



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA RED LTE CON LA HERRAMIENTA ATOLL

**Proyecto de fin de carrera**

presentado ante la

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación  
de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya**

para la obtención del grado de

**INGENIERO SUPERIOR DE TELECOMUNICACIÓN**

**Realizado por:  
Tutora:**

**Luis Iglesias Quiñones  
Anna Umbert Juliana**

Febrero, 2016



# Agradecimientos

---

**Ante todo agradezco a mi tutora, Anna Umbert Juliana, la dedicación, la paciencia, el buen criterio y sobretodo, las ganas y la alegría con las que realiza su trabajo. Ella fue la que me presentó y contagió en todo momento el interés por la materia que incluye el presente proyecto. Por todo esto y por el tiempo invertido ayudándome en la realización de este trabajo merece, como mínimo, estar presente en las primeras líneas del mismo.**

**Finalmente, y no por ello menos importante, le dedico con mucho cariño y orgullo este trabajo, y lo que supone su fin, a mi familia, a mi pareja y a mis amigos, quienes han depositado toda su confianza y fe en que conseguiría lo que me propusiera y me han apoyado en cada momento que lo he necesitado.**



# Resumen

---

*Long Term Evolution* (LTE) es la tecnología de acceso inalámbrica de banda ancha más reciente, denominada a nivel de usuario y comercialmente sistema de comunicación móvil de cuarta generación (4G). Es el último estándar, comercializado, de tecnología de red móvil del *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), que previamente desarrolló las tecnologías GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G) y que posteriormente ha desarrollado el estándar *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A).

Pese a que comercialmente LTE es llamado sistema 4G, técnicamente esto no es correcto debido a que LTE no cumple todos los requisitos que fijó la *International Telecommunication Union* (ITU) para considerar que un sistema es 4G y, por lo tanto, se puede encontrar literatura denominándola red 3.9G. Sin embargo, LTE-A sí es 4G.

El proceso de despliegue de redes LTE en España está, prácticamente, completado. En sus inicios, sólo se habían creado pequeñas “islas” de esta tecnología, es decir, su uso solo era posible en determinadas ciudades. Ahora, la mayoría del territorio español está planificado en términos de LTE mientras que, en cuestiones de fibra óptica aún queda una mayoría del territorio por planificar.

Cada vez que una nueva tecnología móvil se está considerando para su despliegue a gran escala, cientos de sus parámetros de radio frecuencia pasan por un proceso de ajuste con el fin de averiguar su valor óptimo. Sin embargo, esta fase requiere mucho tiempo y es muy laboriosa. Por lo tanto, antes de su despliegue comercial se hace una extensa simulación de la red y se ajustan, en primera aproximación, sus parámetros. Con ello se pretende desplegar una red optimizada y con un menor coste.

La planificación de la red radio es un paso fundamental para la tecnología de comunicación inalámbrica. En LTE, al igual que otras tecnologías celulares, la planificación inicial normalmente se rige por varias operadoras, que son las que decidirán cómo será la red. Estas no son propensas a revelar sus estrategias, avances y resultados. Por lo tanto, la planificación de una red LTE es un desafío bien elegido y un tema poco tratado en el campo académico actual. En este proyecto se pretende desarrollar, a nivel cualitativo, una guía eficiente de planificación de redes LTE.

La metodología utilizada en este proyecto consiste en una primera fase de investigación teórica, tanto a nivel de especificaciones técnicas del sistema LTE como de técnicas y estrategias de planificación y dimensionado de redes de acceso radio, especialmente GSM, para extrapolarlas al sistema LTE. Por otra parte, también se realizó un estudio de la herramienta de simulación ATOLL mediante un tutorial inicial y consultas a su manual previas a la realización de la planificación y dimensionado de la red de estudio con esta herramienta profesional.



# Abstract

---

*Long Term Evolution* (LTE) is the latest broadband wireless technology, commercially referred to as a 4th generation mobile communication system (4G). It is the latest commercially available *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) standard for mobile networks. 3GPP previously developed GSM/GPRS/EDGE (2G) and UMTS/HSPA (3G), and later developed *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A).

Although LTE is commercially referred to as 4G, technically this is not correct because LTE does not fulfill the requirements set by the *International Telecommunication Union* (ITU) in order to consider a system as 4G. Thus, it is often referred to as a 3.9G system. LTE-A, however, is 4G.

The deployment of LTE networks in Spain is almost completed. In the beginning, there were only technology islands in certain cities. Now, the majority of Spanish territory is planned in terms of LTE while for fiber optic issues the vast part of the territory is still unplanned.

Whenever a new mobile technology is considered for full scale deployment, hundreds of radio frequency parameters must be adjusted in order to determine their optimal values. This phase is time consuming and laborious, however. Therefore, a wide simulation of the network is performed before commercial deployment, and the parameters get approximate temporary values. The goal is to deploy an optimized network at a lower cost.

Radio network planning is fundamental for any wireless communication technology. In LTE, as in other cellular technologies, initial planning is normally guided by several operators, which decide what the network will be like. The operators tend not to reveal strategies, developments, or results. Thus, planning an LTE network is a challenge and a subject rarely discussed in academia. In this thesis, I aim to develop an efficient guide for LTE network planning on a qualitative level.

The methodology used in this thesis consists of a theoretical investigation of the technical specifications of the LTE system as well as of the techniques and strategies for the planning and dimensioning of radio Access networks, specially GSM, to extrapolate to the LTE system. It also consists of a study of the ATOLL simulation tool to produce the plan and dimensioning of the studied network.





*Long Term Evolution* (LTE) és la tecnologia d'accés sense fils de banda ampla més recent, denominada a nivell d'usuari i comercialment sistema de comunicacions mòbil de quarta generació (4G). És l'últim estàndard, comercialitzat, de tecnologia de xarxa mòbil del *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), que prèviament va desenvolupar les tecnologies GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G) i que posteriorment ha desenvolupat l'estàndard *Long Term Evolution Advanced* (LTE-A).

Malgrat que comercialment LTE és anomenat sistema 4G, tècnicament això no és correcte ja que LTE no compleix tots els requisits que va fixar la *International Telecommunication Union* (ITU) per considerar que un sistema és 4G i per tant, es pot trobar literatura dominant xarxa 3.9G. No obstant això, LTE-A sí és 4G.

El procés de desplegament de xarxes LTE a Espanya està, pràcticament, complet. Als seus inicis, només s'havien creat petites "illes" d'aquesta tecnologia, és a dir, el seu ús només era possible en determinades ciutats. Ara, la majoria del territori espanyol està planificat en termes de LTE mentre que, en qüestions de fibra òptica encara queda una majoria del territori per planificar.

Cada vegada que una nova tecnologia mòbil s'està considerant per al seu desplegament a gran escala, centenars dels seus paràmetres de ràdio freqüència passen per un procés d'ajust per tal d'esbrinar el seu valor òptim. No obstant això, aquesta fase requereix molt de temps i és molt laboriosa. Per tant, abans del seu desplegament comercial es fa una extensa simulació de la xarxa i s'ajusten, en primera aproximació, els seus paràmetres. Amb això es pretén desplegar una xarxa optimitzada i amb un menor cost.

La planificació de la xarxa ràdio és un pas fonamental per a la tecnologia de comunicació sense fils. En LTE, igual que altres tecnologies mòbils, la planificació inicial normalment es regeix per diverses operadores, que són les que decidiran com serà la xarxa. Aquestes no són propenses a revelar les seves estratègies, avanços i resultats. Per tant, la planificació d'una xarxa LTE és un desafinament ben triat i un tema poc tractat en el camp acadèmic actual. En aquest projecte es pretén desenvolupar, a nivell qualitatiu, una guia eficient de planificació de xarxes LTE.

La metodologia utilitzada en aquest projecte consisteix en una primera fase d'investigació teòrica, tant a nivell d'especificacions tècniques del sistema LTE com de tècniques i estratègies de planificació i dimensionat de xarxes d'accés ràdio, especialment GSM, per extrapolar al sistema LTE. D'altra banda, també es va realitzar un estudi de l'eina de simulació ATOLL mitjançant un tutorial inicial i consultes al seu manual prèvies a la realització de la planificació i dimensionament de la xarxa d'estudi amb aquesta eina professional.



# Índice general

<i>Agradecimientos</i> .....	3
<i>Resumen</i> .....	5
<i>Abstract</i> .....	7
<i>Resum</i> .....	9
<i>Índice general</i> .....	11
<i>Índice de figuras</i> .....	13
<i>Índice de tablas</i> .....	15
<i>Lista de acrónimos</i> .....	16
<i>Introducción</i> .....	21
<b>1.- Planteamiento del problema</b> .....	<b>23</b>
1.1 Propuesta .....	23
1.2 Justificación.....	23
1.3 Objetivos .....	24
1.3.1 Objetivo general .....	24
1.3.2 Objetivos específicos .....	24
1.4 Limitaciones y alcances .....	24
1.4.1 Limitaciones .....	24
1.4.2 Alcances .....	24
<b>2.- Estado del arte</b> .....	<b>26</b>
2.1 Evolución de las comunicaciones móviles.....	26
2.2 Sistemas móviles pre-celulares .....	27
2.3 Sistemas móviles celulares.....	28
2.3.1 Sistemas móviles de primera generación (1G).....	30
2.3.2 Sistemas móviles de segunda generación (2G) .....	31
2.3.3 Sistemas móviles de tercera generación (3G) .....	34
2.3.4 Sistemas móviles de cuarta generación (4G) .....	37
2.4 Sistema LTE .....	38
2.4.1 Arquitectura del sistema LTE .....	39
2.4.2 Red de acceso evolucionada: E-UTRAN.....	40
2.4.3 Red troncal de paquetes evolucionada: EPC.....	41
2.4.4 Tecnologías a nivel físico: OFDMA, SC-FDMA y MIMO.....	44
2.4.4.1 OFDMA.....	44
2.4.4.2 SC-FDMA .....	46
2.4.4.3 MIMO.....	47
2.4.5 Conceptos de interfaz radio .....	48
2.4.5.1 Capa Física .....	48
2.4.5.2 Bloque Recursos Físicos ( <i>Physical Resource Block</i> ) .....	48
2.4.5.3 Canales Físicos.....	50
2.4.6 Reúso frecuencial .....	51
<b>3.- Condiciones iniciales</b> .....	<b>53</b>
3.1 Metodología .....	53
3.2 Elección de ATOLL como herramienta de trabajo.....	54
3.3 Diseño de una red LTE en ATOLL .....	58
<b>4.- Parámetros configurados</b> .....	<b>64</b>
4.1 Escenario .....	64
4.2 Predicciones de cobertura disponibles .....	65
4.3 Elección de los parámetros de la red.....	67
4.3.1 Definición de las bandas de frecuencias .....	67
4.3.2 Elección del modelo de propagación .....	69
4.3.3 Configuración de los parámetros globales del sistema LTE .....	71
4.3.4 Configuración de los parámetros de tráfico .....	73
4.3.5 Configuración de la plantilla LTE .....	78
<b>5.- Desarrollo</b> .....	<b>81</b>
5.1 Planificación.....	81
5.2 Dimensionado.....	96
5.2.1 Planificación de vecinos y frecuencias .....	96
5.2.2 Planificación del Physical Cell ID .....	101

5.2.3 Definición del mapa de tráfico .....	102
5.2.4 Configuración y ejecución de las simulaciones de Monte Carlo. ....	104
5.2.5 Análisis de cobertura en la red optimizada. ....	106
5.2.6 Optimización de los parámetros de la red usando ACP. ....	110
6.- Conclusiones y líneas futuras .....	111
7.- Anexos.....	116
7.1 Anexo 1: Bandas LTE.....	116
8.- Bibliografía.....	118



# Índice de figuras

FIGURA 1: EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE SUSCRIPCIONES MÓVILES.....	26
FIGURA 2: EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÓVILES CELULARES.....	29
FIGURA 3: EVOLUCIÓN EXTENDIDA DE LOS SISTEMAS MÓVILES CELULARES.....	29
FIGURA 4: SISTEMAS DE PRIMERA GENERACIÓN.....	31
FIGURA 5: ARQUITECTURA DE LA RED GSM.....	33
FIGURA 6: SISTEMAS DE SEGUNDA GENERACIÓN.....	34
FIGURA 7: ARQUITECTURA DE LA RED GSM/GPRS +UMTS RELEASE 99.....	35
FIGURA 8: EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA UMTS.....	36
FIGURA 9: ESTÁNDARES DE COMUNICACIONES MÓVILES.....	38
FIGURA 10: CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA LTE.....	39
FIGURA 11: ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE.....	40
FIGURA 12: RED DE ACCESO E-UTRAN.....	41
FIGURA 13: ARQUITECTURA BÁSICA DE LA RED TRONCAL EPC.....	43
FIGURA 14: ESPECTRO DE LA SEÑAL OFDMA.....	44
FIGURA 15: SC-FDMA EN MODO LOCALIZADO.....	46
FIGURA 16: SC-FDMA MODO DISTRIBUIDO (INTERLEAVED FDMA – IFDMA, FDMA DISTRIBUIDO PURO).....	46
FIGURA 17: EFECTO DEL NÚMERO DE ANTENAS EN MIMO.....	47
FIGURA 18: CANALIZACIÓN DEL SISTEMA LTE.....	48
FIGURA 19: NÚMERO DE PRBS EN FUNCIÓN DE LA CANALIZACIÓN.....	49
FIGURA 20: CONCEPTO DE RADIO BLOQUE.....	49
FIGURA 21: VELOCIDADES DE PICO POSIBLES EN FUNCIÓN DE LA CANALIZACIÓN.....	50
FIGURA 22: CANALES FÍSICOS DEL ENLACE DESCENDENTE.....	51
FIGURA 23: CANALES FÍSICOS DEL ENLACE ASCENDENTE.....	51
FIGURA 24: INTERFERENCIA INTERCELULAR DE LTE.....	52
FIGURA 25: POSIBLES ESQUEMAS DE REÚSO DE FRECUENCIAS EN LTE IMPLEMENTADOS A TRAVÉS DE UNA ESTRATEGIA ICIC.....	52
FIGURA 25: CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO EN ATOLL.....	59
FIGURA 26: PARRILLA DE SELECCIÓN DE LOS <i>TEMPLATES</i> QUE OFRECE ATOLL.....	59
FIGURA 27: ENTORNO DE TRABAJO EN ATOLL DESPUÉS DE ELEGIR EL <i>TEMPLATE</i> DE INTERÉS.....	60
FIGURA 28: DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO DE UN PLAN NOMINAL PARA UNA RED LTE EN ATOLL.....	61
FIGURA 29: FLUJO DE TRABAJO PARA EL DISEÑO DE UNA RED LTE EN ATOLL.....	62
FIGURA 30: MAPA DE LA ZONA DE TRABAJO.....	64
FIGURA 31: TABLA DE BANDAS FRECUENCIALES DISPONIBLES EN ATOLL.....	67
FIGURA 32: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA BANDA 7 DEL ESTÁNDAR LTE.....	68
FIGURA 33: RESULTADOS DE SUBASTAS DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	68
FIGURA 34: RESULTADOS DE SUBASTAS DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	69
FIGURA 35: MODELOS DE PROPAGACIÓN DISPONIBLES PARA LTE.....	70
FIGURA 36: CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN EN ATOLL.....	70
FIGURA 37: PARÁMETROS GLOBALES DEL SISTEMA LTE.....	71
FIGURA 38: PARÁMETROS DE CÁLCULO DEL SISTEMA LTE.....	72
FIGURA 39: CONFIGURACIÓN DEL <i>HOME USER</i> .....	73
FIGURA 40: CONFIGURACIÓN DEL <i>DRIVER USER</i> .....	74
FIGURA 41: CONFIGURACIÓN DEL ENTORNO <i>DENSE URBAN</i> .....	75
FIGURA 42: CONFIGURACIÓN DEL ENTORNO <i>RURAL</i> .....	75
FIGURA 43: CONFIGURACIÓN DEL ENTORNO <i>SUBURBAN</i> .....	76
FIGURA 44: CONFIGURACIÓN DEL ENTORNO <i>URBAN</i> .....	76
FIGURA 45: ELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA ANTENA.....	77
FIGURA 46: CONFIGURACIÓN DE LA PLANTILLA LTE (PESTAÑAS <i>GENERAL</i> Y <i>TRANSMITTER</i> ).....	78
FIGURA 47: CONFIGURACIÓN DE LA PLANTILLA LTE (PESTAÑAS <i>LTE</i> Y <i>NEIGHBOURS</i> ).....	79
FIGURA 48: CONFIGURACIÓN DEL STANDARD PROPAGATION MODEL (SPM).....	82
FIGURA 49: PREDICCIÓN Nº1, COBERTURA POR NIVEL DE SEÑAL.....	82
FIGURA 50: PREDICCIÓN Nº1, COBERTURA POR NIVEL DE SEÑAL DEL NUEVO ENTORNO DE TRABAJO.....	83
FIGURA 51: PREDICCIÓN Nº2, ZONAS SOLAPADAS.....	85

