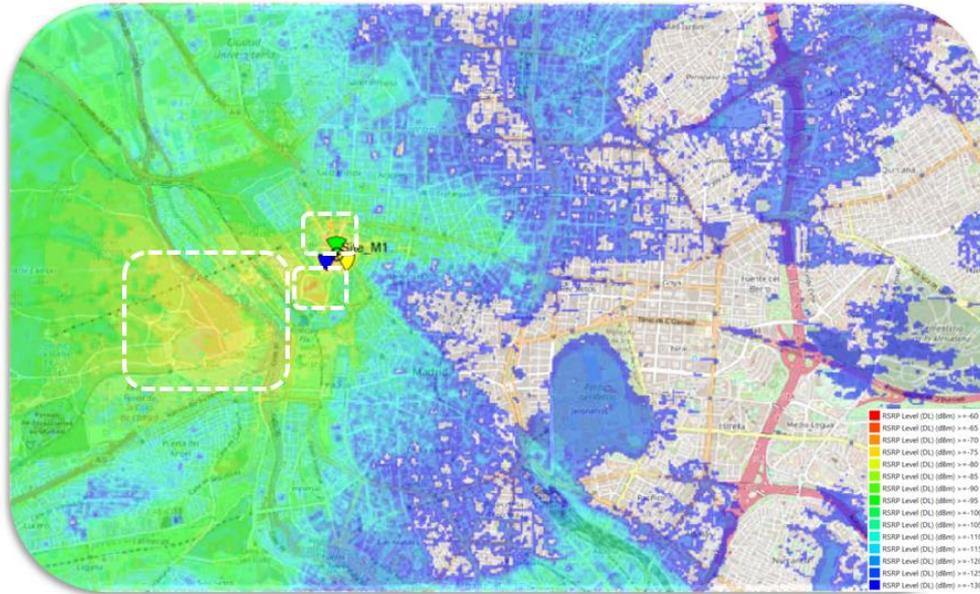


Ilustración 22: Madrid. Simulación de la banda NR 700. Tilt de referencia (0°).

2.5.1.4. BANDAS ALTAS

Las medidas obtenidas de la banda de 3500 MHz de 5G (Ilustración 23) las compararemos con la banda más cercana a esta en 4G, por ello haremos las comparativas con la ilustración 17 donde podemos ver los resultados de cobertura de LTE 2600.

Este caso es muy interesante, ya que vemos que las huellas de cobertura son muy parecidas, aunque la banda de 3500 es más alta que la de 2600 utilizada en 4G. Esto sucede por lo explicado con anterioridad. Al tratarse de una tecnología que utiliza muchos más transmisores que LTE, y además transmitir la información por medio de *beamforming* para conseguir directividades mayores, bandas más altas de 5G conseguirán los mismos resultados de cobertura que bandas menores en tecnologías 4G.

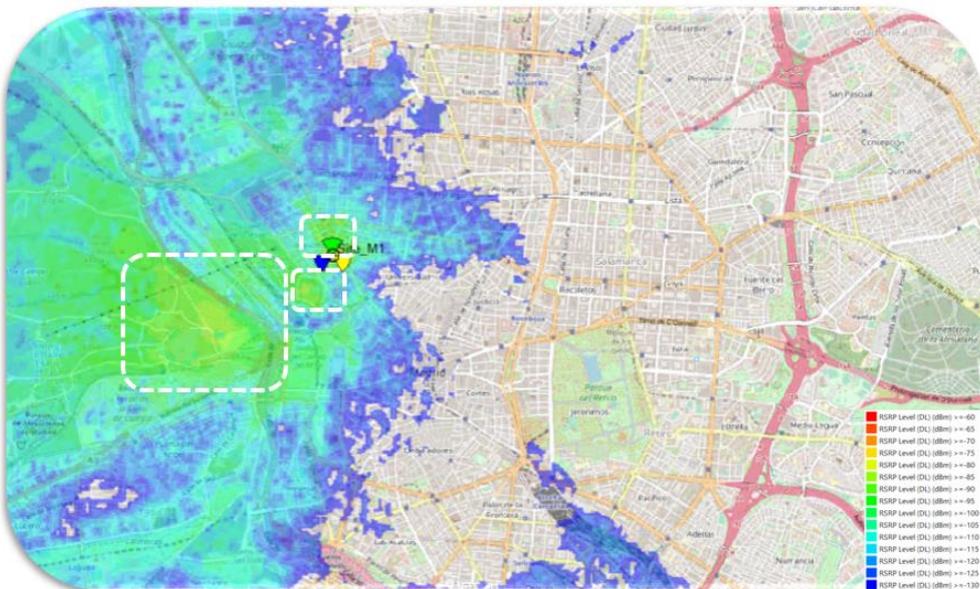


Ilustración 23: Madrid. Simulación de la banda NR 3500. Tilt de referencia (0°).

3.4.2. SANTA POLA

3.4.2.1. BANDAS BAJAS

En esta parte veremos lo que sucede en un lugar mucho más llano y con edificaciones más bajas o inexistentes (playa). Hemos escogido Santa Pola como lugar costero para las medidas.

En esta ocasión se mide la banda de LTE 800 y vemos en la Ilustración 24 como la cobertura roja-naranja llega más lejos que en los casos de la ciudad. Esto ocurre por la ausencia de obstáculos. De hecho, puede verse como los sectores 2 y 3 que son los que apuntan al mar llegan más lejos.

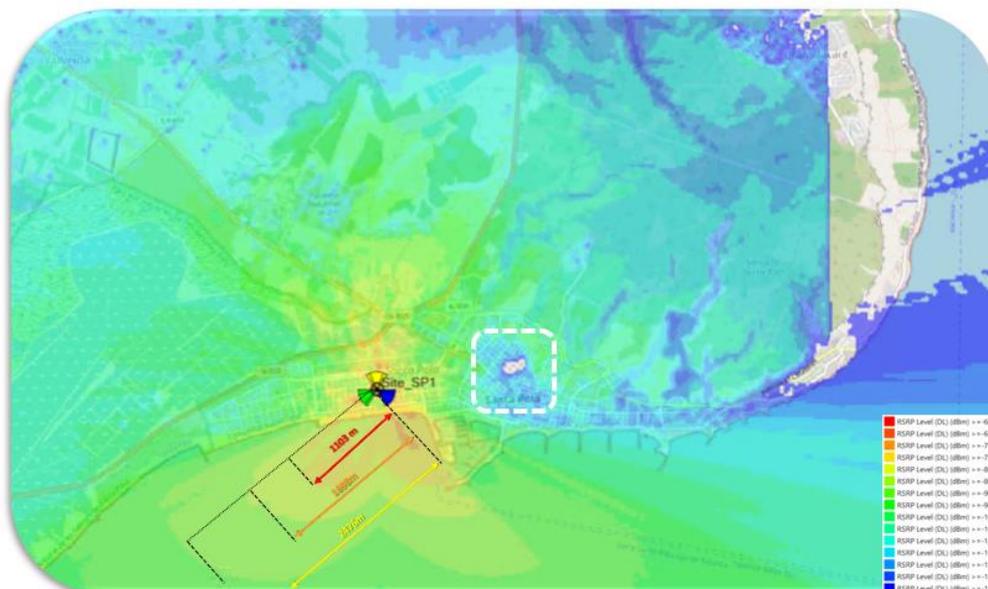


Ilustración 24: Santa Pola. Simulación de la banda LTE 800. Tilt de referencia (0°).

Se han medido las zonas con mayor potencia de señal en el sector 3 para poder hacer la comparativa posterior con la siguiente tecnología, para cerciorarnos de los resultados obtenidos en el caso anterior. A continuación, vemos en la Ilustración 25 la medida de cobertura para NR 700.

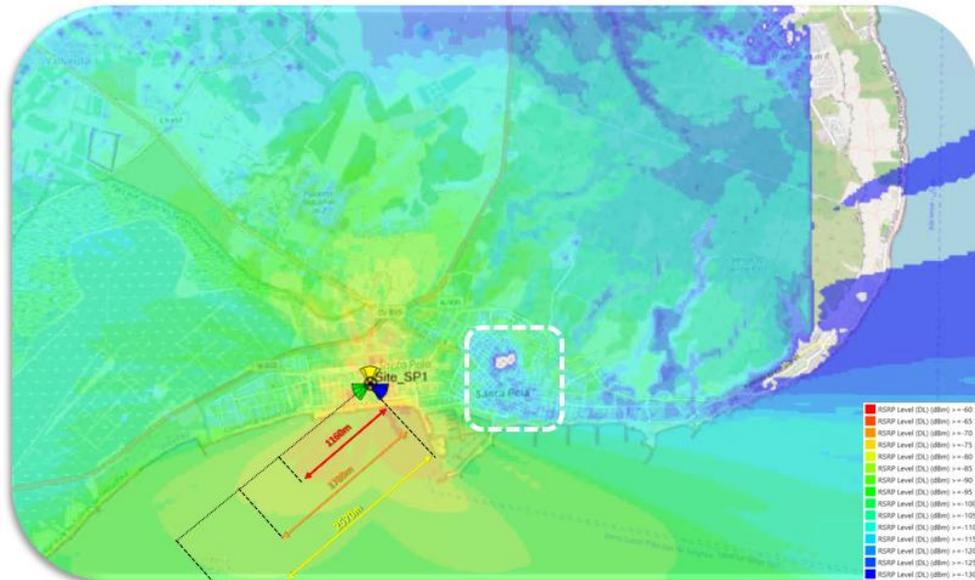


Ilustración 25: Santa Pola. Simulación de la banda NR 700. Tilt de referencia (0°).