FIGURA 52: PREDICCIÓN Nº3, ANÁLISIS DE SEÑAL EFECTIVA (PDSCH) .....	86
FIGURA 53: PREDICCIÓN Nº 4, ANÁLISIS DE SEÑAL EFECTIVA (PDSCH C/N) .....	87
FIGURA 54: PREDICCIÓN Nº 5, ANÁLISIS DE SEÑAL EFECTIVA (PUSCH & PUCCH).....	88
FIGURA 55: PREDICCIÓN Nº 6, ANÁLISIS DE SEÑAL EFECTIVA (PUSCH & PUCCH C/N).....	89
FIGURA 56: PREDICCIÓN Nº 7, COBERTURA POR NIVEL DE PDSCH C/(I+N) .....	90
FIGURA 57: PREDICCIÓN Nº 8, COBERTURA POR NIVEL DE PUSCH & PUCCH C/(I+N).....	91
FIGURA 58: PREDICCIÓN Nº9, ANÁLISIS DEL ÁREA DE SERVICIO (DL) .....	92
FIGURA 59: PREDICCIÓN Nº 10, ANÁLISIS DEL ÁREA DE SERVICIO (UL) .....	93
FIGURA 60: PREDICCIÓN Nº 11, COBERTURA POR <i>THROUGHPUT</i> (DL) .....	94
FIGURA 61: PREDICCIÓN Nº 12, COBERTURA POR <i>THROUGHPUT</i> (UL) .....	94
FIGURA 62: CONFIGURACIÓN REALIZADA PARA LA ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE VECINOS. ....	97
FIGURA 63: CONFIGURACIÓN REALIZADA PARA LA ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE FRECUENCIAS.....	98
FIGURA 64: COMPROBACIÓN DE LA ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE FRECUENCIAS. ....	99
FIGURA 65: PREDICCIÓN Nº13, COBERTURA POR NIVEL DE PDSCH C/(I+N) – 7 PORTADORAS.....	100
FIGURA 66: CONFIGURACIÓN REALIZADA PARA LA ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DEL <i>PHYSICAL CELL ID</i> . ....	101
FIGURA 67: COMPROBACIÓN DE LA ASIGNACIÓN AUTOMÁTICA DE <i>PHYSICAL CELL IDs</i> . ....	102
FIGURA 68: CREACIÓN DE UN NUEVO MAPA DE TRÁFICO. ....	103
FIGURA 69: MAPA DE TRÁFICO RESULTANTE PARA NUESTRO PROYECTO. ....	103
FIGURA 70: CONFIGURACIÓN DEL GRUPO DE 10 SIMULACIONES. ....	104
FIGURA 72: LEYENDA REPRESENTATIVA DE LOS RESULTADOS CONSEGUIDOS. ....	106
FIGURA 73: COMPARATIVA DE <i>SERVICE AREA ANALYSIS</i> (DL) ENTRE LA RED OPTIMIZADA Y SIN OPTIMIZAR. ....	107
FIGURA 74: COMPARATIVA DE HISTOGRAMAS DE <i>SERVICE AREA ANALYSIS</i> (DL) ENTRE LA RED OPTIMIZADA Y SIN OPTIMIZAR. ....	107
FIGURA 75: COMPARATIVA DE <i>SERVICE AREA ANALYSIS</i> (UL) ENTRE LA RED OPTIMIZADA (IZDA) Y SIN OPTIMIZAR (DCHA). ....	108
FIGURA 76: BLER DE RED SIN OPTIMIZAR (IZQUIERDA) Y RED OPTIMIZADA (DERECHA) EN EL ENLACE DESCENDENTE (DL).....	109
FIGURA 77: BLER DE RED SIN OPTIMIZAR (IZQUIERDA) Y RED OPTIMIZADA (DERECHA) EN EL ENLACE ASCENDENTE (UL). ....	109
FIGURA 78: VISUALIZACIÓN DE CAMBIOS PROPUESTOS DURANTE LA REALIZACIÓN DE ACP.....	110
FIGURA 79: MAPA DE COBERTURA 4G EN ESPAÑA. ....	111





# Índice de tablas

---

TABLA 1: PREDICCIONES DE COBERTURA DISPONIBLES EN EL SOFTWARE ATOLL.....	66
TABLA 2: COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE LA ÚLTIMA SIMULACIÓN DE LOS GRUPOS DE 10 Y 50 SIMULACIONES.....	105

# Lista de acrónimos

---

1G	Primera Generación
2G	Segunda Generación
2.5G	Generación 2.5
3G	Tercera Generación
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
3GPP2	<i>Third Generation Partnership Project 2</i>
4G	Cuarta Generación
AFP	<i>Automatic Frequency Planning</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone Service</i>
AMS	<i>Adaptative MIMO Switch</i>
AS	<i>Access Stratum</i>
AT&T	<i>American Telephone and Telegraph</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSR	<i>Buffer Status Report</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CEPT	<i>Conference of European Postal and Telecommunications</i>
CS	<i>Coding Scheme</i>
D-AMPS	<i>Digital AMPS</i>
DL	<i>Downlink</i>
E-UTRAN	<i>Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for Global Evolution</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPRE	<i>Energy per Resource Element</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ETSI	<i>European Telecommunication Standards Institute</i>
EV-DO	<i>Evolution-Data Only</i>
EV-DV	<i>Evolution for integrated Data and Voice</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HSCSD	<i>High-Speed Circuit-Switched Data</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
ICIC	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>
IFFT	<i>Inverse FFT</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
IMTS	<i>Improved Mobile Telephone Service</i>

IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>ITU Radiocommunication Sector</i>
JDC	<i>Japan Digital Cellular</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MRC	<i>Maximum Ratio Combining</i>
MTA	<i>Mobiltelefonisystem A</i>
MTS	<i>Mobile Telephone Service</i>
MU-MIMO	<i>Multiple-User MIMO</i>
MUG	<i>Multi-User Gain</i>
NAS	<i>Non Access Stratum</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telephony</i>
NTT	<i>Nippon Telegraph and Telephone</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PCRF	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
PCU	<i>Packet Control Unit</i>
PD	<i>Proportional Demand</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PF	<i>Proportional Fair</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RR	<i>Round Robin</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RSRP	<i>Received Reference Signal Energy per Resource Element</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier-Frequency Division Multiple Access</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SRB	<i>Scheduler Resource Block</i>
SRS	<i>Sounding Reference Signals</i>
SU-MIMO	<i>Single-User MIMO</i>
TACS	<i>Total Access Communications System</i>
TD-CDMA	<i>Time Division-CDMA</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TIA	<i>Telecommunication Industry Association</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>

UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
W-CDMA	<i>Wideband CDMA</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>





# Introducción

---

La evolución de los sistemas de telefonía móvil ha sido un proceso que ha visto en pocos años la introducción de múltiples avances tecnológicos que han permitido que sean cada vez más las personas que hacen uso del teléfono celular como dispositivo indispensable en sus vidas cotidianas. Así pues, imaginar hoy en día un mundo sin las telecomunicaciones sería pensar en otro planeta completamente diferente al que vivimos actualmente. Nuevas técnicas de codificación, multiplexación, cifrado, acceso, etc., han permitido que la telefonía móvil haya pasado de ser un servicio de voz, como lo era en un principio, a uno que ofrece una amplia gama de aplicaciones multimedia que permiten las comunicaciones en tiempo real, a altas velocidades de transmisión e incluso con altas posibilidades de movimiento.

*Long Term Evolution* (LTE) es el nombre que la 3GPP ha dado a la línea evolutiva que abarca los sistemas de comunicaciones móviles GSM, GPRS, EDGE, UMTS y HSPA, y que con la idea de culminar en LTE-Advanced, se caracteriza por ser un sistema de cuarta generación. Con ello se plantea en un comienzo, entre varios objetivos, alcanzar velocidades pico en la interfaz radio por encima de los 100 Mbps en el enlace descendente y de los 50 Mbps en el ascendente. Además, debe operar completamente en modo paquete ofreciendo todos los servicios sobre el protocolo IP, reducir los tiempos de latencia y permitir canalizaciones flexibles de hasta 20 MHz.

Por la gran cantidad de variables inherentemente presentes en una red de comunicaciones móviles, como lo son las interferencias, movi­lidades de los usuarios, servicios demandados, condiciones de propagación, entre otras, aunado al hecho de que LTE es un sistema que opera completamente en modo paquete, es indispensable disponer de un mecanismo que permita compartir de forma organizada los recursos radio entre los usuarios.

El presente Trabajo de Fin de Carrera propone la planificación y posterior optimización de una red LTE utilizando la herramienta de planificación radio ATOLL. Múltiples son las inquietudes que surgen como base para emprender este proyecto, planificar una red de cuarta generación es una de ellas.

En este sentido, aprovechando la posibilidad de disponer de un *software* que permite modelar estas redes, el informe se estructura como se describe a continuación. En el capítulo 1 se expone el contexto en el cual surge el proyecto así como los objetivos planteados, las limitaciones y alcances del mismo. En el capítulo 2 se explican los conceptos teóricos necesarios para la comprensión del proyecto introduciendo al lector con una breve descripción de las generaciones de comunicaciones móviles para después entrar en detalle en la tecnología LTE. En el capítulo 3 se describe la metodología empleada para la realización de cada fase del proyecto, desde la investigación teórica hasta la obtención de los resultados. En el capítulo 4 se explica el proceso que se llevó a cabo para la planificación y optimización de la red LTE. El capítulo 5 contiene la descripción, resultados y análisis de todas las simulaciones realizadas en la red LTE sobre la herramienta ATOLL. Por último, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y las líneas futuras de investigación a partir del trabajo desarrollado.





# 1.- Planteamiento del problema

---

El siguiente capítulo describe la propuesta del presente proyecto de fin de carrera, la justificación del mismo, los objetivos, tanto generales como específicos, y las limitaciones y alcances encontrados en el proceso de realización del mismo.

## 1.1 Propuesta

En este trabajo de investigación se propone llevar a cabo la planificación de una red LTE con la herramienta de planificación radio ATOLL para posteriormente estudiar diversas mejoras para la red.

En concreto, el proyecto se centra en el diseño de un plan nominal para el municipio de Sitges. La planificación de la red se elabora para simular el futuro comportamiento de esta en términos de capacidad y cobertura, analizando los resultados después de realizar estudios como: área de cobertura, capacidad del sistema, DL/UL *Throughput*, entre otros.

## 1.2 Justificación

La iniciativa de este proyecto surge dentro del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GRCM) perteneciente al Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) con el fin de profundizar en el conocimiento del módulo LTE desarrollado por la empresa FORSK para la herramienta *software* ATOLL.

Previamente, el grupo de investigación ha desarrollado proyectos basados en las tecnologías de comunicaciones móviles 2G y 3G con la misma herramienta y se ha podido comprobar que los resultados obtenidos modelan de forma realista las redes en cuestión. Ahora, con la aparición de las tecnologías 4G de comunicaciones móviles y la disponibilidad del módulo de ATOLL, surge la necesidad de evaluar resultados prácticos de diversos aspectos y establecer comparaciones con la teoría y las especificaciones del 3GPP establecidas para esta tecnología, con el fin de mantenerse siempre a la vanguardia de las nuevas tecnologías y evaluar en este caso el *software* ATOLL en el modelado de las redes LTE.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Planificar y optimizar una red LTE en el municipio de Sitges mediante el *software* ATOLL para analizar el comportamiento de la cobertura en distintos entornos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar las características del sistema de telefonía móvil LTE.
- Estudiar los aspectos necesarios que intervienen en el proceso de planificación y optimización de una red LTE en la herramienta ATOLL.
- Aprender a utilizar el *software* ATOLL y dominar cada uno de los parámetros que intervienen en el modelado de la red.
- Diseñar y optimizar una red LTE para el municipio de Sitges donde posteriormente se evaluarán los diferentes entornos posibles para estudiar la calidad de dicha red.
- Observar, bajo diferentes condiciones de tráfico, la demanda y servicio de tráfico que ofrece la red.

## 1.4 Limitaciones y alcances

### 1.4.1 Limitaciones

- Para desarrollar el proyecto fue necesaria la versión 3.3.0 de ATOLL con el módulo ACP (*Automatic Cell Planning*) instalado que permitiera realizar las asignaciones frecuenciales y de *Physical Cell IDs* de manera automática, precisa y rápida gracias a los algoritmos empleados con ATOLL.
- Los estudios realizados se limitaron a las opciones que ATOLL dispone para modelar redes LTE. En algunos casos los algoritmos empleados por ATOLL no corresponden a los empleados en la realidad porque se ven limitados por aspectos que no pueden implementarse en el programa. Por ejemplo, las simulaciones reflejan el estado del sistema en un tiempo instantáneo y no tienen memoria del pasado.

### 1.4.2 Alcances

El trabajo se centra en la realización de una detallada y completa planificación de una red LTE así como el impacto de diferentes entornos (rurales, urbanos, marítimos) en términos de capacidad y cobertura. Por otra parte, este proyecto no contempla el efecto de diferentes parámetros de las redes LTE que también pueden ser modelados en ATOLL.



## 2.- Estado del arte

Este capítulo tiene como objetivo describir la evolución de las comunicaciones móviles, partiendo de los sistemas móviles pre-celulares hasta llegar a la cuarta generación de la telefonía móvil. Posteriormente se lleva a cabo la descripción de la arquitectura de los sistemas LTE, así como sus características más relevantes.

### 2.1 Evolución de las comunicaciones móviles

Las tecnologías y la sociedad están en un continuo proceso de influencia mutua. Este es el caso específico de las comunicaciones móviles. Por un lado, las comunicaciones móviles tienen la capacidad de aumentar y facilitar las elecciones de los usuarios. Por otro lado, las características propias de las comunicaciones móviles facilitan en mayor grado cierto tipo de comportamientos sociales [1].

Esta estrecha relación entre tecnología y sociedad es la que permite que en la actualidad las comunicaciones móviles sean las tecnologías que sufren una mayor demanda y a las que se les están dedicando más recursos para desarrollarlas al máximo. Es esta capacidad que tiene la tecnología móvil de llegar a tantas personas lo que ha hecho que su avance tecnológico en el tiempo sea tan rápido. Prueba de ello se observa en la figura adjunta, que analiza la evolución de las suscripciones móviles a lo largo de los últimos años llegando a la conclusión de que en el año 2014 se alcanzó, prácticamente, al valor de la población mundial.

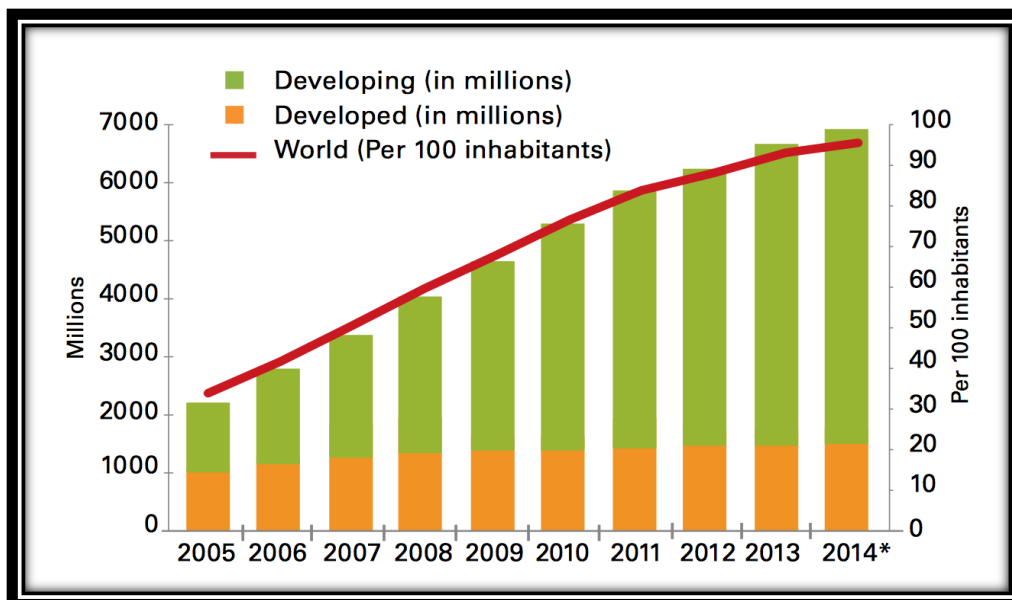


Figura 1: Evolución del número de suscripciones móviles.

Fuente: ITU World Telecommunication/ICT Indicators database [2].

Las transformaciones a las que las comunicaciones móviles han dado lugar deben entenderse como nuevas formas de conseguir sus objetivos para los individuos, las empresas y las administraciones. Incluso en muchos casos se trata de actividades que no habrían sido posibles sin la existencia de las comunicaciones móviles [1].

Este avance en las comunicaciones móviles ha permitido el desarrollo de dispositivos móviles cada vez más sofisticados, ágiles e intuitivos para los usuarios, siendo capaces de ofrecer una amplia gama de aplicaciones y haciendo del teléfono móvil una herramienta indispensable en el uso cotidiano de la sociedad actual.

## 2.2 Sistemas móviles pre-celulares

Un hecho evidente y que ha sido una constante a lo largo de la historia es que el desarrollo tecnológico siempre ha venido ligado al transcurso de alguna crisis. En este caso, el desarrollo de la tecnología móvil nació en 1940, después de la Segunda Guerra Mundial. Concretamente, fue una vez finalizada la guerra cuando se aprovecharon todos los dispositivos útiles para fines comerciales. Dispositivos tales como la radio, el radar, el walkie-talkie y otras tecnologías inalámbricas fueron todo un éxito.

El 28 de julio de 1945, el comisario de la FCC (*Federal Communications Commission*) J.K. Jett publicó en el *Saturday Evening Post* un artículo titulado “*Phone me by air*” en el que se hacía referencia, por primera vez en la historia, a un sistema radio celular que permitía el establecimiento de comunicaciones bidireccionales vía radio en la banda de 460 MHz. Si bien el artículo no explicaba el método en el que se podría lograr la comunicación entre el móvil y la red telefónica fija, sí hacía referencia al reuso frecuencial en áreas pequeñas, mencionando la posibilidad de que millones de usuarios en todo el país pudieran utilizar los mismos canales simultáneamente y sin interferirse. Desgraciadamente, en aquel momento la FCC no concedió el espectro para llevar a cabo el servicio. Sin embargo, se continuó el estudio de los sistemas celulares llegando a ser implementados un año después de la fecha de publicación del artículo, con el mecanismo de reuso frecuencial como elemento fundamental [3].

Otra fecha significativa es el 17 de junio de 1946. Fue en St. Louis, Missouri, USA, donde la mencionada anteriormente FCC permite que AT&T (*American Telephone & Telegraph*) y una compañía regional de telefonía llamada South-Western Bell instalen el primer sistema de telefonía móvil. En este caso fue la instalación de un dispositivo móvil en un coche que transmitía a diversos receptores dispersados dentro de la ciudad. Era un sistema denominado MTS (*Mobile Telephone Service*) que utilizaba seis canales en la banda de 150 MHz con una separación entre canales de 60 kHz. Posteriormente, fueron reducidos a tres por problemas de interferencias entre canales. Esto significaba que sólo se podían realizar tres llamadas simultáneas originando, lógicamente, largas lista de espera [3].

Por otro lado, en Europa, el desarrollo de la telefonía móvil fue más lento debido a que la mayoría de gobiernos prohibían su uso comercial. Fue a partir de la década de los 50 y de los 60 en el que se fueron sumando nuevos sistemas de telefonía móvil tanto en Estados Unidos como en Europa, creándole competencia a la AT&T. Uno de los primeros sistemas europeos fue el MTA (*Mobiltelefonisystem A*) sueco. A medida que pasaban los años, nuevas mejoras eran introducidas, con lo que se requería una actualización de los sistemas. A mediados de los años 60, nuevas versiones comenzaban a emerger, tales como el IMTS (*Improved Mobile Telephone Service*) como relevo del precario MTS americano o el MTB (*Mobiltelefonisystem B*) en sustitución al MTA sueco. Estos nuevos sistemas introducían cambios como, por ejemplo, el reemplazo del botón de llamada, que en un principio era necesario mantenerlo presionado para poder hablar. Otros cambios significativos fueron la sustitución de operaciones de conmutación manual por el marcado automático y la posibilidad de establecer una comunicación móvil a móvil, entre otras. Sin embargo, a pesar de la implantación de estos novedosos sistemas móviles todavía se tenía que su capacidad era un factor muy limitante [3].

A modo de conclusión, se puede decir que los sistemas móviles pre-celulares se caracterizaban por tener pocas estaciones base transmitiendo a elevada potencia con las que cubrir áreas de terreno muy extensas. Esto derivaba directamente en una capacidad muy limitada por parte de los usuarios, elevados costes de mantenimiento y un gran consumo de potencia en equipos terminales muy pesados y voluminosos que se situaban corrientemente en los vehículos. De hecho, en esta época no tiene mucho sentido definir estos sistemas como “móviles” ya que debido a los antecedentes anteriores, no se permitía una libertad de movimiento elevada tal y como ocurre en nuestros días.

## 2.3 Sistemas móviles celulares

En Diciembre de 1947, es cuando surgen los sistemas móviles celulares de la mano del equipo formado por W.R. Young y D.H. Ring. El trabajo depositado por ambos en Bell Laboratories fue el detonante de la creación de las bases de lo que hoy conocemos como comunicaciones móviles celulares. Young y Ring fueron los que diseñaron la división de un territorio extenso en pequeñas áreas de geometría hexagonal, a las que le pusieron el nombre de celdas y como eran áreas de terreno poco extensas, no se necesitaba una elevada potencia en el equipo transmisor para cubrirlas. También introdujeron el concepto de reuso frecuencial entre distintas celdas alejadas lo suficiente entre sí para no producirse interferencia y el concepto de *handover*, que permitiría la continuidad de las comunicaciones entre los usuarios que viajaban entre celdas vecinas. Fue tal la novedad que suponía la implantación de este sistema y tan limitante el número de teléfonos móviles disponibles así como el espectro disponible o el número de canales accesibles que hicieron falta decenas de años, en concreto 40 años, para implementar este servicio de telefonía móvil y que ofreciera una alta capacidad [3].

Desde su implantación, los sistemas móviles celulares han ido evolucionando a partir de las necesidades que se han ido experimentando y de los recursos que permanecían accesibles en cada época. Fruto de ello, esta tecnología ha ido evolucionando por generaciones, siempre intentando sacar provecho de la generación anterior, mejorando sus limitaciones y aprovechando sus capacidades potenciales. Véase la siguiente figura:

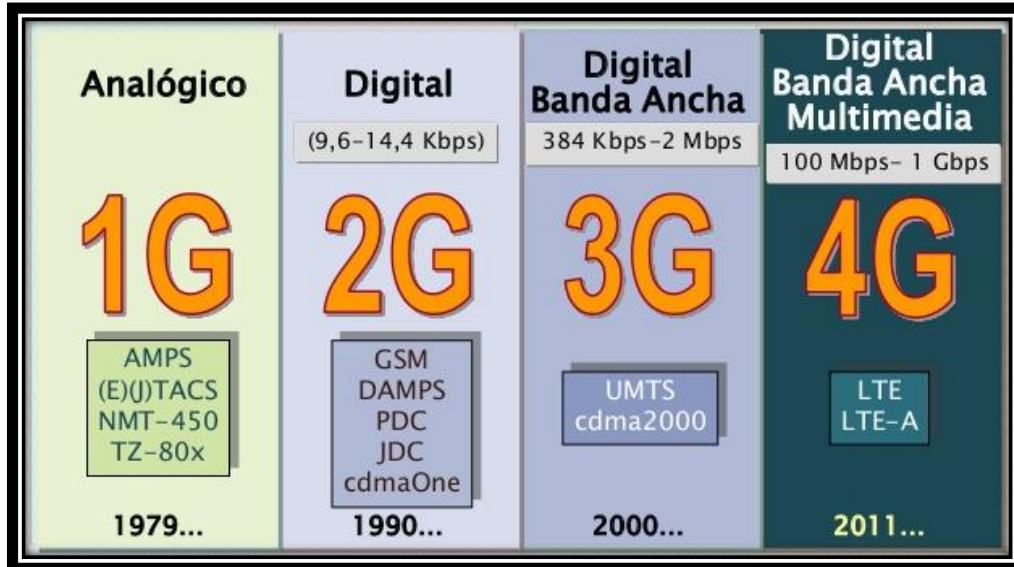


Figura 2: Evolución de los sistemas móviles celulares.

Antes de analizar los sistemas móviles de primera generación resulta interesante ejercer un visión más panorámica de la evolución de los sistemas móviles para mostrar que, aunque no se pretende estudiar cada una de ellas porque no son el objetivo de este proyecto, existen generaciones intermedias que, pese a registrar pocas mejoras respecto a las generaciones anteriores, fueron las culpables del desarrollo de las futuras generaciones. Véase la figura adjunta:

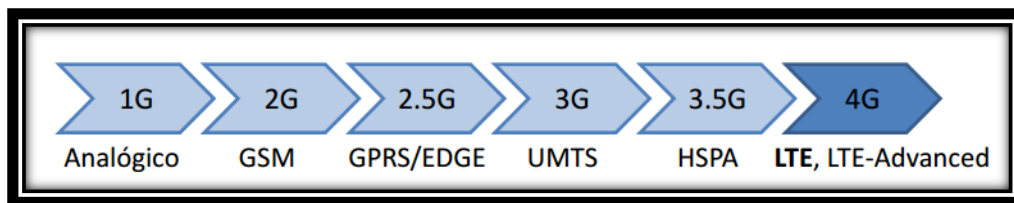


Figura 3: Evolución extendida de los sistemas móviles celulares.

Fuente: Extraído de [4].

### 2.3.1 Sistemas móviles de primera generación (1G)

Los sistemas de primera generación fueron los pioneros en la aplicación del concepto de red celular. Se caracterizaban por ser analógicos y ofrecer únicamente servicios de voz. Esos sistemas no disponían todavía de mecanismos de control de potencia, por lo que siempre transmitían la misma potencia sin tener en cuenta las condiciones del entorno o su ubicación. Por esta misma circunstancia el consumo de batería y las interferencias eran un factor muy limitante. Estos sistemas todavía se encontraban situados en los vehículos y no se había conseguido reducir su tamaño, con lo que seguían siendo muy voluminosos [5].

Después de que empezaran a hacer numerosas pruebas y tests en 1975, fue en 1979 cuando la empresa japonesa NTT (*Nippon Telegraph and Telephone*) implantó un sistema celular de primera generación por primera vez. Posteriormente, en 1981, nació en Noruega el primer sistema de primera generación multinacional, el NMT (*Nordic Mobile Telephony*). Este sistema se implantó en los países nórdicos (Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia) usando la banda de 450 MHz [3].

Por otra parte, en Estados Unidos, después de sufrir una serie de retrasos en la regulación del sistema y de realizar una serie de pruebas en la ciudad de Chicago se implantó, en concreto el 12 de Octubre de 1983, el sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*). Después de esto, fue implantado en 1985 el sistema TACS (*Total Access Communications System*) en el Reino Unido, presentando muchas similitudes con el AMPS estadounidense. Otros sistemas similares que se implantaron en otros países fueron los sistemas C-Netz en Alemania Occidental, Radiocom 2000 en Francia o el RTMI/RTMS en Italia [3].

En Europa los sistemas de primera generación tuvieron un gran éxito y su expansión fue muy rápida. Rápidamente se adaptó el sistema a otros países en su misma versión o en versiones diferentes. Un ejemplo de esto es el sistema NMT, que fue adaptado para países de la Europa Oriental llamándolo NMT-900, ya que utilizaba la banda de 900 MHz en lugar de la de 450 MHz. Este sistema fue el primero en introducir el concepto de *roaming* internacional para utilizar el servicio en otros países donde operaba. Otros ejemplos son los sistemas TACS, que fue adoptado por algunos países de medio oriente y del sur de Europa y el sistema AMPS que fue adoptado por países de América del Sur y del lejano oriente, incluyendo a Australia y Nueva Zelanda.



Existían varios aspectos en común entre los sistemas de primera generación mencionados hasta ahora. El primer aspecto interesante a destacar es que todos utilizaban la técnica de duplexado en frecuencia (FDD) definiendo diferentes bandas para el enlace ascendente y descendente. Se solían utilizar bandas centradas en torno a los 900 MHz. Otro aspecto significativo a destacar es el de la modulación. Todos los sistemas empleaban la modulación analógica FM para servicios de voz y la técnica de acceso FDMA que consiste en dividir el espectro disponible en canales que se repartían entre las diferentes estaciones base, evitando así las interferencias asignando canales distintos a las estaciones base vecinas. Por último, es importante destacar que por cada llamada se asignaba un canal dedicado para cada enlace durante todo el tiempo de la comunicación.

Pero no todo eran ventajas, la limitación fundamental de estos sistemas es que ninguno de ellos era compatible entre sí, lo que llevaba a que si un usuario quería utilizar su teléfono móvil en esos años solamente le era posible utilizarlo en países en los que operaba ese sistema. Si viajaba a otros países en los que no operaba no le era posible el servicio.

En la siguiente figura se presentan las características más importantes de los principales sistemas presentados anteriormente para facilitar la comprensión de su funcionamiento y que se pueda realizar un juicio propio de sus ventajas e inconvenientes.

Sistema	AMPS	TACS	NMTS	NAMTS
Enlace móvil-base	824-849 MHz	872-905 MHz	890-915 MHz	925-940 MHz
Enlace base-móvil	869-894 MHz	917-950 MHz	935-960 MHz	870-885 MHz
$\Delta\omega$ / canal	30 KHz	25 KHz	12,5 KHz	25 KHz
Nº de canales	832	1320	1999	600
Modulación	FM	FM	FM	FM
Desv. Frec.	12 KHz	9,5 KHz	5 KHz	5 KHz
Señalización	FSK	FSK	FSK	FSK

**Figura 4: Sistemas de primera generación.**  
Fuente: Extraído de [5].

### 2.3.2 Sistemas móviles de segunda generación (2G)

Debido a las predicciones de la creciente demanda de capacidad de los sistemas de primera generación y del problema de la incompatibilidad de los sistemas coexistentes, se vislumbró la posibilidad de implantación de un único sistema global que permitiera la movilidad entre países, aprovechando también los grandes avances tecnológicos de los años 80, tales como la tecnología de los semiconductores y los circuitos integrados, dando lugar así a una nueva generación de comunicaciones móviles [6].

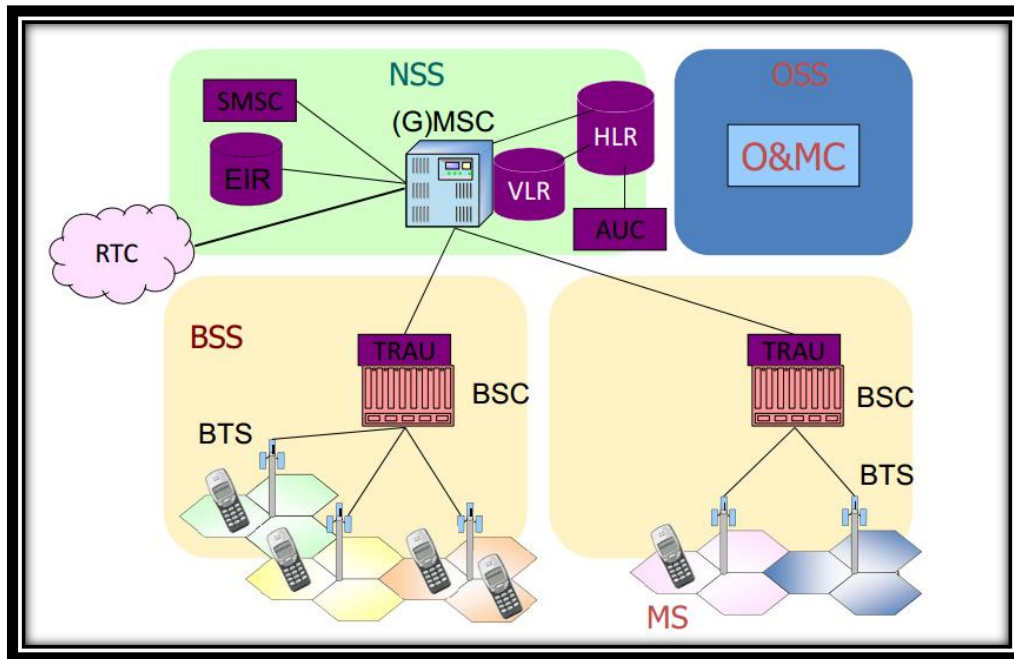
En este sentido, la CEPT (*Conference of European Postal and Telecommunications*) creó en 1982 el grupo GSM, cuyas siglas en un comienzo significaban *Groupe Spéciale Mobile* y posteriormente fueron rebautizadas a *Global System for Mobile Communications*, con el fin de crear un sistema continental europeo nuevo y con una tecnología digital que pudiera ofrecer un servicio de buena calidad y con una alta eficiencia espectral. Este sistema debería cumplir con los requisitos de capacidad y de compatibilidad entre países. En 1989, la recién formada ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) continuó con los avances del grupo GSM logrando el lanzamiento comercial del sistema en 1992 [6][7].

El avance más relevante que ocasionó la evolución de los sistemas de primera generación a los sistemas de segunda generación es que pasaron a ser digitales. Este cambio de tecnología introdujo una serie de ventajas muy destacadas, como una mayor calidad frente a interferencias o un uso más eficiente del espectro de comunicaciones. Además los avances de la tecnología proporcionaron una reducción de tamaño, así como la reducción del coste y la disminución en el consumo de potencia, permitiendo que las comunicaciones móviles pasaran de ser utilizadas por un grupo selectivo de personas, principalmente establecidas en vehículos, a extenderse a toda la población mundial interesada en comunicarse en cualquier momento y desde cualquier lugar [5].

Por otro lado, las técnicas de procesado digital de la información como la modulación digital, codificación de canal, codificación de fuente, sistemas entrelazados, cifrado de las comunicaciones, entre otras, permitieron mejoras en cuanto a calidad, velocidad de transmisión, capacidad del sistema y la posibilidad de agregación de nuevos servicios como el buzón de voz, identificador de llamadas y mensajes de texto [5].

El sistema GSM utiliza la técnica de duplexado FDD, que opera inicialmente en la banda de frecuencias 890-915 MHz en el enlace ascendente y en 935-960 MHz en el descendente. Como técnica de acceso múltiple emplea FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) combinado con TDMA (*Time Division Multiple Access*). Es una combinación de división en tiempo y frecuencia, divide el espectro de 25 MHz en 124 portadoras con una canalización de 200 kHz por cada portadora. A su vez, cada canal de 200 kHz lo divide en 8 ranuras de tiempo. A pesar de que el sistema GSM fue originalmente creado para operar en la banda de 900 MHz surgieron variaciones en el sistema. Las más conocidas son la GSM-1800 y la GSM-1900, que fueron adoptadas tanto por países europeos como no europeos [5].

En la figura que se observa a continuación se muestra de manera resumida la arquitectura de la red GSM. Esta arquitectura es más compleja y dispone de más elementos que los presentados en esta figura, pero la figura sirve para mostrar de forma resumida la arquitectura de red.



**Figura 5: Arquitectura de la red GSM.**

**Fuente: Extraído de [4].**

El éxito de la red GSM hizo que se extendiera rápidamente por todo el mundo, y con la aparición de los móviles que podían operar en las tres bandas de frecuencia disponibles (900, 1800, 1900 MHz) se hacía más fácil el empleo del servicio de *roaming* internacional permitiendo establecer comunicaciones en los cinco continentes. Cabe destacar que el sistema GSM es el que tuvo un mayor impacto a nivel mundial, pero también existen otros sistemas tales como el IS-54, que posteriormente evolucionó al IS-136, y el IS-95 desarrollados en Estados Unidos o el sistema PDC (*Personal Digital Cellular*), originalmente conocido como JDC (*Japan Digital Cellular*), desarrollado en Japón [5][6].

En Estados Unidos la motivación de avanzar a la segunda generación de comunicaciones móviles era diferente al caso europeo. En Estados Unidos sólo se había desarrollado un sistema de comunicaciones para la primera generación, el AMPS, con lo que los usuarios de telefonía móvil eran libres de moverse por todo el país sin problemas de compatibilidad. Por este motivo, la FCC ordenó que la segunda generación fuera compatible con la primera, aumentando la capacidad y reduciendo costes y tamaño. Al no poder llegar a una única solución se propusieron dos tecnologías de funcionamiento: el IS-54 desarrollado por la TIA (*Telecommunication Industry Association*), basado en FDMA/TDMA y el IS-95, desarrollado por Qualcomm, basado en FDMA/CDMA [8].

El sistema IS-54, también llamado D-AMPS (*Digital AMPS*) empezó a operar en Estados Unidos el año 1990 conjuntamente con el sistema AMPS, triplicando la capacidad de este último y utilizando la banda de 850 MHz. Este sistema utilizaba los canales de control analógico y digitalizaba los canales de voz. Posteriormente, este sistema evolucionó a uno completamente digital denominado IS-136, introducido en 1994, que además de usar la banda de 850 MHz era capaz de operar en la banda de 1900 MHz. Por otro lado, el sistema IS-95 fue introducido en 1993 en Estados Unidos y se utilizó en varios países asiáticos. Este sistema también era llamado CDMAOne y es el único sistema de segunda generación basado en CDMA (*Code Division Multiple Access*), tecnología de acceso múltiple que proviene del ámbito militar y que posteriormente se utilizaría en los sistemas de tercera generación tales como UMTS [7].

Debido a la aparición de numerosos sistemas de segunda generación y puesto que cada uno de ellos trabaja de forma diferente se ha adjuntado la siguiente figura con el fin de facilitar las características fundamentales de los principales sistemas. Véase a continuación.