Igual que en el caso de Madrid, la cobertura es muy parecida entre la banda de 800 de LTE y la de 700 de NR, aunque en esta ocasión esta última tiene de media 100m más de alcance en cada uno de los diferentes niveles de señal.

3.4.2.2. BANDAS ALTAS

Se repiten las simulaciones realizadas en el apartado anterior, pero esta vez con las bandas altas de ambas tecnologías; LTE 2600 y NR 3500. Podemos ver los resultados en la Ilustración 26.

En esta ocasión, al tratarse de bandas más altas que las anteriores, la atenuación es mucho mayor, por esa razón no llega tan lejos como las otras bandas.

También podemos ver como en la zona del pueblo, marcado en blanco, hay un hueco de cobertura mucho mayor que en los casos anteriores. Esto ocurre por la mala penetración de estas bandas en interiores. Se ve lo que ocurre en la siguiente ilustración, donde se muestra a la izquierda la simulación de LTE 2600, y a la derecha la de NR 3500.

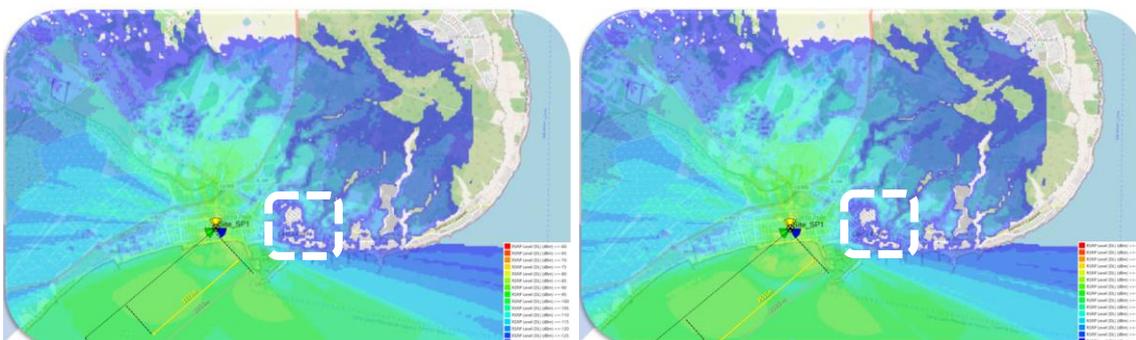


Ilustración 26: Santa Pola. Simulación de LTE 2600 (izquierda) y NR 3500 (derecha). Tilt de referencia (0°).

Al comparar las dos tecnologías comprobamos como el alcance de NR 3500 es unos 400 m mayor que el de la banda de LTE 2600 MHz. También

podemos ver como el hueco de cobertura marcado es menor en el caso de NR 3500.

3.4.3. SANTA CILIA DE PONZANO

Por último, vamos a ver qué ocurriría en un lugar montañoso, donde será la orografía la que influya en la cobertura radio.

3.4.3.1. BANDAS BAJAS

Se realizan simulaciones de la tecnología LTE en la banda de 800 y de NR en la banda de 700 MHz. Podemos observar los resultados en la Ilustración 27. Se ha señalado sobre el mapa en un recuadro blanco la posición del pueblo.

Observamos como las zonas amarillas y rojas están diseminadas y no siempre tan cerca de la antena como en ocasiones anteriores. Esto ocurre porque debido a la altura de las montañas, las zonas con mayor intensidad de señal serán los valles. La señal llega a estos lugares debido al multicamino.

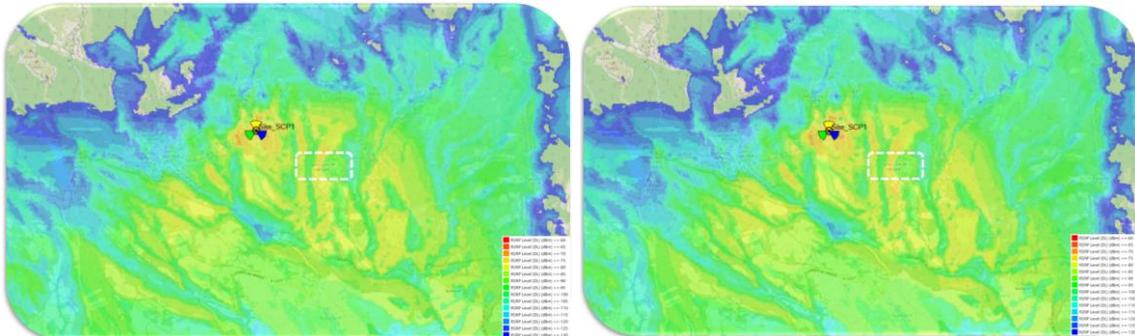


Ilustración 27: Santa Cilia de Ponzano. Simulación de LTE 800 (izquierda) y NR 700 (derecha). Tilt de referencia (0°).

3.4.3.2. BANDAS ALTAS

A continuación, vemos los resultados de las simulaciones de cobertura en las bandas altas de ambas tecnologías (Ilustración 28). En este tipo de orografías las bandas altas se verán muy afectadas por el multitrayecto.

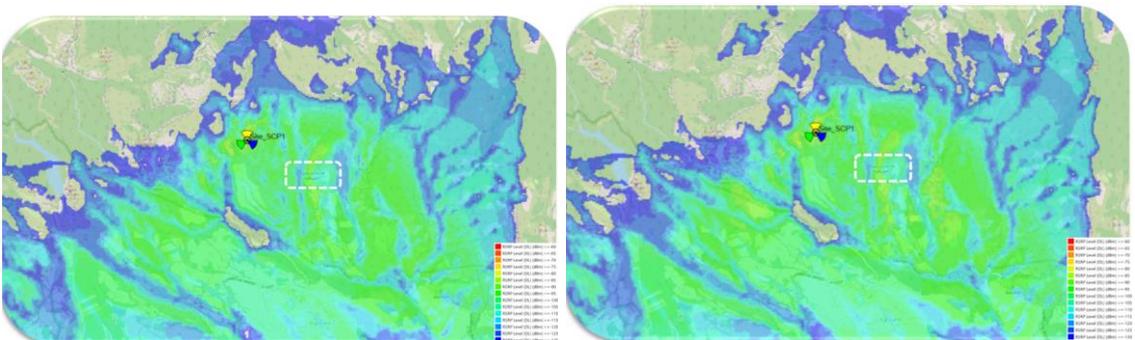


Ilustración 28: Santa Cilia de Ponzano. Simulación de LTE 2600 (izquierda) y NR 3500 (derecha). Tilt de referencia (0°).

3.5. POTENCIA DE LA SEÑAL

En este apartado vamos a ver como llegaría la potencia de señal de los diferentes sectores a puntos concretos en cada uno de los municipios seleccionados anteriormente. Analizaremos estos puntos viendo su orografía en detalle, y las edificaciones que hay sobre el terreno para entender los resultados.

Para cada uno de los tres lugares, hemos escogidos 6 puntos de medida, dos por sector; uno a 500 m del emplazamiento y otro a 2Km del mismo. En cada uno de estos puntos mostraremos los niveles de señal y los de interferencia asociados.

3.5.1. MADRID

El terreno de las áreas urbanas densas está repleto de edificios de diferentes alturas que dificultan la propagación. En ciudades puede verse que, debido al gran número de obstáculos, las ondas se propagarán por multicamino ya que es más complicado conseguir línea de vista.

3.5.1.1. SECTOR 1

3.5.1.1.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

Realizamos la primera medida a 500 m del emplazamiento (Ilustración 29). Será en la dirección de apuntamiento del sector 1 (zona marcada en amarillo), y el punto medido es el que se muestra con un círculo rojo. Vemos cómo, aunque la estación base está colocada más alta que los edificios a los que apunta no consiguen tener línea de vista en el punto concreto de medida, ya que hay edificios por medio (Ilustración 30).

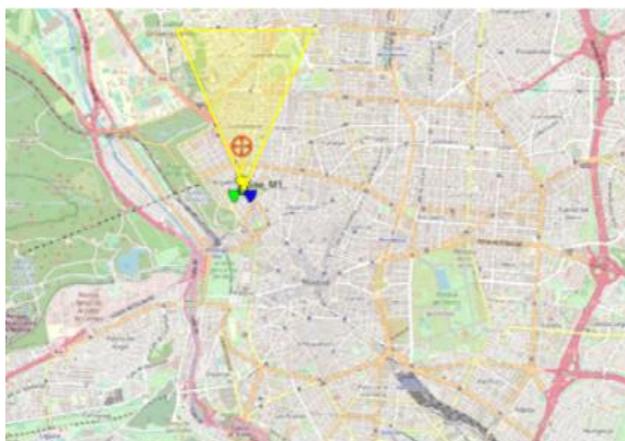


Ilustración 29: Madrid. Sector 1. Lugar del punto de medida a 500 m.