Sistema	GSM	IS-54	JDC	IS-95
Banda ascendente	890-915 MHz	824-849 MHz	940-956 MHz	824-849 MHz
Banda descendente	935-960 MHz	869-894 MHz	810-826 MHz	869-894 MHz
Duplexado	FDD	FDD	FDD	FDD
Técnica de acceso	FDMA/TDMA	FDMA/TDMA	FDMA/TDMA	FDMA/CDMA
$\Delta\omega$ / canal	200 KHz	30 KHz	25 KHz	1250 KHz
Canales/portad.	8	3	3	-
Tasa transmisión	270,8 Kbps	48,6 Kbps	42 Kbps	1228,8 Kcps
Duración trama	4,615 ms	40 ms	20 ms	20 ms

**Figura 6: Sistemas de segunda generación.**

Fuente: Extraído de [5].

### 2.3.3 Sistemas móviles de tercera generación (3G)

En resumen, los sistemas de segunda generación fueron un éxito. Pero de manera análoga al caso anterior, la demanda de tráfico y las expectativas de posibles desarrollos, tales como las aplicaciones multimedia, hacían insuficientes los sistemas de 2G y 2,5G. Llegados a este punto, la ITU (*International Telecommunication Union*) comenzó el desarrollo de un sistema de tercera generación universal, el sistema IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications*). En vista de no poder englobar los intereses de todos los países en un único sistema, el IMT-2000 pasó a conformar una familia de sistemas, como el UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) europeo o el CDMA2000 estadounidense, entre otros de menos importancia [5].

El objetivo de los sistemas 3G era alcanzar unas tasas mínimas de 144 kbps para entornos vehiculares a gran velocidad, 384 kbps para espacios abiertos (peatonales) y de 2 Mbps para entornos interiores de poca movilidad (terminal estático). Esto permitía que los terminales adaptados a esta generación tuvieran una amplia gama de servicios asociados, desde llamadas telefónicas, acceso a Internet, envío de correos electrónicos, acceso a redes LAN corporativas, transferencias de archivos e imágenes de alta calidad, servicios de videoconferencia, entre muchas otras [5].

En 1999 se publicó el que fue el primer sistema, el UMTS, conocido como UMTS *Release 99*. En esta versión se pueden encontrar dos modos de operación para el acceso radio: el modo FDD usando la técnica de acceso múltiple W-CDMA (*Wideband CDMA*), donde el canal físico lo define un código ortogonal y una frecuencia, y el modo TDD (*Time Division Duplex*) empleando la técnica de acceso TD-CDMA (*Time Division-CDMA*), donde el canal físico lo define un código ortogonal, una frecuencia y un *time slot*. El uso de la técnica de acceso múltiple CDMA implica un cambio en la arquitectura de los sistemas GSM/GPRS/EDGE, donde se tiene la posibilidad de emplear un reuso frecuencial de factor 1, controlando siempre las interferencias intercelulares, para obtener de esta manera una gran eficiencia espectral.

En la siguiente figura se muestra la arquitectura del sistema UMTS Release 99. La tecnología UTRAN está formada por diversas capas totalmente independientes unas de otras, esto facilitaría en un futuro una posible modificación de una parte de esta tecnología sin necesidad de volver a crear otra de nuevo, solo bastaría con modificar algunas de sus capas.

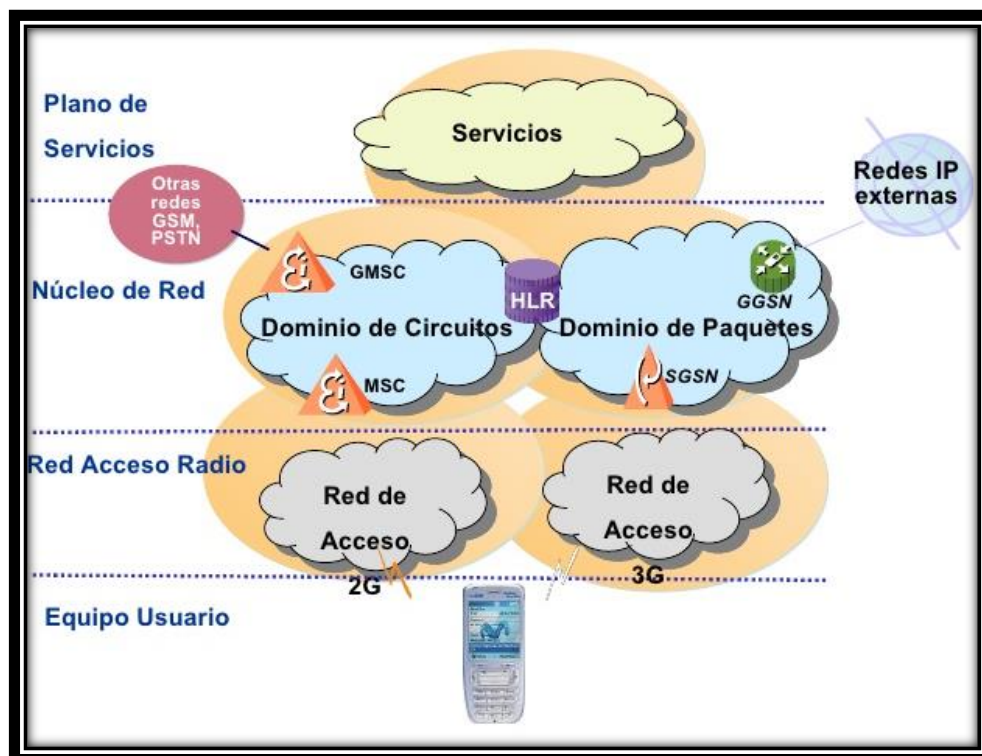
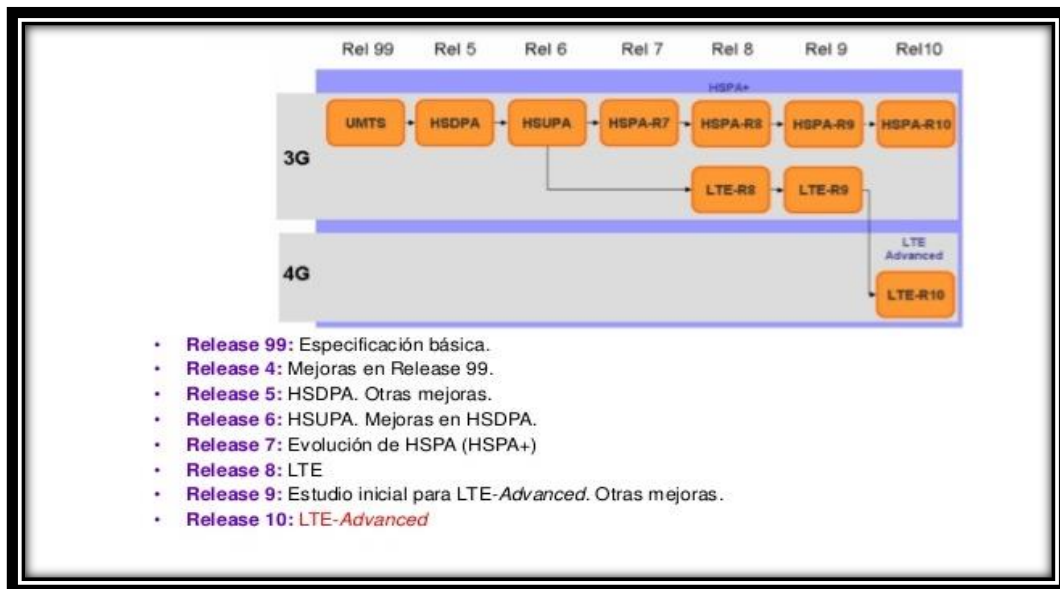


Figura 7: Arquitectura de la red GSM/GPRS +UMTS Release 99.

Las mejoras más importantes de las características del acceso radio UMTS se introdujeron en el *Release 5*, mediante la adición del HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y en el *Release 6* con el HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). El HSPA es una tecnología que mejora el tiempo de servicio entre paquetes introduciendo mayores velocidades y menores retardos. Asimismo, mantiene una buena calidad en la cobertura y en la capacidad del sistema. Para lograr esto, el HSPA introduce nuevos esquemas de modulación a mayor nivel, control rápido de potencia, *fast scheduling* y mecanismos de retransmisión híbrida HARQ con redundancia incremental. De esta manera se pueden lograr velocidades de 14,4 Mbps en el enlace descendente y de 5,7 Mbps en el enlace ascendente [9].

A continuación, en la figura 8 se muestran las diferentes *Releases* de la tecnología de UMTS. En ellas, se puede observar la evolución tecnológica que se ha ido realizando en diferentes fases a lo largo del tiempo.



**Figura 8: Evolución de la tecnología UMTS.**

Como ya se ha comentado anteriormente, el sistema de tercera generación CDMA2000 fue desarrollado por la 3GPP2 como una evolución del sistema IS-95, siendo compatible con el mismo. En el sistema CDMA2000 se incorporaron las tecnologías WCDMA/HSPA para mejorar las tasas de transmisión de datos y mejorar el rendimiento de la red. La evolución de este sistema se llevó a cabo en distintas fases. Primero surgió el CDMA2000 1xRTT, que posteriormente derivó a dos ramas paralelas, EV-DO (*Evolution Data-Only*) y el EV-DV (*Evolution for integrated Data and Voice*), siendo capaces de otorgar velocidades de transmisión superiores a 2 Mbps [9].

### 2.3.4 Sistemas móviles de cuarta generación (4G)

Al principio del capítulo se ha observado que, a día de hoy, prácticamente el 100% de la población mundial es usuario de la telefonía móvil. Pero ahora ya no bastan los terminales que solamente consigan establecer una comunicación punto a punto o que tengan asociado un servicio de mensajería. El continuo crecimiento de la demanda de los servicios de paquetes de datos, junto con la posibilidad de hacer cada vez terminales más avanzados, aptos para ofrecer aplicaciones con mayores capacidades (imagen, música, video y otras aplicaciones multimedia) es lo que ha llevado a la necesidad de crear una cuarta generación de comunicaciones móviles.

En este sentido, la ITU-R estableció los requisitos mínimos que debían cumplir las redes de esta nueva generación bajo el nombre de IMT-Advanced. Estos requisitos están dedicados a la nueva red, orientados a una red basada completamente en la conmutación por paquetes, con una arquitectura plana basada en el protocolo IP (*Internet Protocol*), velocidades de transferencia de datos mayores a 100 Mbps para altas movilidades, de 1 Gbps para entornos relativamente fijos, interoperabilidad con los estándares existentes, canalizaciones flexibles, menores tiempos de latencia, entre otros [10].

Tal y como muestra la siguiente figura, han sido tres las organizaciones que se han encargado de desarrollar estándares de comunicaciones móviles con el fin de cumplir los requisitos del IMT-Advanced. La 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) empezó a definir el estándar LTE (*Long Term Evolution*) a finales del 2004, que evolucionó a LTE-Advanced a finales de 2008. Por otro lado, la IEEE creó la familia 802.16, conocida como WiMAX. Una rama de esta familia, la 802.16m, también conocida como WirelessMAN-Advanced, ha sido aprobada por la ITU-R como una tecnología IMT-Advanced. Por último, la 3GPP2 comenzó el desarrollo del sistema UMB (*Ultra Mobile Broadband*) como una evolución del sistema CDMA2000 con la intención de convertirse en 4G, pero el proyecto no se llegó a finalizar, dando esta organización su apoyo al estándar LTE.

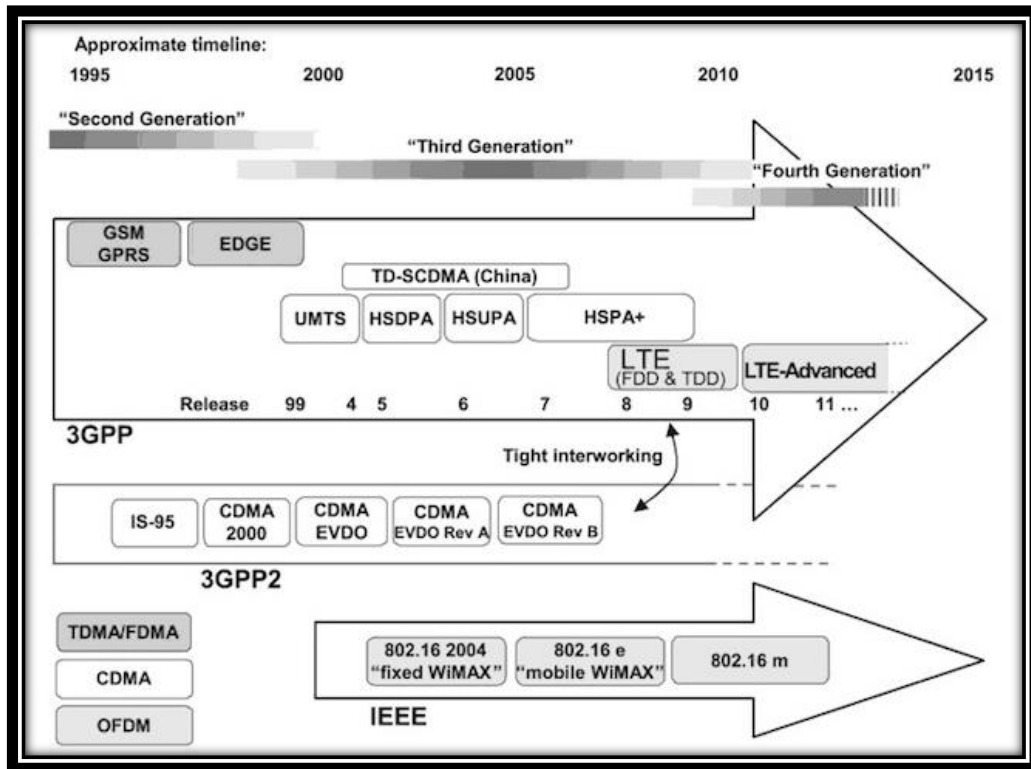


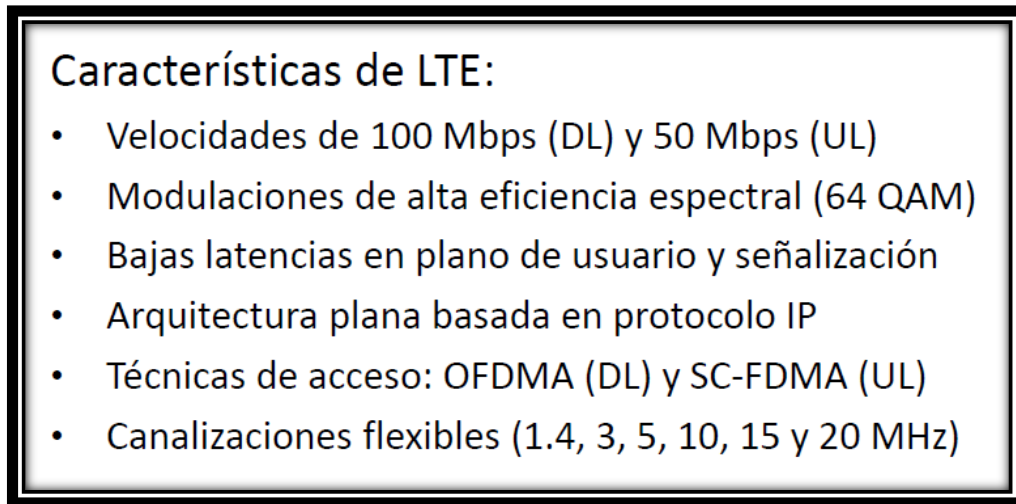
Figura 9: Estándares de comunicaciones móviles.

Con esto se finaliza la exposición de las características más relevantes de cada una de las generaciones de comunicaciones móviles. A continuación, debido a que es el sistema sobre el que trabajaremos durante el presente proyecto, se pretende exponer el principio de operación de la tecnología LTE y las diferentes características de su sistema.

## 2.4 Sistema LTE

El sistema LTE fue diseñado por la 3GPP con la idea de incrementar, en gran medida, las capacidades que ofrecían las anteriores generaciones de comunicaciones móviles. El sistema LTE introduce gran variedad de modificaciones, pero quizá la más novedosa es la de ofrecer todos los servicios del sistema, incluida la voz soportada, sobre un protocolo de IP, dejando atrás la conmutación de circuitos para pasar a un nuevo sistema basado completamente en conmutación de paquetes. Algunas de las novedades introducidas con el lanzamiento de este nuevo sistema se observan en la figura adjunta [4].





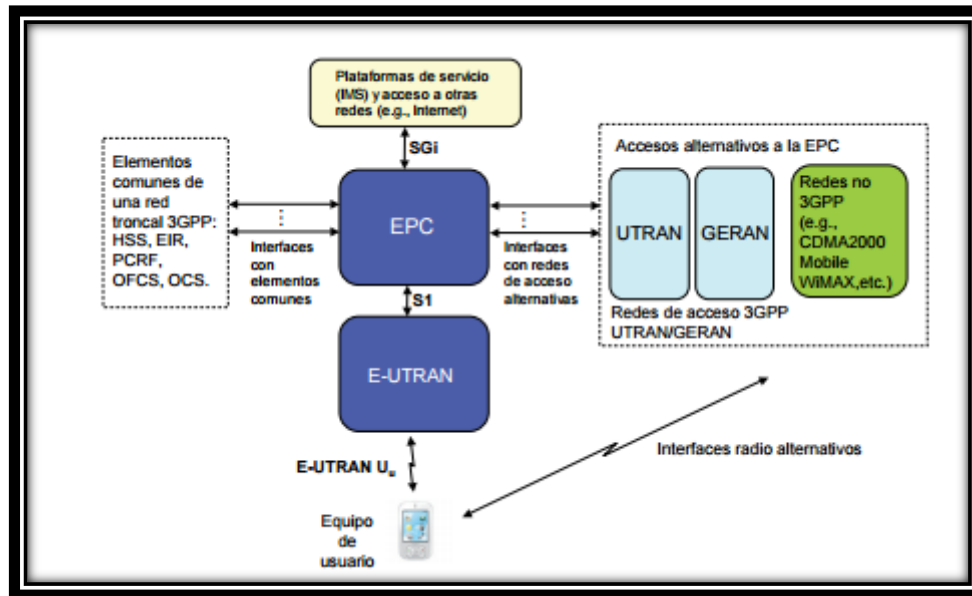
**Figura 10: Características del sistema LTE.**

**Fuente: Extraído de [4].**

En este apartado se va a presentar la arquitectura del sistema LTE, la red de acceso y la red troncal y se describirán las tecnologías a nivel físico que conforman este sistema (OFDMA, SC-FDMA, MIMO), así como las características principales de la interfaz radio del sistema.

### 2.4.1 Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura del sistema LTE se diseñó en base a tres requisitos fundamentales: reducción de costes, baja latencia y la necesidad de usar únicamente conmutación de paquetes. Para conseguir esto se planteó una estructura plana, sin nivel jerárquico y con la menor cantidad de nodos e interfaces posibles. La arquitectura de este sistema (véase la figura 11) comprende una nueva red de acceso denominada E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y un nuevo dominio de paquetes EPC (*Evolved Packet Core*) de la red troncal. La combinación de estas dos redes recibe el nombre de EPS (*Evolved Packet System*) [11].



**Figura 11: Arquitectura del sistema LTE.**

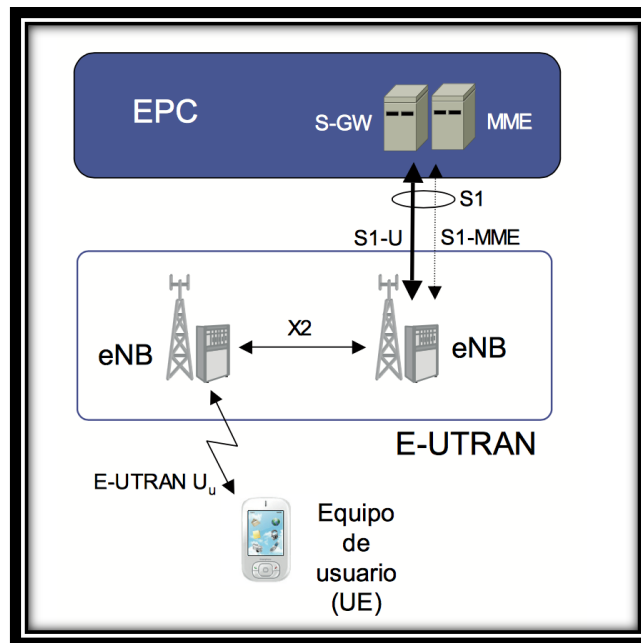
**Fuente: Extraído de [11].**

Finalmente, aunque no quede reflejado en la figura anterior, es importante destacar que la interconexión de los diferentes equipos físicos donde se ubicarían las funciones tanto de la red troncal EPC como de la red de acceso U-TRAN, se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP. De esta forma, la red física que se utiliza para interconectar los diferentes equipos de una red LTE, y que se denomina comúnmente como red de transporte, es una red IP convencional. Por tanto, la infraestructura de una red LTE, además de los equipos propios que implementan las funciones del estándar 3GPP, también integra otros elementos de red propios de las redes IP tales como *routers*, servidores DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores DNS (*Domain Name Server*) para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP [11].

## 2.4.2 Red de acceso evolucionada: E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso LTE se compone de una única entidad de red denominada eNB (*evolved NodeB*) que constituye la estación base de E-UTRAN. Esta estación base integra todas las funcionalidades de la red de acceso. Esto representa un cambio respecto a las anteriores generaciones, GSM y UMTS, ya que en estas la red de acceso estaba compuesta por estaciones base (BTS, NodoB) y equipos controladores (BSC y RNC) respectivamente [11].

La red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los UE (*Users Equipment*) y la red troncal EPC, hecho que hace que sea denominada una arquitectura plana. Véase la figura adjunta para una mejor comprensión [11].



**Figura 12: Red de acceso E-UTRAN.**  
Fuente: Extraído de [11].

Las funciones que realizan los eNBs incluyen, desde la gestión de recursos radio (control de *Radio Bearers*, control de admisión radio, control de movilidad, *packet scheduling* y asignación dinámica de recursos tanto en el enlace *uplink* como en el *downlink*), hasta compresión de cabeceras, pasando por gestionar la seguridad de la interfaz radio y la conectividad con la red troncal EPC. Es decir, todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB [11].

Para llevar a cabo todas las funciones antes mencionadas, los eNBs deben estar interconectados a los equipos de usuario (UE) mediante la interfaz E-UTRAN Uu, donde aplican los protocolos AS (*Access Stratum*). Asimismo, la interfaz que existe para conectar los eNBs entre sí es la X2. La otra interfaz que falta por mencionar es la S1, que conecta un eNB a la red troncal de EPC. Esta interfaz se divide en S1-MME para el plano de control y en S1-U para plano de usuario [11]. Observando la figura anterior se puede obtener una mejor comprensión de los conceptos que acaban de ser introducidos.

### 2.4.3 Red troncal de paquetes evolucionada: EPC

El diseño de la red troncal EPC ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explotar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN. El núcleo de la red troncal EPC está formado por tres entidades de red: MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y el P-GW (*Packet Data Network Gateway*), que junto a la base de datos principal del sistema, denominada HSS (*Home Subscriber Server*), constituyen los elementos principales para la prestación del servicio de conectividad IP entre los equipos conectados al sistema a través de la red de acceso E-UTRAN y las diferentes redes externas a las que se conecta la red troncal EPC [11].

A continuación, se definen las diferentes entidades de red mencionadas:

**MME:** Es el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. Todo terminal que se encuentre registrado en la red LTE y sea accesible a través de E-UTRAN, tiene una entidad MME asignada. La elección de MME se realiza dependiendo de varios factores tales como la ubicación geográfica de terminal, así como criterios de balanceo de carga. Las principales funciones de esta entidad son:

- Autenticación y autorización del acceso de los usuarios a través de E-UTRAN.
- Gestión de los servicios portadores EPS (*EPS Bearer Service*). Encargada de gestionar la señalización que se necesita para establecer, mantener, modificar y liberar los servicios portadores.
- Gestión de movilidad de los usuarios en modo *idle* (son terminales que no tienen establecida ninguna conexión de control con E-UTRAN pero están registrados en la red LTE).
- Señalización para el soporte de movilidad entre EPS y otras redes externas.

**S-GW:** Es la pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Como el caso anterior, todo usuario registrado en la red LTE posee una entidad S-GW en la red EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario. Sus características principales son:

- Proporciona un punto de anclaje en la red EPC con respecto a la movilidad del terminal de usuario entre eNBs.
- Este anclaje también se aplica para la gestión de la movilidad con otras redes de acceso del 3GPP (UMTS y GSM).
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que los terminales se encuentran en modo idle.
- Encaminamiento de tráfico de usuario. Esta entidad albergará la información y funciones de encaminamiento necesarias para dirigir el tráfico de subida hacia la pasarela P-GW que corresponda y el tráfico de bajada hacia el eNB.

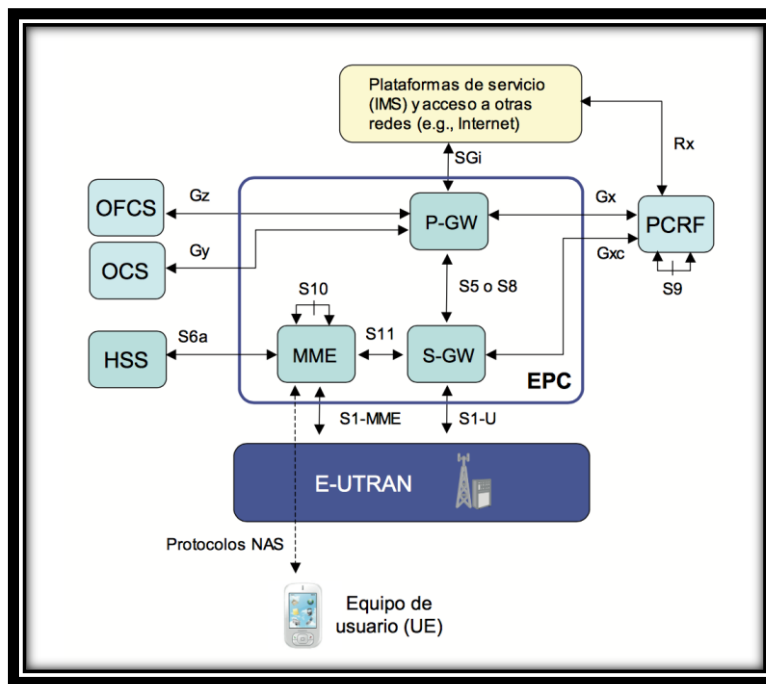
**P-GW:** Es el ente encargado de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Por lo tanto, un paquete IP generado por la red LTE inicialmente es invisible para la red externa, pero a través de la entidad P-GW se puede hacer “visible” para otras redes. Un usuario tiene asignado como mínimo una pasarela P-GW desde su registro en la red LTE. Las principales características de esta entidad de red son las siguientes:

- Aplicación de reglas de uso de red y control de tarificación a los servicios portadores establecidos en el terminal.
- La asignación de la dirección IP de un terminal usada en una determinada red externa se realiza desde la pasarela P-GW que corresponda.
- Actúa de punto de unión para la gestión de la movilidad entre LTE y las redes externas no pertenecientes a 3GPP (WiMAX, WiFi, CDMA2000, etc.)
- El tráfico IP que transcurre a través de la pasarela P-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio EPS que

corresponda.

**HSS:** Es la base de datos principal que almacena los datos de todos los usuarios de la red. La información almacenada contiene todo lo relativo a la suscripción del usuario como lo necesario para la operatividad de la red. Esta base de datos es consultada y modificada desde las diferentes entidades de red encargadas de prestar los servicios de conectividad o servicios finales (desde el MME de red troncal y también de los servidores de control del subsistema IMS). La información almacenada en la HSS que se puede encontrar es la siguiente: identificadores universales de usuario, identificadores de servicio, información de seguridad y cifrado, información relacionada con la ubicación de un usuario en la red, etc. HSS se estandarizó en la R5 del 3GPP en base a la integración de dos entidades definidas en redes GSM y que se denominan HLR y AuC, a las que se las ha añadido funcionalidades adicionales necesarias para soportar el acceso y la operativa del sistema LTE.

Finalmente, se adjunta una figura que resume el funcionamiento del núcleo de la red troncal EPC donde entran en acción todos los parámetros definidos anteriormente.



**Figura 13: Arquitectura básica de la red troncal EPC.**  
Fuente: Extraído de [11].

## 2.4.4 Tecnologías a nivel físico: OFDMA, SC-FDMA y MIMO

En este apartado se definen los fundamentos más importantes del nivel físico que se implementa en el sistema LTE y que permite alcanzar mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio que los sistemas predecesores. En el enlace descendente se usa la técnica de acceso múltiple denominada OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y para el enlace ascendente, la técnica denominada SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*). Además puede usar la transmisión y recepción con múltiples antenas, que es globalmente conocida como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

### 2.4.4.1 OFDMA

La técnica de acceso múltiple OFDMA utilizada en el enlace descendente del sistema LTE ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto, permite alojar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes.

El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. El sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos. En la Figura 14 se muestra una representación del espectro de la señal OFDMA.

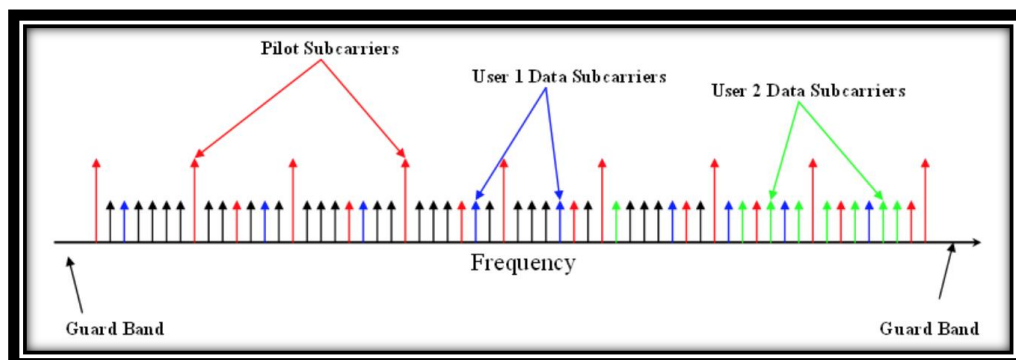


Figura 14: Espectro de la señal OFDMA.

Fuente: Extraído de [12].

A modo de anotación, cabe decir que no es necesario que las subportadoras sean contiguas, los símbolos de un usuario pueden estar distribuidos sobre subportadoras no contiguas.

Esta técnica de acceso presenta bastantes ventajas, de las cuales se podrían considerar las siguientes como principales:

- **Diversidad multiusuario:** La asignación de subportadoras se realiza de manera dinámica. Como el canal radio es inestable, presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, se puede seleccionar para cada subportadora el usuario que presente un mejor estado del canal. Así se consigue una mayor velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. No obstante, hay diferentes criterios para la asignación de subportadoras, uno de ellos es el denominado *scheduling* que ha aparecido en ocasiones anteriores.
- **Diversidad frecuencial:** Cabe la posibilidad de asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, separadas suficientemente como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que nos proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.
- **Robustez frente al multitrayecto:** Gracias a la utilización de un prefijo cíclico, esta técnica es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica (ISI), resultante de la propagación multitrayecto y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan menos complejas que las que se realizan en el dominio del tiempo.
- **Flexibilidad en la banda asignada:** Esta técnica de acceso múltiple proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de las necesidades de servicio requeridas por cada usuario, simplemente asignando más o menos subportadoras a cada usuario.
- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** Como se subdivide la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, lo que facilita acomodar servicios con diferentes requisitos de calidad.

También presenta algunos inconvenientes. Estos son los más destacables:

- **Poca eficiencia en el consumo de potencia:** La relación entre potencia de pico envolvente de la señal y la potencia media, PAPR (Peak Average Power Ratio), es muy elevada, lo que obliga a utilizar amplificadores de alta linealidad.
- **Es muy sensible a los offsets de frecuencia y al ruido de fase.**
- **Aunque presenta robustez frente al multitrayecto gracias al prefijo cíclico, el uso de este genera una reducción en la velocidad de transmisión.**

## 2.4.4.2 SC-FDMA

Como ya se ha comentado anteriormente, en LTE se utiliza la técnica OFDMA para el enlace descendente. Esta técnica presenta una mala PAPR, no obstante ese problema se soluciona con amplificadores de alta linealidad aunque esto requiera el consumo de más potencia. Sin embargo, en el terminal del usuario es crítico reducir el consumo de potencia, por lo que se utiliza una técnica de acceso de portadora única.

SC-FDMA es una nueva técnica de modulación híbrida, que combina la robustez frente a la propagación multicamino y flexibilidad de ubicación de las subportadoras propia de los sistemas OFDM con menor PAPR propia de las modulaciones con portadora única.

Esta tecnología reduce el nivel de los picos de potencia en el dominio del tiempo pero aumenta la potencia radiada fuera de banda en el dominio frecuencial. También genera una pérdida de sensibilidad entre 2 y 3 dB en canales con desvanecimientos.

Finalmente, resulta de interés mencionar que esta técnica permite dos modos de mapeo de las subportadoras. Uno de ellos es el modo localizado, el cual hace que los usuarios tengan subportadoras contiguas. Este es el modo de operación elegido para LTE.

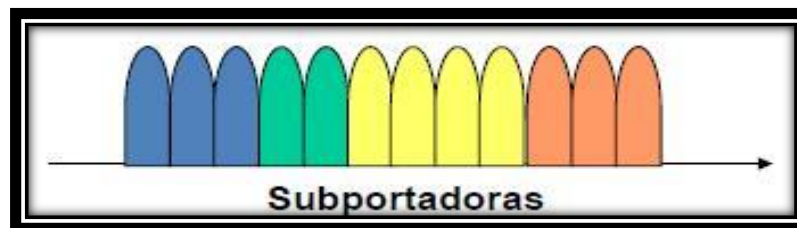


Figura 15: SC-FDMA en modo localizado.

El otro modo es el distribuido, que tiene dos formas de operar. Una de ellas se denomina interleaved FDMA-IFDMA, el cual se caracteriza porque las subportadoras son equidistantes unas de otras. La otra forma de operar se denomina FDMA distribuido puro, en el cual no hay una distribución uniforme de las subportadoras en la banda disponible.

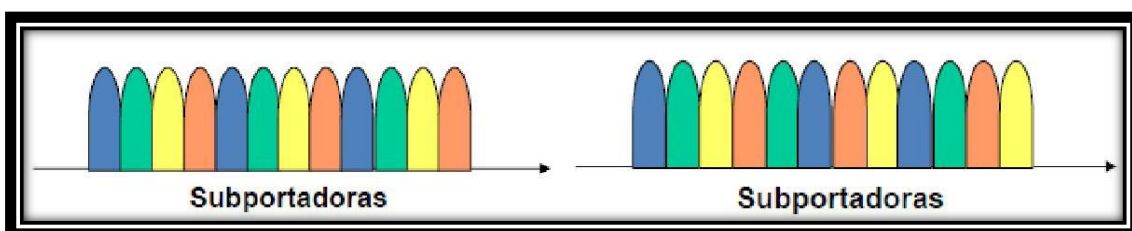


Figura 16: SC-FDMA modo distribuido (Interleaved FDMA – IFDMA, FDMA distribuido puro).



### 2.4.4.3 MIMO

El sistema MIMO utiliza múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir señal. Una transmisión de datos a tasa elevada se divide en múltiples tramas más reducidas. Cada una de ellas se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Debido a reflexiones por multitrayecto, en recepción la señal a la salida de cada antena es una combinación lineal de múltiples tramas de datos transmitidas por cada una de las antenas en que se transmitió.

Las tramas de datos se separan en el receptor usando algoritmos que se basan en estimaciones de todos los canales entre el transmisor y el receptor. Además de permitir que se multiplique la tasa de transmisión (al tener más antenas), el rango de alcance se incrementa al aprovechar la ventaja de disponer de antenas con diversidad.