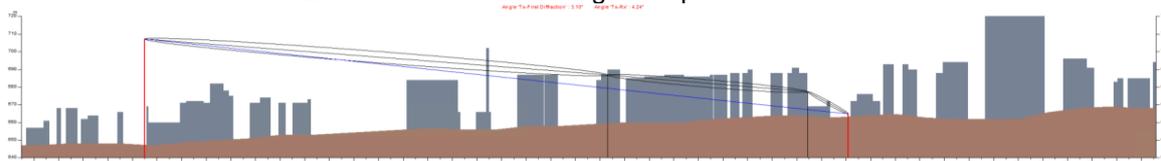


Ilustración 30: Madrid; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

En la Ilustración 31 podemos ver cómo llega la señal de los diferentes sectores a ese punto concreto. Observamos la señal de la celda más potente es la del sector 1, NR 700, tiene lógica porque es la banda más baja en la tecnología más moderna y directiva. A esta le sigue la misma banda del sector 2. Hay que recordar que, en las ciudades con muchos edificios y objetos reflectante, el multitrayecto estará muy presente, es por ello por lo que llegarán señales de otros sectores que no apuntan directamente al lugar concreto. La tercera señal más potente, casi al mismo nivel que la segunda, será la banda de LTE 800 del sector 1, también de las más bajas. La banda de 700 del sector 3 será la cuarta con más nivel. Seguidas estarán las bandas altas del sector 1; NR 3500 y LTE 2600. Como era de esperar, las bandas bajas de los sectores 2 y 3 serán las más débiles.

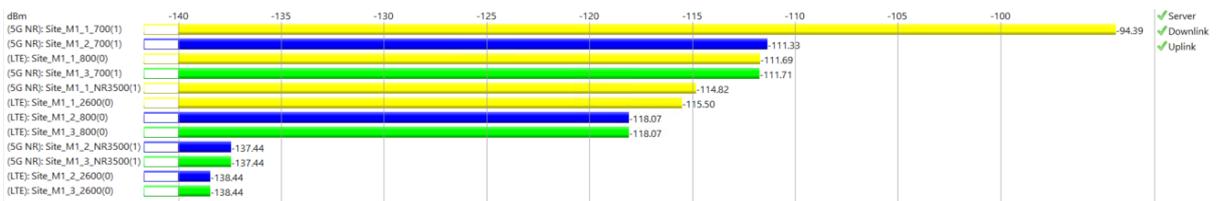


Ilustración 31: Madrid; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2000 m

En esta ocasión hemos alejado el punto de medida dos kilómetros de la estación base (Ilustración 32). Podemos observar como tampoco existe línea de vista por los edificios (Ilustración 33).

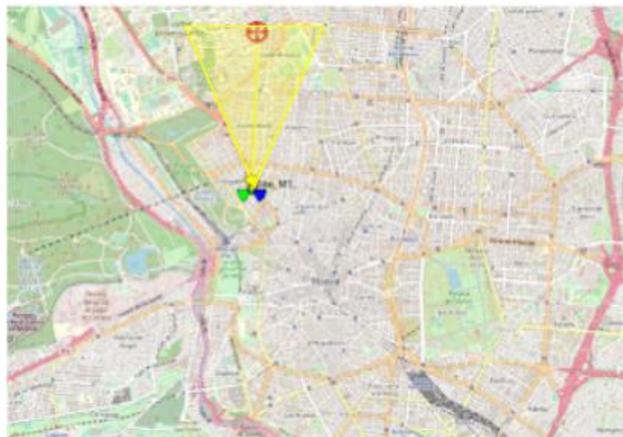


Ilustración 32: Madrid. Sector 1. Lugar del punto de medida a 2.000 m.

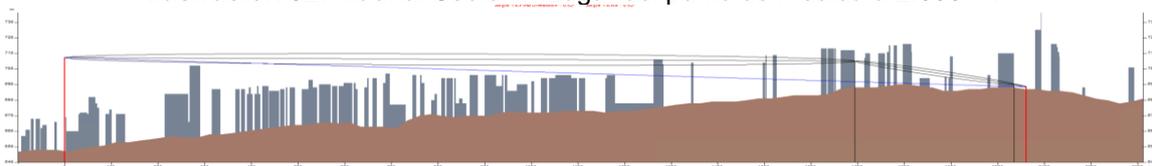


Ilustración 33: Madrid; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).

Al alejarnos de la antena vemos en la Ilustración 34 como las bandas altas son las que más potencia de señal han perdido.

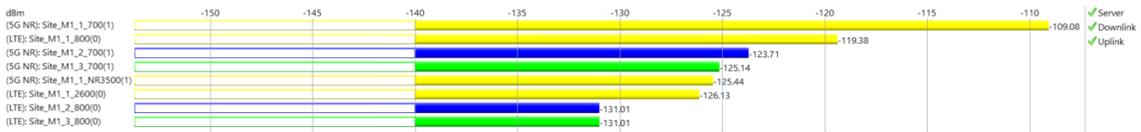


Ilustración 34: Madrid; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.1.1.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

En este apartado observamos los niveles de interferencia de la señal, identificados como I+N (en color negro), así como los niveles de señal que existirían si no tuviéramos estas interferencias. ATOLL hace la comparativa con la señal más potente de cada sector que llega al punto de medida, es por ello por lo que solo aparece la banda de NR 700 de cada uno de los sectores (como vimos en apartados anteriores son las que llegan con mayor intensidad de señal).

Se comprueba como tanto a 500 (Ilustración 35), como a 2.000 m (Ilustración 36) la señal interferente es menor, es por ello por lo que la relación señal a ruido será positiva, y las comunicaciones podrán realizarse con éxito.



Ilustración 35: Madrid; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

Como era de esperar, a mayor distancia de la antena, más crece el ruido de fondo del sistema, y menor será la potencia de señal que llega al punto (debido a las pérdidas de propagación), por lo que la SNR bajará.

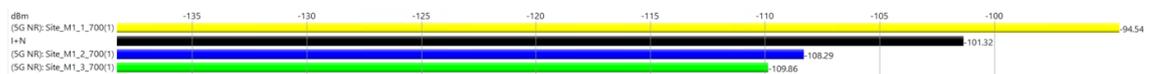


Ilustración 36: Madrid; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.1.1.2. SECTOR 2

3.5.1.1.2.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

En este caso el sector (Ilustración 37) está apuntando directamente a un edificio. Podemos ver en la Ilustración 38 como a escasos metros hay un edificio de una altura mayor que hace que se pierda inmediatamente la línea de vista. En apartados anteriores se vio como afectaba negativamente a la cobertura de la celda.

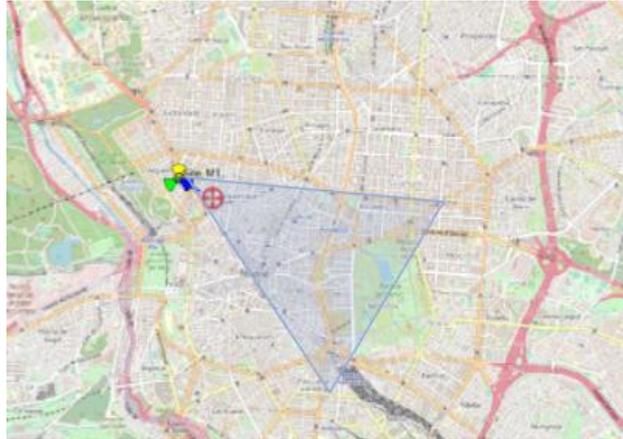


Ilustración 37: Madrid. Sector 2. Punto marcado a 500 m.

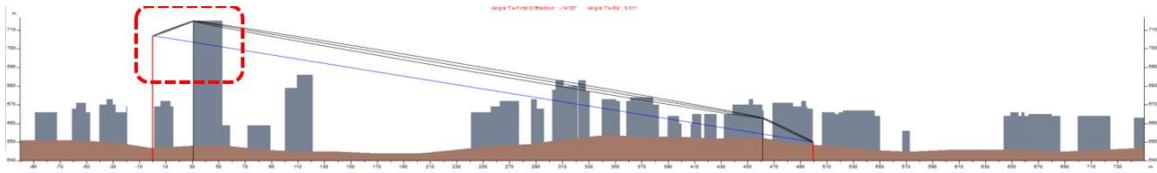


Ilustración 38: Madrid; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

En la Ilustración 39 vemos como incluso las bandas bajas tienen potencias muy pobres en la cercanía, ya que lo primero a lo que tienen que enfrentarse es a una serie de paredes, en las que se pierde potencia. En este caso no es posible asegurar la descarga de datos incluso en la cercanía ya que las señales más fuertes son de -123 dBm, señales muy débiles para asegurar una buena comunicación.