La teoría de la capacidad inalámbrica, extiende el límite del teorema de Shannon, en el caso de la utilización de esta tecnología. Este resultado teórico prueba que la capacidad de transmisión de datos y rango de alcance de los sistemas inalámbricos MIMO se puede incrementar sin usar más espectro de frecuencias. Este aumento es de carácter indefinido, simplemente utilizando más antenas en transmisión y recepción y teniendo una calidad de canal aceptable. MIMO requiere la existencia de un número de antenas idéntico a ambos lados de la transmisión, por lo que en caso de que no sea así, la mejora será proporcional al número de antenas del extremo que menos antenas tenga. En la figura 17 se muestra este efecto:

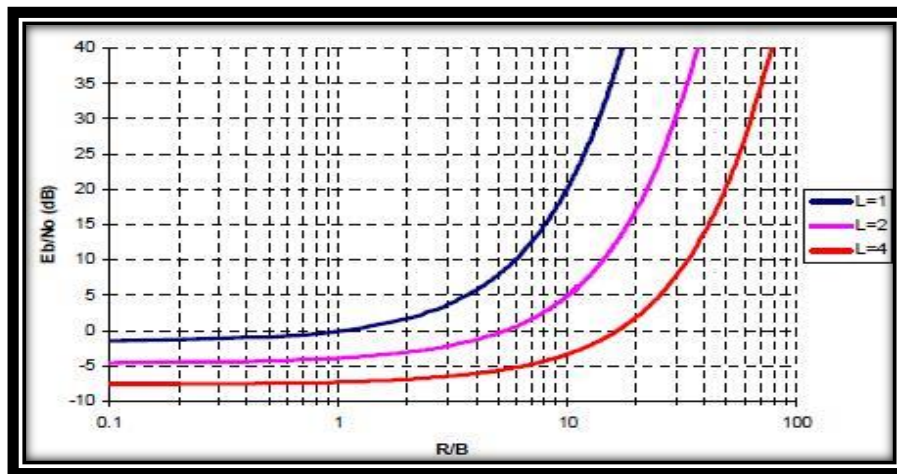


Figura 17: Efecto del número de antenas en MIMO.

Fuente: Extraído de [11].

Donde  $L$  es el número de antenas,  $R$  la tasa de transmisión,  $B$  el ancho de banda y  $E_b/N_0$  la relación señal a ruido del canal. Puede observarse que para una  $E_b/N_0$  fijada, con un número mayor de antenas puede obtenerse mayores tasas de transmisión.

## 2.4.5 Conceptos de interfaz radio

En este apartado se va a especificar las características más importantes del interfaz radio del sistema LTE, su capa física, el concepto de *Physical Resource Block*, los diferentes canales radio asociados a los enlaces y el concepto de reuso frecuencial.

### 2.4.5.1 Capa Física

La capa física de la interfaz radio del sistema LTE se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el ascendente. En ambos casos, la separación entre subportadoras es fija e igual a 15kHz [11]. A continuación, en la figura 18 se va a mostrar la canalización del sistema LTE en función del número de subportadoras:

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

**Figura 18: Canalización del sistema LTE.**

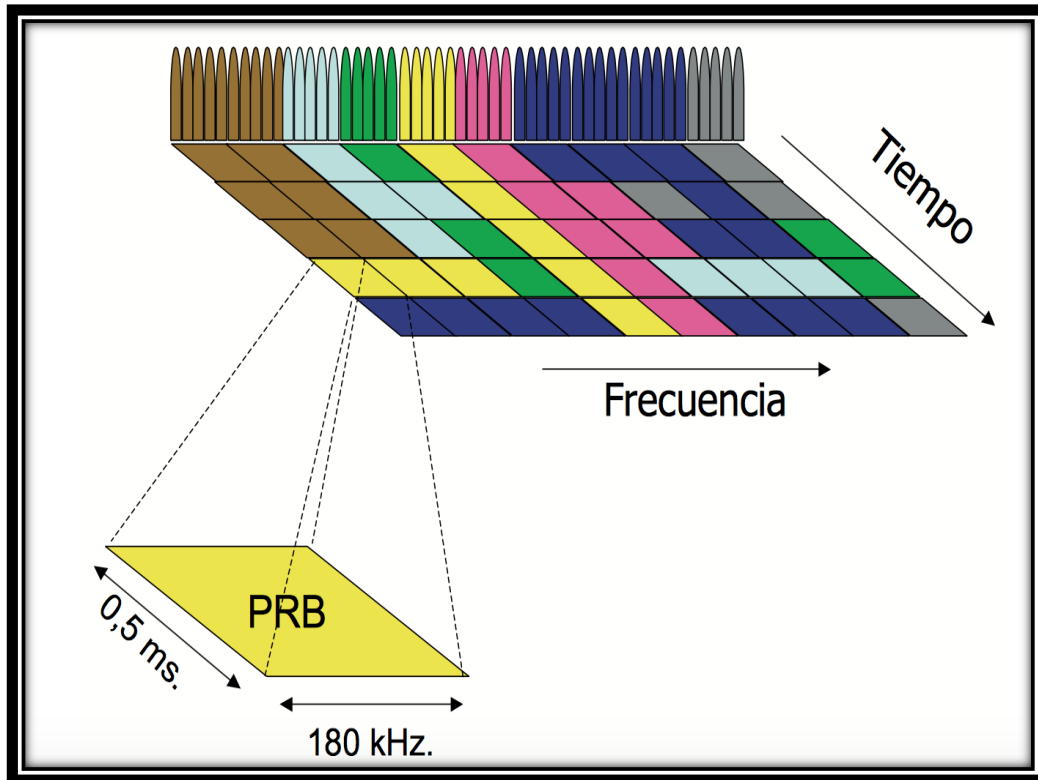
**Fuente: Extraído de [11].**

La capa física del sistema LTE está diseñada para que el sistema opere en las bandas de UHF, es decir, por encima de los 450 MHz y hasta los 3,5 GHz. El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación para trabajar en modo FDD o TDD [11]. Las diferentes bandas en las que opera el sistema LTE se pueden encontrar en el anexo 1 del proyecto.

Los posibles esquemas de la modulación para el enlace descendente son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Para el enlace ascendente serán también QPSK, 16-QAM, 64-QAM dependiendo de la capacidad del terminal móvil [11].

### 2.4.5.2 Bloque Recursos Físicos (*Physical Resource Block*)

Se denomina PRB (*Physical Resource Block*) al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa 180 kHz de banda, equivalente a 12 subportadoras equiespaciadas 15 kHz entre ellas. En él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico. La duración de un PRB es de 0,5 ms, es decir, la duración de un slot o ranura de tiempo [11]. En la siguiente figura se muestra el número de PRB en función de la canalización.



**Figura 19: Número de PRBs en función de la canalización.**  
 Fuente: Extraído de [11].

Cabe subrayar que el número de portadoras disponibles está relacionado con el número de PRBs de cada canal. Por lo tanto, el número de subportadoras es 12 veces el número de PRBs más una, ya que se considera la subportadora central (la de DC), que no se utiliza para transmitir información [11].

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

**Figura 20: Concepto de Radio Bloque.**  
 Fuente: Extraído de [11].

En un PRB se tienen como máximo 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, por lo que tenemos en total 84 recursos donde introducir los símbolos QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Considerando la modulación de mayor eficiencia espectral, 64-QAM en la que se transmiten 6 bits/símbolo, dentro de un PRB podremos enviar un total de 504 bits cada 0,5 ms, lo que nos ofrece una velocidad bruta de transmisión de pico de aproximadamente  $R_b, PRB=504 \text{ bits}/0,5 \text{ ms} \approx 1 \text{ Mb/s}$  [11].

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Velocidad de Pico Total (Mb/s)	$\cong 6$	$\cong 15$	$\cong 25$	$\cong 50$	$\cong 75$	$\cong 100$
Velocidad de pico bruta de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	$\cong 5,1$	$\cong 12,8$	$\cong 21$	$\cong 42,5$	$\cong 63,7$	$\cong 85$

**Figura 21: Velocidades de pico posibles en función de la canalización.**

**Fuente: Extraído de [11].**

En la figura 21 se resumen las velocidades de pico en función de la canalización. Estos cálculos se han llevado a cabo sin tener presente la estructura MIMO.

### 2.4.5.3 Canales Físicos

A diferencia de otros sistemas móviles como GSM o UMTS, el estándar LTE no contempla el uso de canales dedicados sino compartidos. Es decir, sólo se establecen cuando un usuario (cualquier terminal móvil) debe recibir datos destinados a él.

Además de los canales dedicados a la transmisión de datos por parte del usuario, para permitir una transmisión eficiente de esta información se necesitan los denominados canales físicos de control, que son los encargados de transportar una determinada señalización.

A continuación, se adjuntan diferentes figuras en las que se muestran los diferentes canales físicos, así como una breve descripción de cada uno de ellos, tanto en el enlace ascendente como en el descendente.

Nombre Canal	Descripción
<i>Physical Downlink Shared Channel</i> (PDSCH)	Transmite información de usuario, de control tanto dedicada como común (p.e., aviso o <i>paging</i> , y de ciertos parámetros de radiodifusión)
<i>Physical Multicast Channel</i> (PMCH)	Se utiliza para transportar información MBMS destinada a los usuarios unicast en redes isofrecuencia (SFN)
<i>Physical Broadcast Channel</i> (PBCH)	Transporta la información de radiodifusión básica de la red, que permite la conexión inicial de un terminal móvil a la misma.
<i>Physical Downlink Control Channel</i> (PDCCH)	Canal de control genérico del enlace descendente. Informa sobre los recursos en el enlace descendente asignados al PDSCH.
<i>Physical Control Format Indicator Channel</i> (PCFICH)	Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos (1,2 ó 3) utilizados para transmitir el PDCCH.
<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i> (PHICH)	Transporta información de reconocimientos (ACK/NACK) correspondientes a las transmisiones del enlace ascendente.

**Figura 22: Canales físicos del enlace descendente.**

Fuente: Extraído de [11].

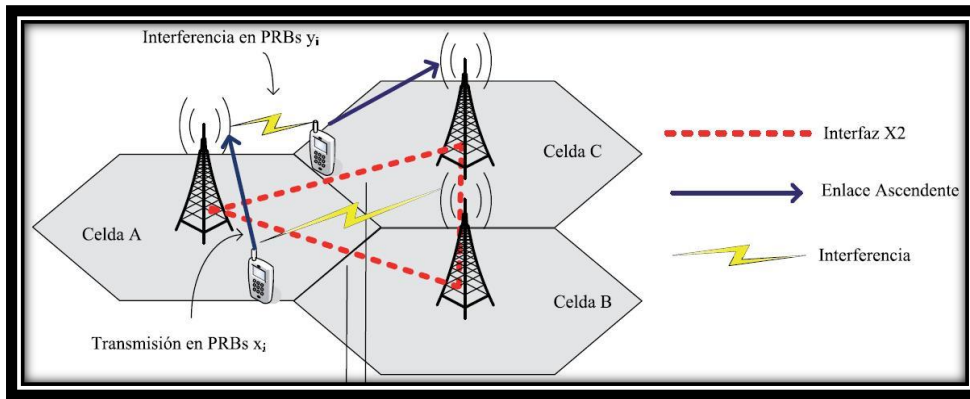
Nombre Canal	Descripción
<i>Physical Uplink Shared Channel</i> (PUSCH)	Transmite información de usuario y de control dedicada procedente de capas superiores a la capa física.
<i>Physical Uplink Control Channel</i> (PUCCH)	Contiene información de control del enlace ascendente. En particular transmite: Peticiones de asignación de recursos ( <i>Scheduling Request</i> ); Reconocimientos (ACK/NACK) correspondientes al enlace descendente, información de la calidad del canal ( <i>Channel Quality Indicator-CQI</i> ).
<i>Physical Random Access Channel</i> (PRACH)	Canal físico de acceso aleatorio. Envía un preámbulo para iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema..

**Figura 23: Canales físicos del enlace ascendente.**

Fuente: Extraído de [11].

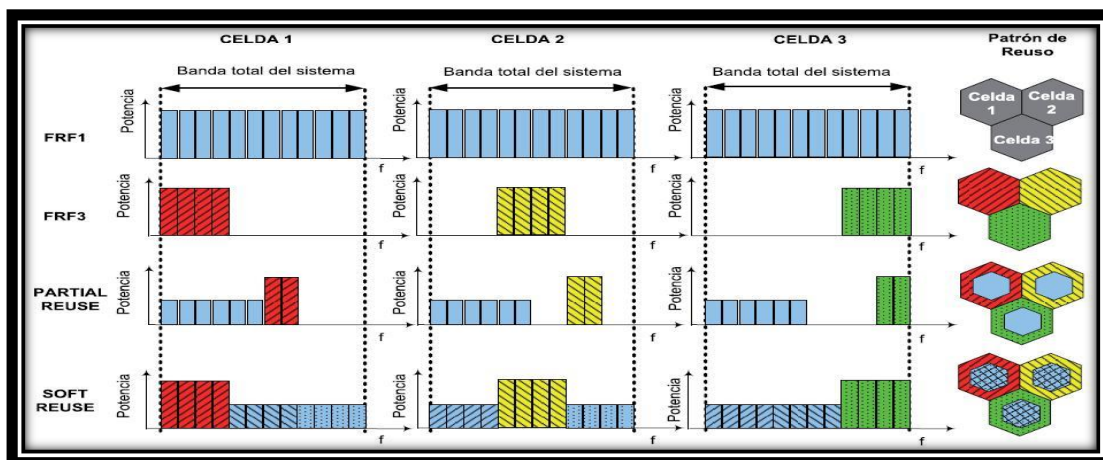
## 2.4.6 Reúso frecuencial

El esquema de acceso radio de LTE proporciona ortogonalidad entre los usuarios de una misma celda, tanto en el enlace ascendente como descendente. En general, y por ese motivo, las prestaciones de LTE en términos de eficiencia espectral y tasas de transmisión de pico están más limitadas por las interferencias provenientes de celdas vecinas en comparación con lo que sucedía en las tecnologías de tercera generación (3G). Por lo tanto, cualquier técnica que permita reducir las interferencias entre celdas se traducirá en una mejora en las prestaciones del sistema LTE en términos de calidad de servicio que se pueda ofrecer a usuarios en los límites (bordes) de las celdas. La figura 24 muestra esta situación:



**Figura 24: Interferencia intercelular de LTE.**  
Fuente: Extraído de [11].

La coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) es una técnica integrada en el grupo de funciones del *scheduler*, mediante la cual se controla el nivel de interferencia que reciben los usuarios en los bordes de las celdas para mejorar parámetros de calidad de servicio, en particular, su tasa de transmisión. Esta técnica implicará aplicar ciertas restricciones en las funciones de *scheduling* en el dominio de la frecuencia, tanto en el enlace ascendente como descendente, configurando el equivalente a esquemas de reuso en frecuencia distintos para el interior y el exterior de las celdas. Véase en la figura 25:



**Figura 25: Posibles esquemas de reuso de frecuencias en LTE implementados a través de una estrategia ICIC.**  
Fuente: Extraído de [11].

## 3.- Condiciones iniciales

---

El siguiente capítulo introduce, de forma general, las diferentes etapas que contiene el presente proyecto de fin de carrera, el *software* elegido y las consideraciones sobre el diseño y a la planificación previas al inicio del trabajo. Sin embargo, este episodio no pretende entrar en detalle en ninguno de los temas anteriormente citados ya que esto se mostrará en capítulos posteriores.

### 3.1 Metodología

En una primera fase, se ha realizado una precisa indagación teórica acerca de los sistemas de comunicaciones móviles y de su evolución para así poder situar al lector en contexto. A partir de aquí, se ha elaborado un exhaustivo estudio sobre el estándar LTE, del 3GPP, mediante lecturas de libros, webs y artículos de investigación, con el objetivo de familiarizarse con los diversos parámetros de esta tecnología, entender el funcionamiento de los mismos y como pueden afectar a la planificación y dimensionado de una red de esta naturaleza.

La segunda fase ha consistido en aprender a manejar la versión 3.3.0 de la herramienta ATOLL. Para ello, ha sido inapelable realizar un repaso al manual *“Atoll User Manual Radio”* con el fin de revisar los términos relacionados con las redes LTE y familiarizarse con cada parámetro del programa. Posteriormente, ha sido necesario inspeccionar el manual *“Technical Reference Guide”* que contiene las descripciones detalladas de los modelos, algoritmos y conceptos adoptados en ATOLL. Por otra parte, se ha usado como ayuda puntual el material elaborado en la asignatura *“Laboratorio de Comunicaciones Móviles”*, puesto que en la asignatura se muestran de forma guiada y clara diferentes parámetros, simulaciones y consideraciones previas que hay que tener presentes a la hora de trabajar con el *software* de Forsk, ATOLL.

Una vez conocido el modo de funcionamiento de ATOLL, en la tercera fase se ha procedido a desarrollar la planificación y dimensionado de la red LTE en el municipio de Sitges.

A posteriori, se ha llevado a cabo la optimización de la red y se han realizado diversas simulaciones y predicciones.

La última fase ha consistido en el tratado y análisis de los datos para que, una vez analizados los resultados, se establezcan y presenten una serie de conclusiones en base a los mismos.

## 3.2 Elección de ATOLL como herramienta de trabajo.

ATOLL es un *software* para planificación y optimización radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificación de sus redes y estudiar el comportamiento de las mismas para optimizarlas de la mejor manera posible. Es a partir del año 2008 cuando ATOLL empieza a incluir un módulo LTE que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN. Además, con la versión 3.3.0, ATOLL ofrece la posibilidad de crear redes avanzadas de múltiples tecnologías, como por ejemplo GSM/UMTS/LTE, CDMA2000/LTE, haciéndolo un *software* ideal para aquellos operadores que necesitan migrar sus redes hacia LTE.

Una vez hallado que ATOLL satisface nuestras necesidades, cabe remarcar que la elección de este *software* es factible gracias a que el Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GRCM) dispone de licencias de ATOLL para la realización de proyectos para la docencia.

A continuación, se ha creído conveniente elaborar una breve descripción de algunos términos referentes a ATOLL con la finalidad de introducir al lector en dicha terminología y facilitar la comprensión del actual proyecto:

- **Station Template:** Contiene las características de la estación base que tenemos intención de utilizar. En ella se establecen una serie de parámetros de los eNBs, de forma que al agregar nuevas estaciones base sea posible configurarlas todas según la plantilla seleccionada.
- **Sectors:** Conceptualmente, un sector es una parte del total de una celda, que trabaja a una frecuencia específica y diferente a la del resto de sectores de esa celda para evitar posibles interferencias. Por tanto, dentro del *software* ATOLL, este parámetro responde al número de sectores que tendrá cada celda.
- **Antenna:** Se trata de la antena que se desea emplear. Esta permite el envío y la recepción de ondas electromagnéticas.
- **Tower Mounted Amplifier (TMA):** Hace referencia a un amplificador de bajo ruido.
- **Feeder:** No es más que el cable que conecta el TMA anteriormente definido con la antena.
- **Frequency band:** Resulta ser la banda de frecuencias disponibles para dar servicio en la red.
- **Channel width:** Es conocido como el bloque frecuencial con el que se divide la banda de frecuencias para obtener un número determinado de canales, es decir, es el bloque frecuencial encargado de realizar la canalización.
- **Frequency block (FB):** Es el elemento mínimo de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil.



- **Adjacent channel supression factor:** Registra la cantidad de decibelios que atenúa el canal adyacente.
- **Sampling frequency:** Se trata de la frecuencia a la que se muestrean los datos.
- **Frequency division duplex (FDD):** Es conocida como una técnica de duplexado que utiliza dos partes del espectro separadas para la transmisión en el enlace ascendente o descendente. Con esto se consigue la transmisión simultánea en ambos sentidos.
- **Time division duplex (TDD):** Define una técnica de duplexado que utiliza el mismo canal para enviar durante un tiempo información en un sentido y el resto del tiempo en el otro.
- **Radio Bearer (RB):** Es un esquema de modulación/codificación (MCS) usado para transmitir los datos a través del canal.
- **Bearer Selection Thresholds:** Alberga los umbrales de selección de un *Radio Bearer* (RB). Un *Radio Bearer* particular es seleccionado para la transferencia de datos en un determinado píxel si la relación  $C/(I+N)$  para dicho píxel es superior al valor del umbral de selección que hace referencia.
- **Traffic Loads:** Tal y como el propio nombre indica, hace referencia a las cargas de tráfico. Son porcentajes de las tramas uplink y downlink asignadas para el tráfico ascendente y descendente respectivamente.
- **Max traffic load:** No es más que la carga de tráfico máxima. Es el tráfico en el enlace descendente o ascendente que no puede ser excedido. Este límite es tomado en cuenta durante las simulaciones de Monte Carlo. Si el tráfico de la celda está limitado por este valor, entonces la celda no podrá tener una carga de tráfico superior a este máximo.
- **Propagation model:** Registran un conjunto de expresiones matemáticas y algoritmos usados para representar las características radio de un ambiente dado. Pueden ser empíricos, teóricos o una combinación de estos dos.
- **Scheduler:** Es el encargado de efectuar la selección de usuarios para la asignación de recursos y su administración según las clases de calidad de servicio (QoS) de los servicios que estén siendo usados por los usuarios elegidos.
- **Cell/User Equipment:** Se trata del equipo de la celda y del usuario respectivamente. En él se puede configurar la altura a la que estará el terminal, potencia, etc.
- **Site:** Es un emplazamiento, es decir, un punto geográfico donde está situada la estación base.
- **Transmitter:** Define al transmisor. Hace referencia a las características físicas de los equipos de transmisión y recepción de la estación base.

- **Cell:** Determina una celda. Define las características radio de la estación base de acuerdo al estándar LTE.
- **Computation Zone:** Alberga la zona de cálculo definida por el usuario. Es usada para definir el área donde ATOLL realizará los cálculos. A la hora de efectuar los cálculos, ATOLL, considera las estaciones base, tanto externas como internas a la zona de cálculo, siempre y cuando estas afecten a los resultados dentro de la zona.
- **C/N:** No es más que un indicador de la calidad de la señal recibida que relaciona el nivel de potencia de señal útil con el nivel de potencia de ruido, generalmente, en escala logarítmica (dB).
- **C/(I+N):** De forma análoga al caso anterior, se trata de un indicador de la calidad de la señal recibida que relaciona el nivel de potencia de señal útil con el nivel de potencia de ruido y el nivel de potencia de las señales interferentes, generalmente, en escala logarítmica (dB).
- **Mobility types:** Contiene los diferentes tipos de movilidades que puede tener un usuario, es decir, la velocidad a la que se desplaza un usuario. Si se trata de un usuario fijo, obviamente, la velocidad de desplazamiento es nula.  
Este parámetro es importante debido a que, en LTE, la información acerca de la movilidad del receptor es un factor necesario, tanto a la hora de determinar la selección de los umbrales de un *Radio Bearer* específico como en el momento de seleccionar las gráficas de calidad (Quality Graphs) a utilizar provenientes del equipo de recepción definido para el terminal o celda. En resumen, los móviles usados a altas velocidades no tienen las mismas características de calidad que los empleados a bajas velocidades y, además, los requisitos de C/(I+N) para los diferentes Radio Bearers dependen en gran medida de la velocidad de los móviles.
- **Terminals:** Proporciona la clase de teléfono que tiene el usuario y que puede ser utilizado en la red. Por ejemplo, se podría considerar un móvil 3G o 4G.
- **Services:** Contiene el tipo de servicio que puede contratar un usuario, como por ejemplo voz o datos.
- **Servers:** Reúne al conjunto de transmisores que dan señal a una zona determinada. Estos pueden ser interferentes.
- **User Profile:** Examina los tipos de usuarios que pueden haber en la red. Modela el comportamiento de diferentes categorías de usuarios. Cada perfil es definido por una lista de servicios que a su vez está definida por el terminal utilizado, las llamadas por hora, y la duración de estas (en el caso de llamadas de voz) o el volumen de tráfico ascendente y descendente (en el caso de llamadas de datos).
- **Environment:** Alberga los entornos implicados en el despliegue. Cada entorno tiene diferentes tipos de usuarios con una movilidad y una densidad para cada uno.

- **Simulaciones de Monte Carlo:** Son un método estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. ATOLL utiliza este algoritmo para generar la distribución de usuarios para cada simulación.
- **Generator Initialisation:** Valor ubicado dentro de las propiedades de las simulaciones, que permite definir la semilla a partir de la cual se genera la distribución de usuarios y el valor de *shadowing* en las simulaciones.
- **Shadowing:** Se trata de la desviación en la atenuación del desvanecimiento que afecta a una señal radio en determinados medios de propagación. Puede ser debido a la propagación por múltiples caminos o a la sombra producida por obstáculos que afectan a la propagación de la onda.
- **Path Loss:** Se refiere a la reducción de densidad de potencia (atenuación) de una onda electromagnética en un punto.
- **Link Budget:** Calcula la máxima atenuación permitida, es decir, el *path loss* máximo permitido. Este parámetro resulta esencial para determinar el tamaño de una celda.
- **Enlace ascendente (UL):** Hace referencia al canal radio establecido entre el usuario y la estación base en esta dirección.
- **Enlace descendente (DL):** Hace referencia al canal radio establecido entre la estación base y el usuario en esta dirección.
- **Throughput:** Es la tasa de entrega con éxito de los mensajes enviados sobre un canal de comunicación.
- **Inter-Cell Interference Coordination (ICIC):** No es más que un método utilizado para mejorar la calidad de la señal en el borde de las celdas. Dicha mejora se consigue a través del uso de diferentes frecuencias o *resource blocks* para la asignación de recursos en celdas que representen una posible interferencia entre sí. Existen dos categorías de técnicas de coordinación de interferencias usadas en los sistemas OFDMA: dinámica y estática.
- **AFP (Automatic Frequency Planner):** Se trata de una herramienta que permite a los ingenieros radio, a la hora de diseñar redes LTE, configurar automáticamente parámetros como canales de frecuencias y *physical cell IDs*.
- **Physical Cell ID:** Registra un número entero del 0 al 503. Los *physical cell IDs* están definidos en las especificaciones del 3GPP. Existen 504 identificadores únicos de la capa física. Los *physical cell IDs* están agrupados en 168 grupos de *cell ID* únicos (llamados *SSS IDs* en ATOLL), cada grupo contiene 3 identidades únicas (denominadas *PSS IDs* en ATOLL). Por tanto, un *SSS ID* es único y está definido por un número entre 0 y 167 y, un *PSS ID* está definido por un número del 0 al 2. Cada señal de referencia de la celda transmite una secuencia pseudo-aleatoria correspondiente con el *physical cell ID* que tenga.

- **Multiple-Input Multiple-Output (MIMO):** Consiste en una técnica de multiplexado espacial en transmisión y recepción para enviar y recibir, respectivamente, por cada antena distintas señales. De esta forma se incrementa la tasa de transmisión y se reduce la tasa de error, mejorando así la eficiencia espectral.
- **Mapa de altimetría:** No es más que un mapa del relieve de una zona.
- **Clutter Class:** Es un mapa que muestra los diferentes tipos de zona que componen la zona total, como por ejemplo, si es zona rural, bosque, zona urbana, entre otros.
- **Clutter Height:** Es un mapa que se superpone al mapa de altimetría y que define la altura de los edificios de una zona del *Clutter Class*.
- **Mapa de carreteras:** Se trata de un fichero que contiene datos vectoriales en el que se definen las carreteras, vías, caminos, aeropuertos y demás.

### 3.3 Diseño de una red LTE en ATOLL

Para realizar cualquier proyecto, el primero paso a realizar es la recopilación de la información necesaria e imprescindible que nos otorgue la habilidad y los conocimientos suficientes para poder trabajar dinámicamente. En este caso, al realizar un proyecto de planificación radio los datos necesarios para poder empezar son los siguientes:

- Conocimiento de los diferentes modelos de propagación para, posteriormente, realizar la elección de uno de ellos bajo un criterio fundamentado.
- Investigación de la densidad de usuarios de la zona en las diferentes áreas en las que vamos a trabajar, su perfil en términos de su demanda de velocidad de datos, la tasa de uso, la clase de tráfico de datos de los usuarios y los requisitos de calidad.
- Recopilación de las características de los equipos radio (emplazamientos, transmisores, antenas, entre otros parámetros relacionados con las potencias y pérdidas de dichas antenas).
- Información de la tecnología radio (bandas de frecuencias y otros parámetros específicos de la tecnología a implementar).
- Información geográfica (*clutter classes*, *clutter heights*, mapas de tráfico y otros aspectos relacionados con el entorno) que se utilizará en el despliegue.

Posteriormente se debe abrir o crear un nuevo proyecto. Para esto, ATOLL tiene definido una serie de plantillas (*Templates*) con parámetros específicos en función de cada tecnología. En nuestro caso, el *Template LTE* resulta ideal para realizar el presente proyecto y es el seleccionado para modelar la red según las especificaciones de la 3GPP. Véanse las siguientes figuras.

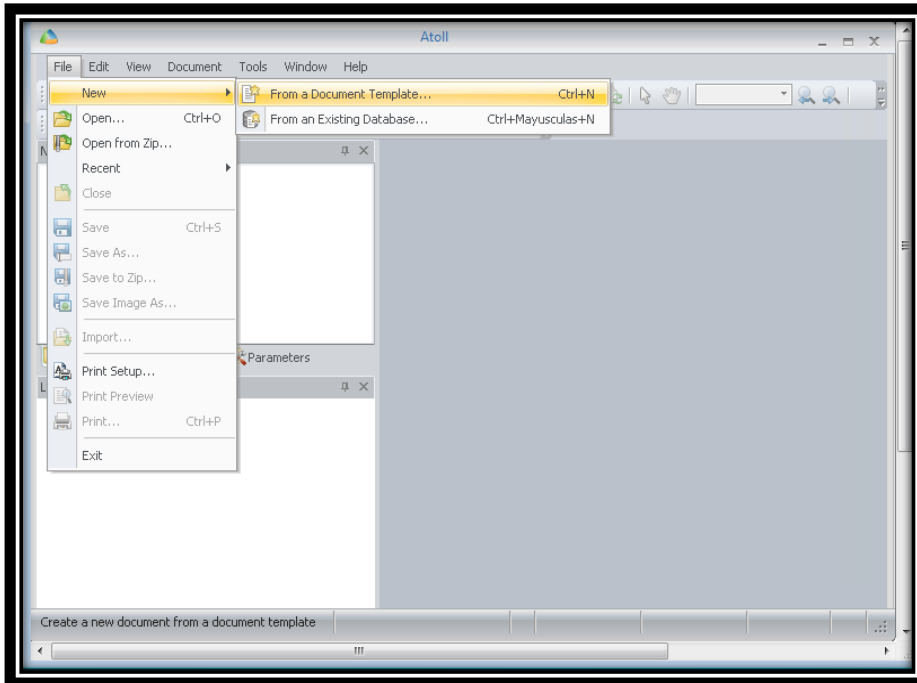


Figura 25: Creación de un nuevo proyecto en ATOLL.

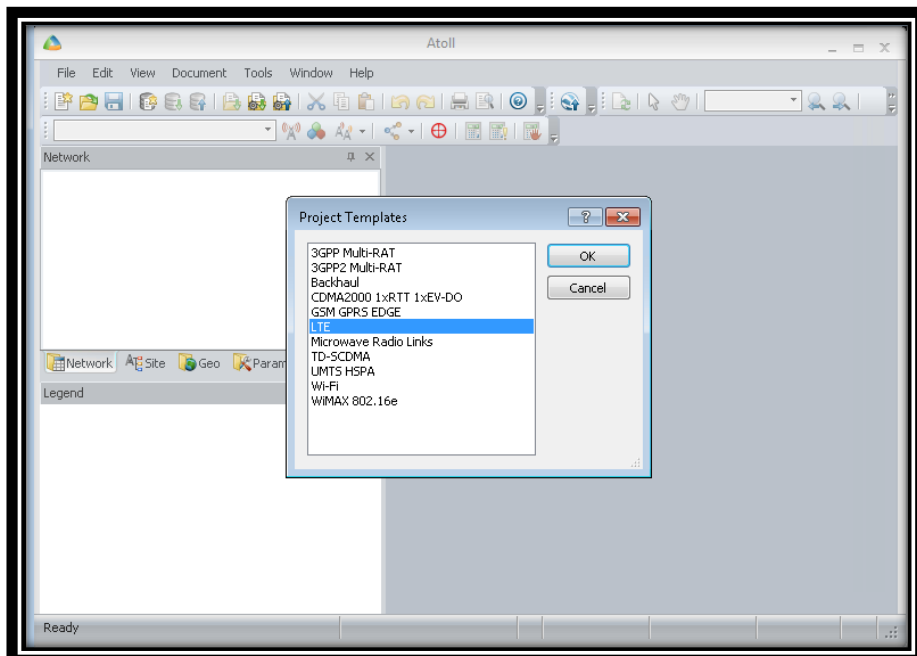
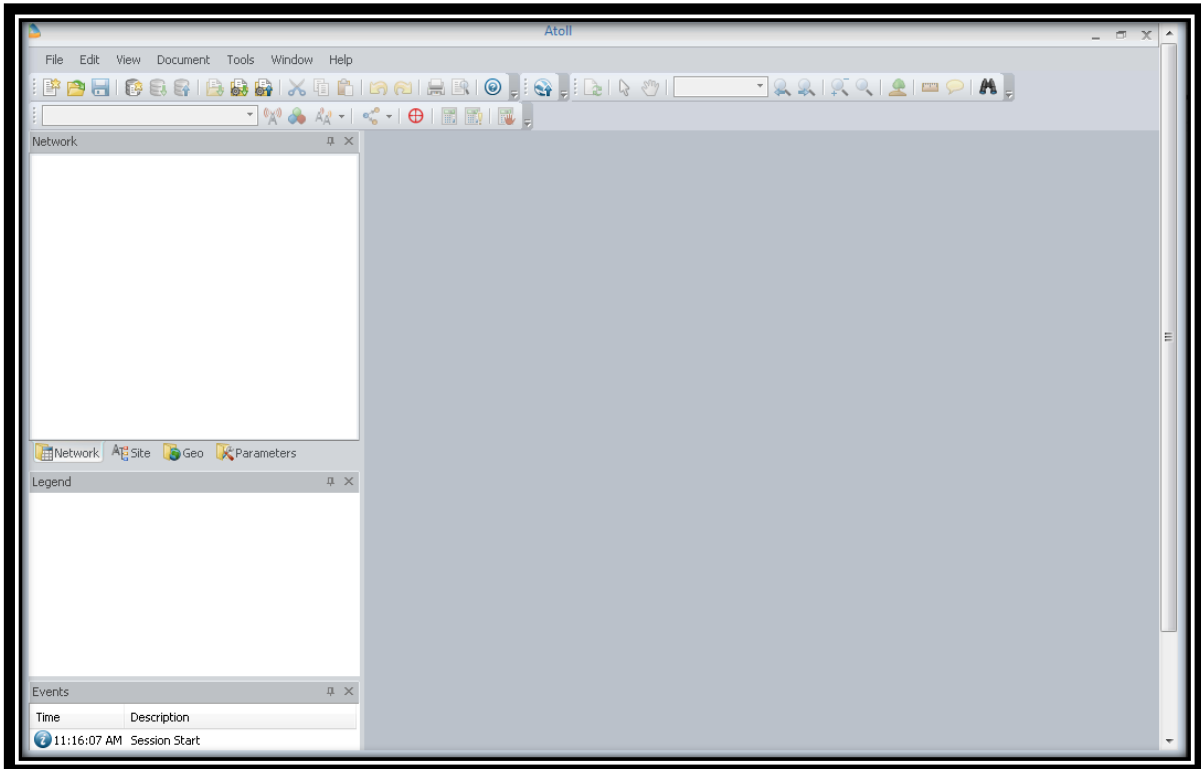


Figura 26: Parrilla de selección de los *Templates* que ofrece ATOLL.

El tercer paso consiste en la configuración de la red agregando los mapas del terreno, emplazamientos (*Sites*), transmisores (*Transmitters*), celdas (*Cells*) y todos aquellos parámetros de la red que fueron recopilados en el primer paso. En la figura que se muestra a continuación, queda retratado el entorno de trabajo previo a tener todos los parámetros comentados anteriormente configurados de forma correcta.