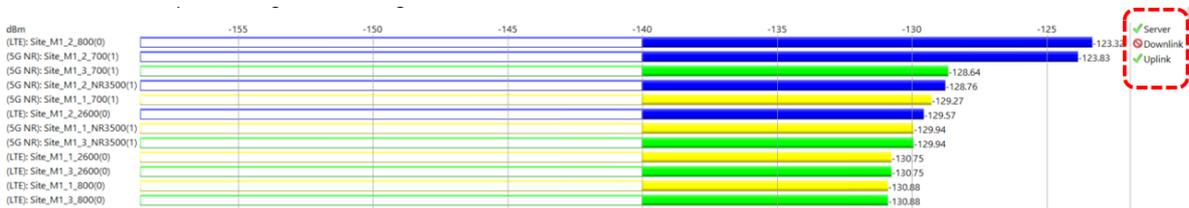


Ilustración 39: Madrid; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

A esta distancia las señales habrán empeorado, y la mayoría de ellas ya no llegarán. En la Ilustración 40 solo vemos las señales de bandas más bajas y con muy mala potencia.



Ilustración 40: Madrid; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.1.2.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

En esta ocasión, al tener un edificio muy cercano propiciado desvanecimiento por sombra, vemos como la señal interferente es muy cercana a la potencia de la señal.

Para entender mejor los resultados de la Ilustración 41, es necesario comentar que, aunque en este caso la potencia en dBm es menor que en el caso anterior (-102 dBm frente a -89 dBm), también lo es la señal de datos (-101 dBm frente a -75 dBm). Recordamos que en situaciones donde hay un suelo de ruido muy alto, al subir la potencia de emisión, también subirá el ruido recibido en el receptor.

Hay que fijarse en la comparativa entre la señal de datos y la interferencia que es la que nos dará los datos de la relación señal a ruido, que es la que nos interesa para saber cómo de buena será la comunicación.



Ilustración 41: Madrid; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

Como podemos ver en la Ilustración 42, a 2.000 m de la antena, la interferencia superará con creces a la potencia de la señal, por lo que las comunicaciones serán nefastas.



Ilustración 42: Madrid; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.1.3. SECTOR 3

3.5.1.3.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

Como se comprueba en la Ilustración 43 y la Ilustración 44, la zona de medida es mucho más baja que el lugar donde se encuentra la antena, ya que es un parque. Esto sumado a la altura del emplazamiento hace que consigamos casi por completo línea de vista.

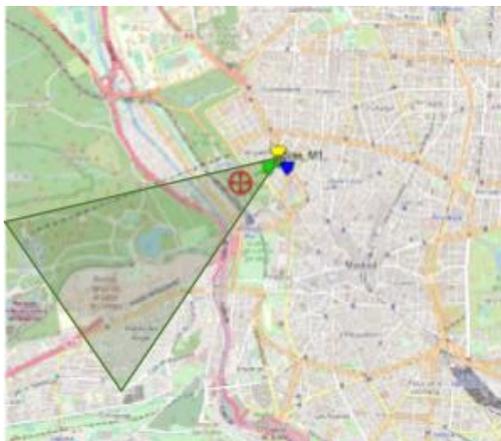


Ilustración 43: Madrid. Sector 3. Punto marcado a 500 m.

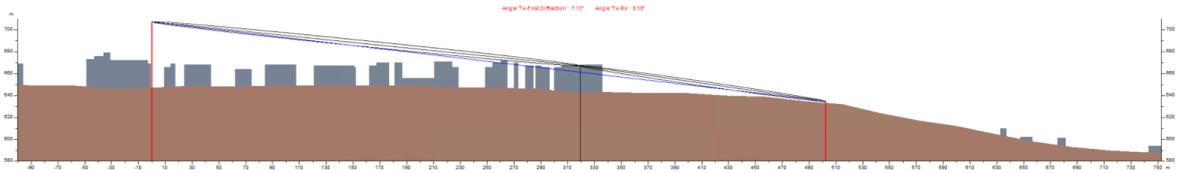


Ilustración 44: Madrid; Sector 3. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

Observamos en la Ilustración 45 que las señales llegan a este punto con una señal muy buena. La potencia de señal de este sector es mayor que la de los sectores anteriores porque está apuntando a un valle. Incluso las señales de las bandas altas de los sectores 1 y 2 llegan a este punto con un nivel aceptable.



Ilustración 45: Madrid; Sector 3. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

Al alejarnos hasta los dos kilómetros (Ilustración 46) conseguimos una línea de vista perfecta gracias a la orografía y a la ausencia de edificaciones (Ilustración 47).

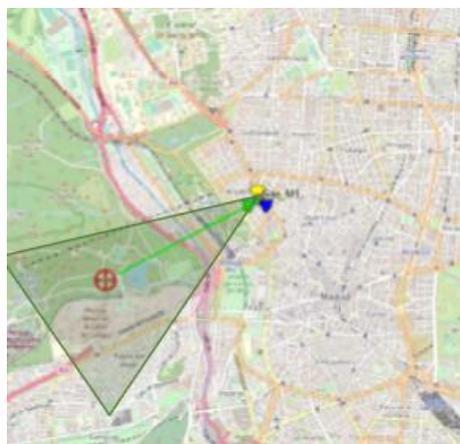


Ilustración 46: Madrid. Sector 3. Punto marcado a 2.000 m.

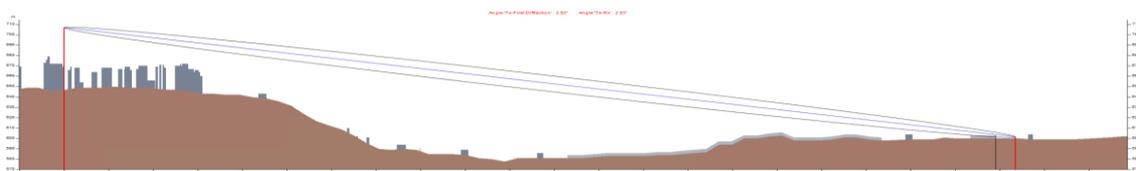


Ilustración 47: Madrid; Sector 3. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).

Vemos en la Ilustración 48, como las señales del sector 3 llegan aún con muy buena potencia, incluso las de las bandas más altas. También llegan con buen nivel de cobertura las bandas bajas de los otros dos sectores. Esto sucede por la ausencia de obstáculos que producen reflexiones y desvanecimientos de la señal.

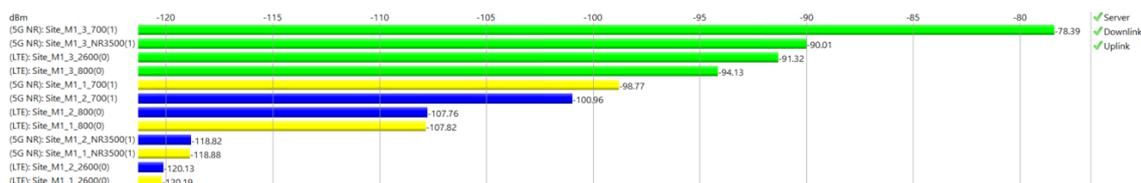


Ilustración 48: Madrid; Sector 3. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.1.3.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

En este caso los niveles de señal son muy buenos y la interferencia más el ruido se encuentran muy por debajo, en ambas situaciones (a 500 en la Ilustración 49 y 2.000 m en la Ilustración 50). Esto ocurrirá porque el lugar donde apunta la antena es mucho más bajo y sin obstáculos que puedan interferir a las comunicaciones.



Ilustración 49: Madrid; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

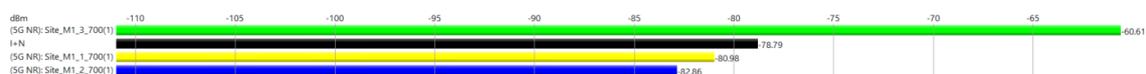


Ilustración 50: Madrid; Sector 3. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.2. SANTA POLA

3.5.2.1.1. MEDIDAS DE SEÑAL

Se trata de un pueblo costero con dos zonas diferenciadas; la zona de la playa, con casas bajas y la zona urbana, con edificios pequeños. La antena estará situada en la zona de la playa para ver los efectos que tiene la señal en zonas llanas con edificaciones bajas.

3.5.2.2. SECTOR 1

- 500 m

En este punto dentro del sector 1 que vemos en la Ilustración 51, casi existe por completo línea de vista (Ilustración 52). También comprobamos que este pueblo costero tiene pocas edificaciones, y las que hay son bajas, es por ello, que a 500 m nos encontramos pocos obstáculos.

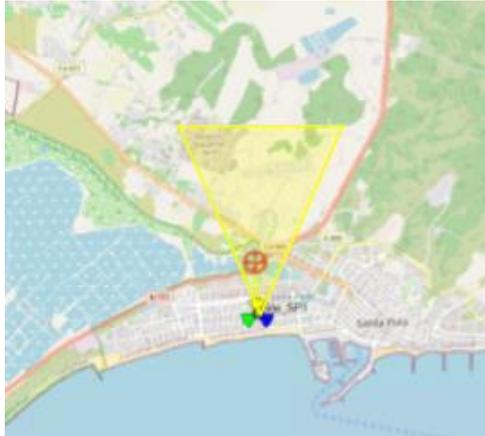


Ilustración 51: Santa Pola. Sector 1. Punto marcado a 500 m.

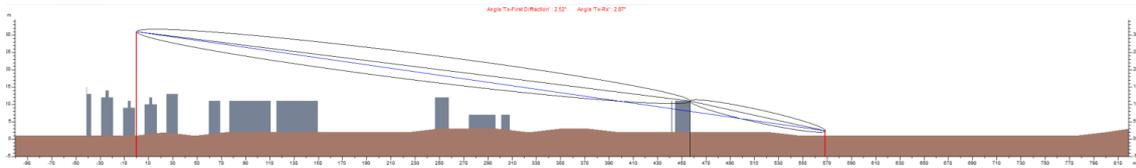


Ilustración 52: Santa Pola; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

En cuanto a la señal mostrada en la Ilustración 53, podemos percibir que las más potentes son las frecuencias bajas del sector 1, seguidas por las frecuencias altas del mismo sector, y por último las frecuencias bajas del resto de los sectores. Las señales del propio sector 1 son muy buenas en este punto. Las señales que llegan de otros sectores son aceptables.

Comparándolo con el caso de Madrid, las señales aquí se parecen a las del sector que apuntaba al parque.

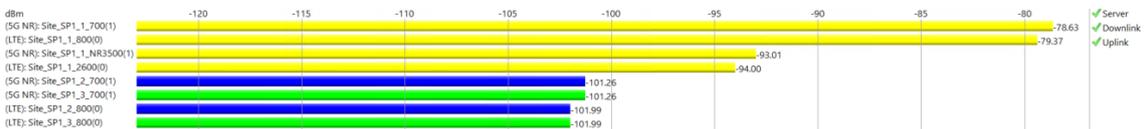


Ilustración 53: Santa Pola; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

A 2.000 m, en el punto mostrado en la Ilustración 54, encontramos un gran desnivel que puede verse en la Ilustración 55, la señal no llega a tener problemas por desvanecimientos importantes, pero no llega con línea de vista completa. Este sector es el que apunta al lado opuesto de la playa.

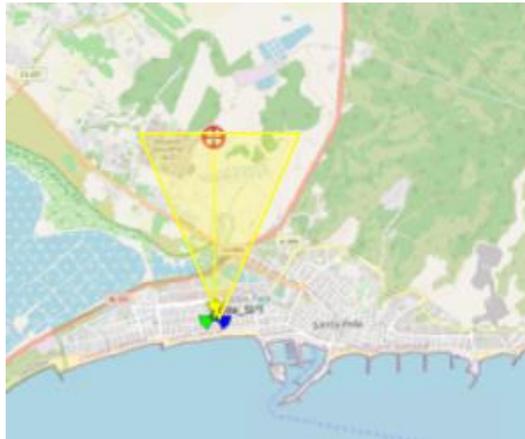


Ilustración 54: Santa Pola. Sector 1. Punto marcado a 2.000 m.

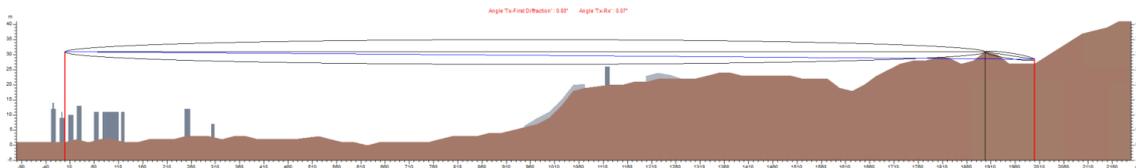


Ilustración 55: Santa Pola; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).

En cuanto a las señales, podemos ver en la Ilustración 56 que vuelve a ocurrir lo mismo que en el caso de 500 m de este mismo sector, las señales más potentes se agrupan de la misma manera.



Ilustración 56: Santa Pola; Sector1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.2.2.1. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

En esta ocasión distinguimos en la Ilustración 57, que, al no haber obstáculos cercanos a 500 m, el nivel de señal es muy bueno, y la interferencia asociada a la suma de señales, se queda muy por detrás de la señal principal, lo que significa que la transmisión de datos se produciría de manera exitosa.



Ilustración 57: Santa Pola; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

También ocurre esto para el caso a 2.000 m de la antena mostrado en la Ilustración 58. En esta ocasión simplemente se pierde intensidad de señal por la distancia.



Ilustración 58: Santa Pola; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.2.3. SECTOR 2

3.5.2.3.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

El sector dos apunta a la parte del pueblo de Santa Pola, podemos advertir en la Ilustración 60, como justo donde cae el punto que se muestra en la Ilustración 59, las edificaciones comienzan a ser mayores. En esta ocasión solo nos interferiría un pequeño edificio.

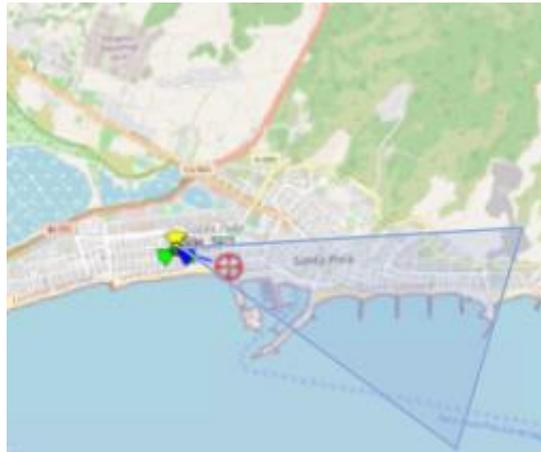


Ilustración 59: Santa Pola. Sector 2. Punto marcado a 500 m.

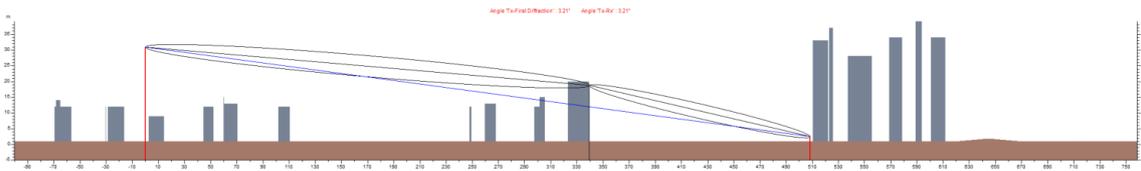


Ilustración 60: Santa Pola; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

En la Ilustración 61 se observa que las señales, como en la ocasión anterior, se agrupan de forma que las más potentes serán las del propio sector, bajas seguidas de altas, y después encontraremos las frecuencias bajas de los demás sectores. Comparándolo con el caso anterior, la potencia del sector 1 es un poco más pequeña a igual distancia debido a la presencia del edificio que genera un pequeño desvanecimiento de la señal, en torno a 10 dBm.

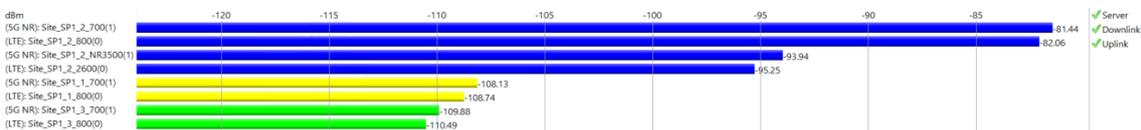


Ilustración 61: Santa Pola; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

En este caso, nos encontramos en un punto dentro de la zona urbana de Santa Pola, como podemos notar en la Ilustración 62. Distinguimos que tenemos edificios más altos que en el caso anterior a 500 m de la antena (Ilustración 63). Ahora no solo no tendremos línea de vista, sino que serán numerosos edificios los que interfieran con nuestra señal.

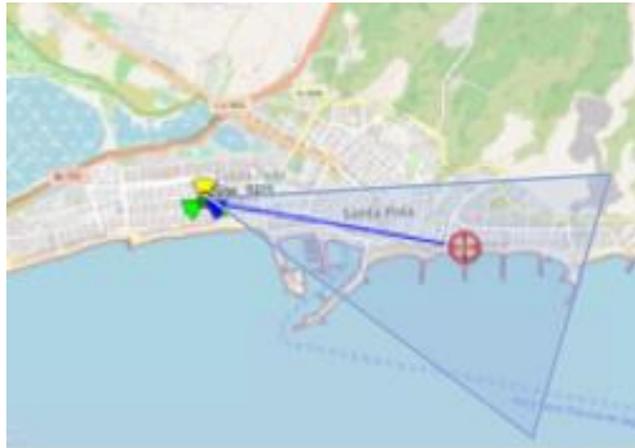


Ilustración 62: Santa Pola. Sector 2. Punto marcado a 2.000 m.

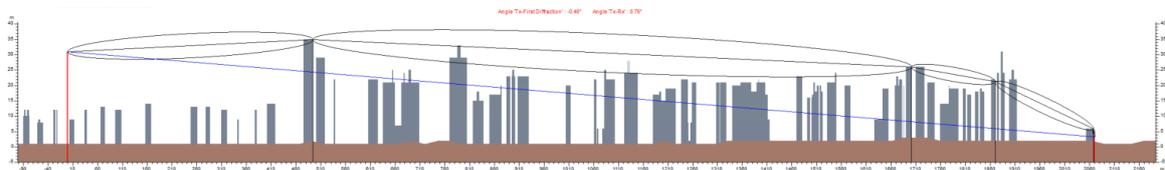


Ilustración 63: Santa Pola; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).

Observando los niveles de señal de la Ilustración 64, comprobamos que son un poco menores que en el caso del sector 1, pero no varían tanto, esto se debe a la presencia de multitrayecto que generará interferencias constructivas y destructivas. En el caso de la montaña anterior, no había lugares donde pudieran reflejarse las señales radio, pero en esta ocasión existen los edificios.



Ilustración 64: Santa Pola; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.2.3.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

En el punto marcado en la Ilustración 59, vemos como existe casi por completo línea de vista. Comprobamos en la Ilustración 65 que el nivel de interferencia se sitúa muy por debajo del de la señal más potente en dicho punto. Esto mismo ocurre para el punto situado a 2.000 m, como puede comprobarse en la Ilustración 66.

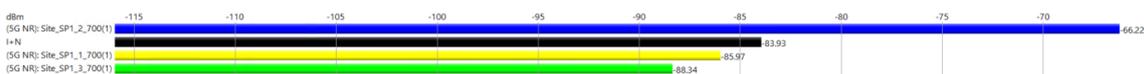


Ilustración 65: Santa Pola; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).



Ilustración 66: Santa Pola; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.2.4. SECTOR 3

3.5.2.4.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

El punto elegido del sector 3 a 500 m de la antena (Ilustración 67), es un caso muy parecido al del sector 1 de este mismo emplazamiento ya que la orografía es muy parecida (Ilustración 68). Como vemos en la Ilustración 69, nos encontraremos muy buenas señales de las celdas que apuntan a este lugar, y señales aceptables de bandas bajas de los otros sectores.



Ilustración 67: Santa Pola. Sector 3. Punto marcado a 500 m.

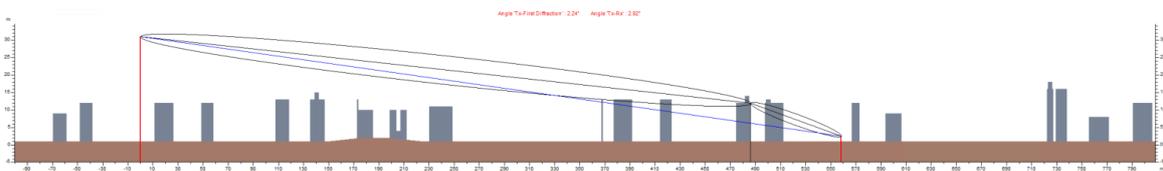


Ilustración 68: Santa Pola; Sector 3. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).



Ilustración 69: Santa Pola; Sector 3. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

Este caso también tiene resultados similares a los expuestos para el caso del sector 1, es por ello por lo que no aporta información relevante tratar este caso.

3.5.2.4.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

Vemos en las ilustraciones siguientes como las medidas de interferencia a 500 (Ilustración 70) y 2.000 m (Ilustración 71) se comportan de manera parecida a las señales vistas en el sector 1 de este mismo emplazamiento.



Ilustración 70: Santa Pola; Sector 3. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).



Ilustración 71: Santa Pola; Sector 3. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.3. SANTA CILIA

Se trata de un núcleo rural rodeado de montañas. El emplazamiento se encuentra alejado en torno a 500 m de este, ya que el pueblo se encuentra situado en un valle, y no tendría sentido colocar ahí la estación, por el contrario, la colocamos en un lugar alto para que pueda dar cobertura a más lugares como pueblos, o carreteras.

3.5.3.1. SECTOR 1

3.5.3.1.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

Las señales que llegan al punto objetivo que vemos en la Ilustración 72, no son muy buenas debido a que este lugar, aunque existe línea de vista, se encuentra por encima de la antena, y esta tiene una inclinación preconfigurada de 4° *downtilt*. Podemos verlo en la Ilustración 73.

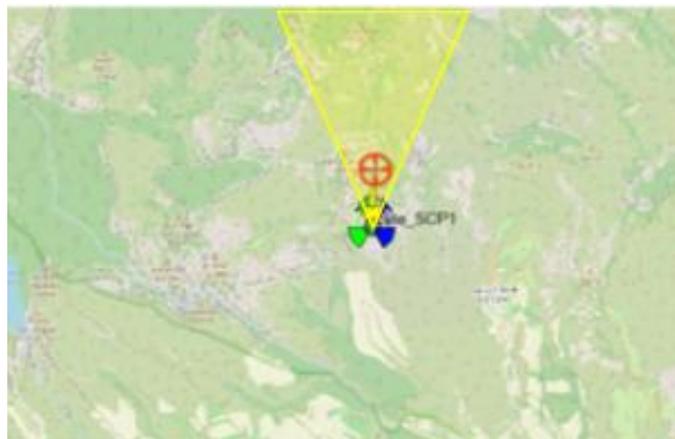


Ilustración 72: Santa Cilia de Ponzano. Sector 1. Punto marcado a 500 m.

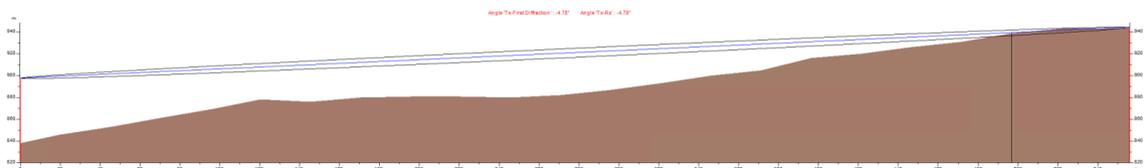


Ilustración 73: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

Son todas las bandas bajas las que llegan con mejor señal a este punto, ya que las bandas más altas perderán la energía en cada reflexión (Ilustración 74). Recordemos que al estar en un entorno montañoso e irregular encontraremos un montón de obstáculos con los que nuestra señal perderá energía en la reflexión.



Ilustración 74: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

Esta ocasión será igual que la anterior, pero de manera acentuada. Nuestro punto se encuentra más alejado como vemos en la Ilustración 75 y alto (Ilustración 76).



Ilustración 75: Santa Cilia de Ponzano. Sector 1. Punto marcado a 2.000 m.

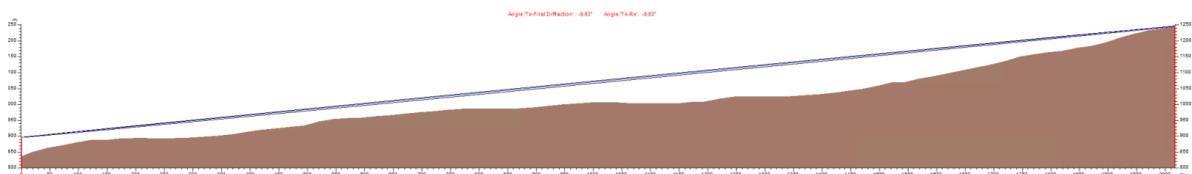


Ilustración 76: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).

Es por esto por lo que nuestra señal se comportará como en el caso anterior, donde la distancia eran 500 m, pero lógicamente, la potencia de la señal recibida será menor (Ilustración 77).

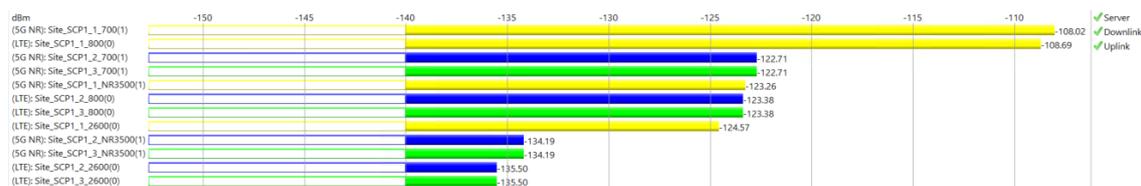


Ilustración 77: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.3.1.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

Podemos percibir en la Ilustración 78, como a 500 m, la señal de interferencia es ligeramente menor que la señal útil. Esto ocurre porque, aunque no haya desvanecimiento por sombra, la antena tiene un *downtilt* de 4° por defecto, lo que significa que estará apuntando al suelo. Al encontrarse el punto por encima del nivel de la antena la señal no será óptima. Como hemos visto ya, la señal llegará porque se propaga 360°, aunque su directividad esté enfocada en un ángulo específico.



Ilustración 78: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

En la Ilustración 79 también podemos ver lo que comentamos anteriormente, pero con niveles de señal en torno a 10 dBm menores, por la mayor lejanía del punto de medida.



Ilustración 79: Santa Cilia de Ponzano; Sector 1. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (2.000 m).

3.5.3.2. SECTOR 2

3.5.3.2.1. MEDIDAS DE SEÑAL

- 500 m

Este sector es el que está apuntando al pueblo. Nuestro punto objetivo se encuentra sobre Santa Cilia de Ponzano como podemos advertir en la Ilustración 80. En la Ilustración 81 podemos ver que existe línea de vista, y que nuestra antena está más elevada que el punto donde se encuentra nuestro pueblo objetivo.



Ilustración 80: Santa Cilia de Ponzano. Sector 2. Punto marcado a 500 m.

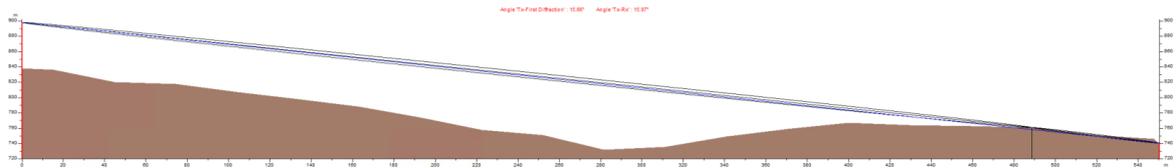


Ilustración 81: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (500 m).

En las señales procedentes de estas medidas (Ilustración 82), observamos que llegan al valle donde se encuentra el pueblo y son muy buenas, especialmente las de las bandas bajas. Si revisamos en detalle, una vez más, serán el NR 700 y el LTE 800 las dos bandas que lleguen con mejor calidad, en torno a -75 dBm, seguidas por las mismas bandas de los sectores 3 y 1 respectivamente, con unas potencias de en torno a -92 dBm. Estas potencias serán bastante buenas para la comunicación radio.

Las bandas altas del sector 2 llegarán con potencias entrono a -95dBm, lo que se considera una potencia aceptable, y las bandas de los otros sectores llegarán, aunque con una señal más débil, pero que aún podría ser válida para una comunicación no muy pesada (por ejemplo, envío de mensajes de texto).



Ilustración 82: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (500 m).

- 2.000 m

Este punto más alejado, marcado en la Ilustración 83, sigue situándose en un valle con línea de vista, como podemos comprobar en la Ilustración 84.



Ilustración 83: Santa Cilia de Ponzano. Sector 2. Punto marcado a 2.000 m.

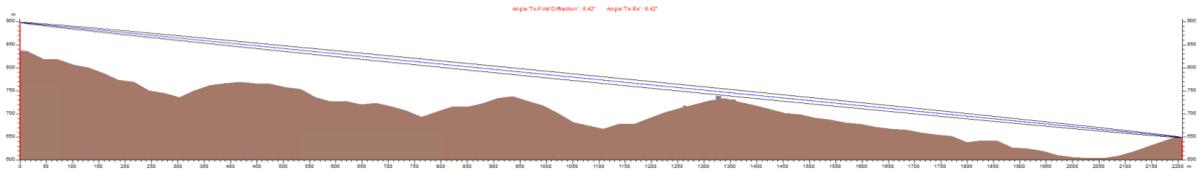


Ilustración 84: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Terreno y edificaciones desde el emplazamiento al punto medido (2.000 m).

En la Ilustración 85 se ve como todas las frecuencias del sector 2 llegan con buena señal. Nos fijamos especialmente en las bandas bajas, ya que estas no han perdido potencia, aunque nos hemos alejado del punto. Esto se debe a que llegan directamente sin ningún tipo de reflexión ni objeto que produzca un desvanecimiento. De los sectores 1 y 3 podemos observar que llegan las bandas más bajas con una señal aceptable, en torno a los -98 dBm.



Ilustración 85: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de potencia de las diferentes señales que llegan al punto de medida (2.000 m).

3.5.3.2.2. MEDIDAS DE INTERFERENCIA

Observamos por la Ilustración 86 que los niveles de interferencia están muy por debajo de los niveles de señal a 500 m. Esto ocurre por no haber desvanecimientos por sombra, ya que no hay ningún objeto que interfiera en la línea de vista.

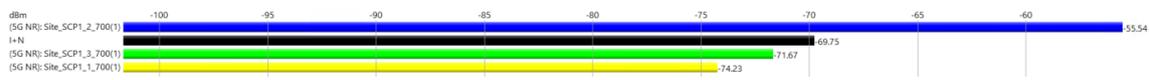


Ilustración 86: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

Cuando nos encontramos a 2000 m de la señal ocurre lo mismo que a 500 m, ya que los niveles de señal seguirán siendo mucho mayores que los de interferencia, por lo que la señal se propagará exitosamente.



Ilustración 87: Santa Cilia de Ponzano; Sector 2. Niveles de interferencia generada por las señales más potentes de cada sector, medida en el punto de referencia (500 m).

3.5.3.3. SECTOR 3

Este caso es muy parecido al caso anterior, por lo que se obtienen resultados homólogos y su análisis no aporta información adicional.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras recopilar información de diferente índole sobre estudios de cobertura realizados con medidas de simulación en la herramienta ATOLL en función de varios parámetros que afectan a la red radio, y tras el análisis en profundidad de los resultados obtenidos, se ha llegado a las argumentaciones expuestas a continuación.

4.1. CONCLUSIONES

En el estudio se ha verificado a través de simulaciones en ATOLL cómo afectan determinadas variables a la huella de cobertura de una antena.

Por un lado, se ha simulado el comportamiento de diferentes tipos de tilt. Aunque en teoría el MDT parece una forma menos precisa que el RET de realizar *downtilt*, se ha demostrado que el diagrama de radiación trasero se queda inclinado hacia arriba, según los resultados de los estudios. Se puede concluir en que la diferencia en cobertura entre simulaciones de RET y MDT son ínfimas. Antes del estudio se podría pensar que, debido a la forma de realizar el tilt, el RET cubriría de mejor manera la huella de cobertura, pero se ha visto que esto no es así ya que los resultados obtenidos en ambas medidas son muy parecidos.

También se ha considerado la implantación que tiene la banda de frecuencia en la huella de una antena. En la práctica, se utilizan las bandas altas para complementar en la capacidad a las bandas más bajas por sus propiedades de propagación. Suelen utilizarse en grandes ciudades y lugares con poblaciones densas, o sitios donde hay aglomeraciones de gente (estadios, aeropuertos, centros comerciales, etc.). Gracias a los resultados obtenidos, se ha podido comprobar que las bandas bajas tienen mayor huella de cobertura que las bandas altas debido a que la atenuación aumenta de manera directamente proporcional a la frecuencia, con lo que la penetración en edificios también es mucho más alta en las bandas bajas.

La tecnología radio empleada es un punto básico para considerar en el estudio de la cobertura, con lo que ha sido objeto de diferentes simulaciones. La tecnología 4G lleva utilizándose una década para comunicaciones móviles mientras que la nueva tecnología 5G está comenzando a desplegarse a nivel mundial. Como era de esperar, se ha demostrado que el rendimiento de las bandas, tanto bajas como altas, en 5G, es mayor que el conseguido en 4G. Esto ocurre porque la nueva tecnología 5G trae consigo una mejor eficiencia espectral, con lo que optimiza mejor el espectro y su uso. Un punto interesante que se ha aprendido es la gran mejora que se consigue con respecto a 4G. Se ha visto que las bandas de 5G más altas medidas en este trabajo (3500 MHz) obtenemos coberturas similares a la banda alta de 4G (2600 MHz) de la cual se tienen medidas, aun siendo esta última considerablemente más baja. Esto se consigue debido a las nuevas antenas utilizadas en New Radio, ya que en este trabajo se componen de *arrays* de 64x64 dipolos, lo que hace que pueda conformarse un haz con una ganancia y directividad mucho mayor y por tanto una mejor cobertura radio.

Otro factor necesario para tener en cuenta son los tipos de desvanecimiento de la señal. A lo largo del estudio se han simulado distintas condiciones para ver cómo afectan a la cobertura radio en diferentes entornos. Se ha comprobado que existen dos tipos de desvanecimientos que pueden afectar a la señal transmitida: por sombra y multitrayecto. Los primeros afectarán negativamente a la señal, y los segundos pueden ser constructivos o destructivos. Los constructivos ayudarán a que la señal llegue más lejos, aunque en cada reflexión se perderá potencia, y los destructivos perjudicarán a la potencia de la señal. Hemos comprobado como el desvanecimiento por sombra está muy presente en las ciudades donde los edificios son obstáculos directos, pero en estos entornos el multitrayecto ayudará a las señales a cubrir más huella de cobertura. Se ha evidenciado que ambos desvanecimientos afectarán de forma más nociva a las frecuencias altas, ya que tienen mayores pérdidas. Se ha podido comprobar como en sitios de costa donde los edificios son bajos y el terreno es llano, la señal llegará con buena intensidad hasta lugares mucho más lejanos que en la ciudad. También se ha probado como en zonas montañosas, de no existir ningún obstáculo que interfiera la comunicación, y con el mismo apuntamiento o grado de inclinación, las señales llegarán con buena potencia a puntos que se encuentren por debajo de la altura de la antena.

La orografía es un factor clave en el alcance de la cobertura. Se ha decidido evaluar las interferencias que llegan a dos distancias representativas de medida, 500 y 2.000 m. Se ha podido comprobar que, en todos los casos, a mayor distancia existe una menor potencia de señal, y por tanto una interferencia asociada menor. Se ha confirmado que las interferencias más altas se encontrarán en puntos donde el nivel de señal no llegue de forma adecuada.

4.2. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA PLANIFICACIÓN Y LOS IMPACTOS PREVISTOS E IMPREVISTOS

A lo largo de este trabajo se ha conseguido cubrir exitosamente todos los puntos previstos, y con ello entender de forma más extensa el funcionamiento de las señales radio y su interacción con diferentes entornos.

Se ha ido siguiendo estrictamente la planificación que se estructuró al principio del proyecto, combinando cada parte con la redacción de resultados en la memoria, aunque esto último no se contemplaba hasta la actividad E, en la semana 11 de proyecto (Ilustración 2). Gracias a ello, se ha conseguido alcanzar con éxito el final de la actividad de “Redacción de la memoria” marcada en un principio con 3 semanas de duración y parte de la ruta crítica. Esta actividad se hubiera alargado más en el tiempo de no haber sido por el trabajo previo de escritura.

4.3. LÍNEAS FUTURAS

Para este punto quedaría pendiente los estudios de huella de cobertura para la tecnología 6G, la cual ya es objeto de estudio e investigación en algunas universidades, y empieza a ser mencionada en *white papers* científicos. Se sabe que tendrá *bitrates* mucho mayores que en 5G, tendrá antenas adaptadas a superficies y orientadas a su despliegue en interiores. También será una tecnología enfocada a los sentidos, por lo que además de la vista, se desarrollarán instrumentos de IoT que permitirán interactuar con el gusto y el olfato.

Se tiene previsto que esta tecnología aparezca en la *Release 22* del 3GPP que se prevé para finales de 2027 o principios de 2028. Hasta ese momento, todo lo comentado no serán más que suposiciones y no se podrán realizar pruebas precisas para medir su posible cobertura, ya que no se sabrán sus especificaciones teóricas definitivas.

5. GLOSARIO

Término	Definición
2G	<i>Second Generation</i> . Segunda generación de comunicaciones móviles.
2x2	2 antenas transmisoras por 2 antenas receptoras.
3G	<i>Third Generation</i> . Tercera generación de comunicaciones móviles.
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i> . Organismo de estandarización de comunicaciones móviles.
4G	<i>Forth Generation</i> . Cuarta generación de comunicaciones móviles.
4x4	4 antenas transmisoras por 4 antenas receptoras.
5G	<i>Fifth Generation</i> . Quinta generación de comunicaciones móviles.
64x64	64 antenas transmisoras por 64 antenas receptoras.
Array	Agrupaciones de antenas, dipolos en comunicaciones móviles.
<i>Beamforming</i>	Capacidad de generar y dar forma a diversos haces mediante un conjunto de antenas
<i>Bitrate</i>	Tasa de transferencia de datos.
<i>core radio</i>	Núcleo de la red radio encargado de realizar gestión de datos.
dBm	Decibelios milivatio. Relación de potencia expresada en decibelios.
Downtilt	Estado de inclinación de la antena hacia el suelo.
DTM	<i>Digital Terrain Model</i> . Entrada de datos para estudios de propagación radio sobre el terreno.
Fading	Desvanecimiento. Atenuación de la señal radio.
Gbps	Giga bits por segundo. Unidad de transmisión de datos.
I+N	<i>Interferencia + Noise</i> . Interferencia más ruido asociados a una señal o señales determinadas.
IoT	<i>Internet of Things</i> . Interconexión de objetos o "cosas" a través de internet.
ISD	<i>Inter Site Distance</i> . Distancia entre emplazamientos
<i>Layer</i>	Flujo de datos.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> . Nombre técnico del 4G.
Mbps	Mega bits por segundo. Unidad de transmisión de datos.
MDT	<i>Mechanical Downtilt</i> . Tilt realizado de manera mecánica.
MHz	Megahercio. Unidad de medida de la frecuencia.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> .
MMIMO	<i>Massive MIMO</i> . Tecnología sucesora del MIMO que multiplica el número de antenas emisoras.
mmWave	<i>Milimetric Wave</i> . Ondas milimétricas.
Multicamino	Fenómeno radio que se manifiesta cuando dos señales transmitidas por emisores diferentes, llegan a una sola antena por caminos diferentes.
Multitrayecto	Multicamino.
MU-MIMO	<i>Multi User MIMO</i>

NR	<i>New Radio</i> . Nombre técnico del 5G.
NSA	<i>Non-StandAlone</i> . Red de telefonía 5G es soportada por la infraestructura red de 4G.
RET	<i>Remote Downtilt</i> . Tilt realizado de forma remota.
SA	<i>Stand Alone</i> . 5G puro, sin interconexión al 4G.
Sector	Lugar lógico hacia el que apunta una antena, parte de un emplazamiento radio determinado.
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> . Relación Señal a Ruido. Comparativa entra la señal útil y la interferencia más el ruido.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> . Relación Señal a Ruido. Comparativa entra la señal útil y el ruido.
Subarray	<i>Parte de</i> una agrupación de antenas.
SU-MIMO	Single User MIMO.
<i>Tilt</i>	Inclinación de una antena.
<i>Uptilt</i>	Estado de inclinación de la antena hacia el cielo.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. FORSK. 22/12/2022. <https://www.forsk.com/>
2. 3GPP. Release 10. 23/11/2022. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-10>
3. Artículo de la página web tecnológica Xataka. 10/01/2023 <https://www.xatakamovil.com/conectividad/categorias-lte-o-4g-que-son-y-que-velocidades-maximas-ofrece-cada-una-de-ellas>
4. Artículo publicado por Keith Mallinson para el 3GPP. "A personal view". 29/12/2022. <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/5g-wiseharbour>
5. 3GPP. Release 18. 23/11/2022. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-18>
6. Artículo publicado por Saba F. Ahmed "Comparison between electrical and mechanical antenna tilt angle in Sulaymaniya mobile phone base stations". 12/12/2022. <https://www.iasj.net/iasj/download/94472c44440941b4>
7. Artículo de la web Xataka. Massive MIMO: las dos palabras claves para entender qué va a ser el 5G. 10/12/2022. <https://www.xataka.com/moviles/massive-mimo-dos-palabras-clave-para-entender-que-va-a-ser-5g>
8. 3GPP. Release 13. 25/11/2022. <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/rel13>
9. Modos de transmisión de antenas. 29/12/2022. <https://www.glosarioit.com/MIMO>
10. Artículo "Massive MIMO and Beamforming". 12/01/2023. <https://info-nrlte.com/2020/07/15/massive-mimo-and-beamforming/>
11. Trabajo de la universidad de Zaragoza. Conformado de haz matemático de diagramas de radiación de antenas 5G. <https://zaquan.unizar.es/record/101359/files/TAZ-TFG-2021-012.pdf>
12. ETSI TR 138 912 V14.0.0. "5G; Study on New Radio (NR) access technology. 14/12/2022. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138912/14.00.00_60/tr_138912v140000p.pdf
13. Huawei. Artículo "5G Antenna's Features". 28/12/2022. <https://forum.huawei.com/enterprise/en/5g-antenna-s-features/thread/846039-100305>

14. Artículo de Jon Mundy y Sacha Kavanagh. 12/01/2023.
<https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>
15. Artículo en “Electronic cooling”. 12/12/2022. <https://www.electronics-cooling.com/2001/11/noise-emission-of-telecommunication-devices/>
16. Apuntes de la licenciatura en informática con énfasis en redes y telecomunicaciones de la Universidad Tecnológica de Oteima. 5/12/2022.
<https://recursoinformatico.weebly.com/uploads/1/0/7/3/107381475/snr.pdf>
17. Ericsson. “Beamforming – How does it work”. 12/12/2022.
https://www.emf.ethz.ch/fileadmin/redaktion/public/downloads/3_angebot_veranstaltungen/AA_Henschke.pdf
18. Universidad Politécnica de Madrid. Apuntes del departamento SSR, asignatura de Comunicaciones móviles, capítulo 3. 05/12/2022
http://ocw.upm.es/pluginfile.php/1140/mod_label/intro/capitulo-3.-propagacion-en-comunicaciones-moviles-1.pdf