**Figura 27: Entorno de trabajo en ATOLL después de elegir el *template* de interés.**

En el cuarto paso se procede a la selección del modelo de propagación, la definición de los umbrales de las celdas basados en el *Link Budget*, la comprobación de la capacidad de red con estimaciones más detalladas del tráfico, planificación de la configuración y selección del emplazamiento de los *Sites* así como su validación. Por lo tanto, el **dimensionado** de la red es la determinación de las áreas que necesitan ser cubiertas y el cálculo del número de *Sites* requeridos para dar servicio esas áreas, cumpliendo con los requisitos de **cobertura y capacidad**. Por lo tanto, el presente proyecto requiere, básicamente, de los siguientes análisis:

En primer lugar, ATOLL ofrece la posibilidad de realizar predicciones básicas de cobertura por nivel de señal recibida sin tener en cuenta las interferencias. Estas predicciones comprenden estudios del nivel de señal recibido de distintas señales LTE en cada píxel del mapa, coberturas por transmisor y estudios de *overlapping* que permiten estudiar la configuración inicial de la red sin tomar en cuenta datos de tráfico. Por tanto, estas opciones que nos ofrece ATOLL implican la realización del **análisis de cobertura**, donde la cobertura o el tamaño de las celdas se determina por la cantidad de señal que llega al borde de esta o por la cantidad de señal interferente que puede llegar a su borde. Esto depende del margen de desvanecimiento, del rendimiento en el borde de la celda, de la carga promedio de la red, entre otros aspectos.

En segundo lugar, el **análisis de la capacidad** resulta ser una tarea necesaria e imprescindible para llevar a cabo la evaluación de la demanda y el tráfico.

Como quinto paso se elabora la evaluación de diferentes indicadores de rendimiento y la gestión de parámetros de planificación para garantizar un adecuado grado de servicio (GoS) para la red LTE diseñada con la herramienta ATOLL. Los indicadores de rendimiento que, principalmente, se han utilizado y analizado son los siguientes:

- **C/(I+N)**
- **Radio Bearer**
- **Throughput**

Por último, se analizan los resultados de las simulaciones y las predicciones de cobertura por calidad de señal para realizar modificaciones, si es necesario, en los parámetros configurados al inicio o realizar cambios en la planificación frecuencial. Cabe destacar que, si llegados a este punto, se cree conveniente realizar cambios en la configuración de parámetros se repetirán los análisis y simulaciones elaborados en las fases anteriores. Prueba de ello reside en las siguientes figuras, en las que se puede apreciar el guión seguido durante la elaboración del presente proyecto y que contiene los pasos que se deben seguir a la hora de confeccionar correctamente un proyecto de estas características.

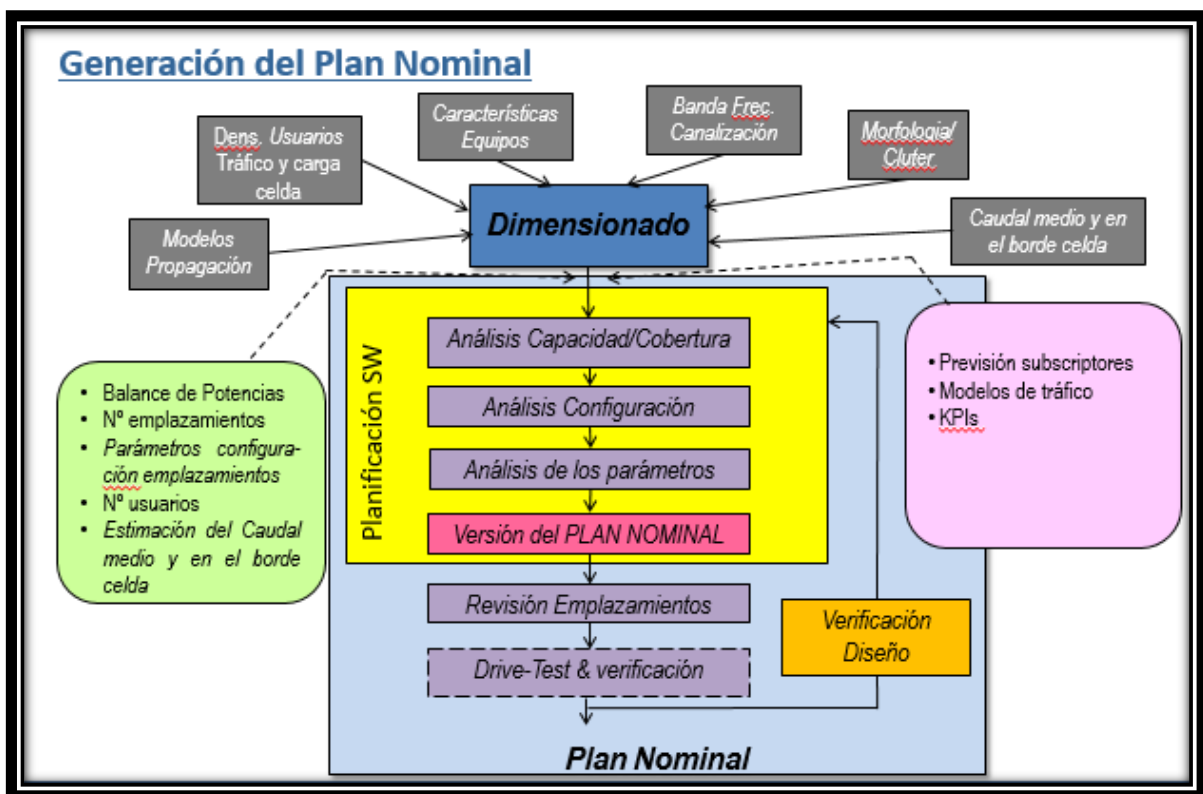


Figura 28: Diagrama de flujo del diseño de un plan nominal para una red LTE en ATOLL.

Fuente: Extraído de [4].

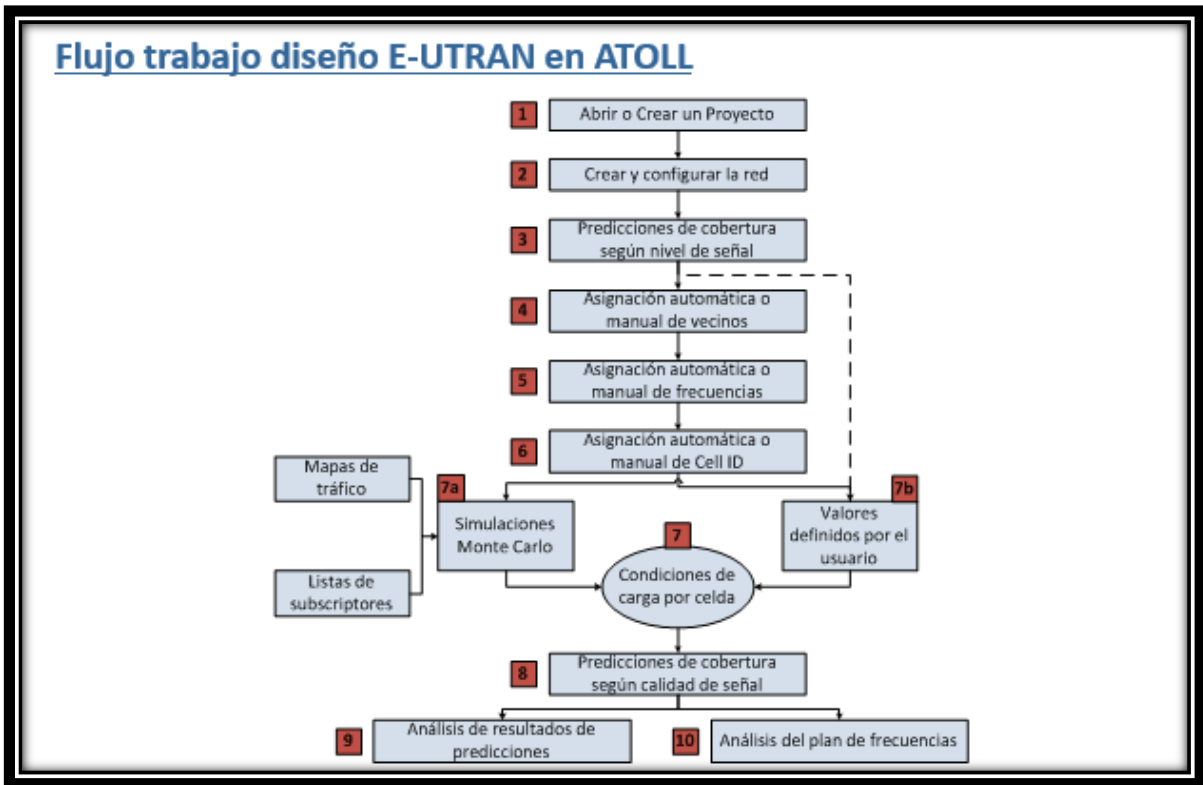


Figura 29: Flujo de trabajo para el diseño de una red LTE en ATOLL.  
Fuente: Extraído de [4].





## 4.- Parámetros configurados

Este capítulo realiza una breve descripción de los parámetros que nos brinda el *software* escogido, ATOLL, para este trabajo, la zona de despliegue de la red a realizar y la configuración de los parámetros de dicha red así como los del equipo transmisor y receptor. Es importante recalcar que la elección de estos parámetros influye notable y directamente en el funcionamiento de la red y en los resultados que se obtienen a partir de su análisis, por lo tanto, se trata de un punto clave en la planificación y dimensionado de una red.

### 4.1 Escenario

Para el despliegue de la red se escogió la zona de Sitges, haciendo uso de un mapa de la zona focalizado en la región mencionada. Esta elección fue debida a que se trata de una localidad conocida para nosotros, tiene una geografía variada (tiene zonas rurales y montañosas, zonas edificadas y más planas y zona marítima) y una edificación heterogénea, lo cual supone, desde el punto de vista del diseño de redes móviles, una zona ideal para el estudio de la configuración de los parámetros de radio frecuencia y de la ubicación de las estaciones base del sistema LTE (eNBs) dada la gran variedad de obstáculos que encontraran las señales radioeléctricas en su propagación.

En la siguiente figura se puede observar la zona de estudio resultante después de cargar en ATOLL los mapas de terreno e introducir las coordenadas correspondientes al municipio de Sitges.

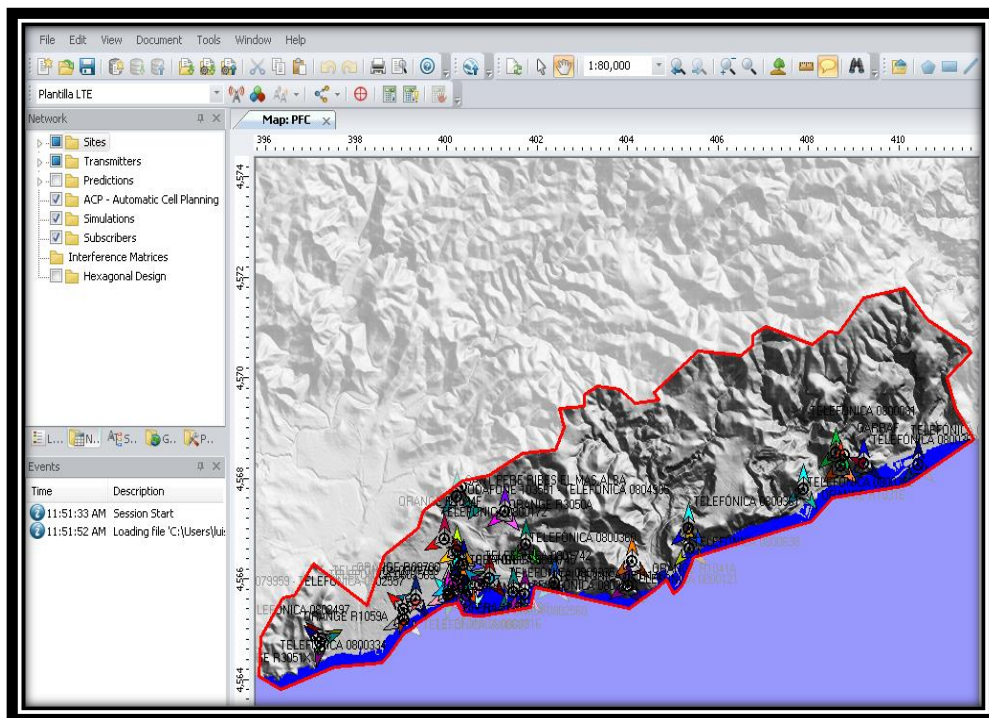


Figura 30: Mapa de la zona de trabajo.

## 4.2 Predicciones de cobertura disponibles

ATOLL ofrece dos tipos de predicciones de cobertura, unas que permiten analizar los niveles de señal y otras que permiten analizar la calidad de la señal. Las primeras, no dependen de las condiciones de carga de la red ni de las interferencias mientras que las segundas sí.

Para una mejor comprensión, en las predicciones, cada píxel del mapa es considerado como un usuario no interferente con un servicio, una movilidad y un terminal específico que se establecen en el momento de realizar la predicción.

Las predicciones de calidad de señal se basan en los valores de DL Traffic Load y UL Noise Rise establecidos en la tabla de celdas (*Cells Table*) o calculados por simulaciones de Monte Carlo para calcular la relación existente entre portadora e interferencia más ruido,  $C/(I+N)$ , en cada píxel del mapa.

En la tabla adjunta observamos las diferentes predicciones que ofrece el *software* ATOLL. Sin embargo, no será hasta el próximo capítulo donde profundizaremos en su uso.

Clasificación	Nombre	Depende del tráfico	Descripción
Por nivel de señal	<i>Coverage by Signal Level</i>	No	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa.
	<i>Coverage by Transmitter</i>	No	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor.
	<i>Overlapping Zones</i>	No	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.
	<i>Effective Signal Analysis</i>	No	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH).
	<i>Coverage by C/(I+N) Level</i>	Sí	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido $C/(I+N)$ para cada píxel del mapa.
Por calidad de señal	<i>Service Area Analysis</i>	Sí	Permite calcular y mostrar los mejores <i>Radio Bearers</i> disponibles para cada píxel del mapa basados en las $C/(I+N)$ de los mismos.
	<i>Effective Service Area Analysis</i>	Sí	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible, tanto en el DL como en el UL.
	<i>Coverage By Throughput</i>	Sí	Permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa los <i>Channel Throughputs</i> y <i>Cell Capacities</i> basados en los niveles de $C/(I+N)$ y en los <i>Radio Bearers</i> disponibles. Además, permite mostrar el <i>Aggregate Cell Throughput</i> para resultados de simulaciones.
	<i>Coverage by Quality Indicator</i>	Sí	Permite Calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, BER, entre otros) basados en los <i>Radio bearers</i> y en los niveles de $C/(I+N)$ de cada píxel.

**Tabla 1: Predicciones de cobertura disponibles en el software ATOLL.**

### 4.3 Elección de los parámetros de la red

Para elaborar el plan nominal de una red con una herramienta *software* de planificación radio se debe crear un proyecto que simule, de la manera más realista posible, el escenario de desarrollo. Para ello, se debe trabajar con modelos digitales de elevación (*Digital Elevation Models – DEM*). Estos modelos no son más que una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permiten caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Los valores que acabamos de mencionar están almacenados en un archivo, el cual se genera utilizando un equipo de cómputo y un *software* especializados. Además, también resultan útiles para el cálculo de la difracción entre los modelos de propagación.

Por lo tanto, el primer paso para desarrollar una red en ATOLL es la importación de los mapas de altimetría, ortophoto, los Clutters y las carreteras de la zona de estudio, cuya funcionalidad esta descrita en el capítulo anterior. En nuestro caso, no se ha creído conveniente importar todos los mapas puesto que para los objetivos que se desean cumplir con tan solo el relieve de la zona es más que suficiente.

#### 4.3.1 Definición de las bandas de frecuencias

El programa ATOLL permite definir las bandas de frecuencias de las que se quiere hacer uso para una red. Para hacerlo hace falta configurar la tabla dentro del menú *Parameters* → *Radio Network Settings* → *Frequencies* → *Bands*. Véase la siguiente figura.

Name	Duplexing Method	TDD: Start Frequency, FDD: DL Start Frequency (MHz)	FDD: UL Start Frequency (MHz)	Channel Width (MHz)	Inter-channel spacing (MHz)	Number of Frequency Blocks	Sampling Frequency (MHz)	First channel
E-UTRA Band 38 - 20MHz	TDD	2,570	2,570	20	0	100	30.72	37,8
E-UTRA Band 38 - 5MHz	TDD	2,570	2,570	5	0	25	7.68	37,7
E-UTRA Band 39 - 10MHz	TDD	1,880	1,880	10	0	50	15.36	38,3
E-UTRA Band 39 - 15MHz	TDD	1,880	1,880	15	0	75	23.04	38,3
E-UTRA Band 39 - 20MHz	TDD	1,880	1,880	20	0	100	30.72	38,3
E-UTRA Band 39 - 5MHz	TDD	1,880	1,880	5	0	25	7.68	38,2
E-UTRA Band 4 - 10MHz	FDD	2,110	1,710	10	0	50	15.36	2,0
E-UTRA Band 4 - 15MHz	FDD	2,110	1,710	15	0	75	23.04	2,0
E-UTRA Band 4 - 20MHz	FDD	2,110	1,710	20	0	100	30.72	2,0
E-UTRA Band 4 - 5MHz	FDD	2,110	1,710	5	0	25	7.68	1,9
E-UTRA Band 41 - 10MHz	TDD	2,496	2,496	10	0	50	15.36	39,7
E-UTRA Band 41 - 15MHz	TDD	2,496	2,496	15	0	75	23.04	39,7
E-UTRA Band 41 - 20MHz	TDD	2,496	2,496	20	0	100	30.72	39,7
E-UTRA Band 41 - 5MHz	TDD	2,496	2,496	5	0	25	7.68	39,6
E-UTRA Band 42 - 10MHz	TDD	3,400	3,400	10	0	50	15.36	41,6
E-UTRA Band 42 - 15MHz	TDD	3,400	3,400	15	0	75	23.04	41,6
E-UTRA Band 42 - 20MHz	TDD	3,400	3,400	20	0	100	30.72	41,6
E-UTRA Band 42 - 5MHz	TDD	3,400	3,400	5	0	25	7.68	41,6
E-UTRA Band 43 - 10MHz	TDD	3,600	3,600	10	0	50	15.36	43,6
E-UTRA Band 43 - 15MHz	TDD	3,600	3,600	15	0	75	23.04	43,6
E-UTRA Band 43 - 20MHz	TDD	3,600	3,600	20	0	100	30.72	43,6
E-UTRA Band 43 - 5MHz	TDD	3,600	3,600	5	0	25	7.68	43,6
E-UTRA Band 7 - 10MHz	FDD	2,620	2,500	10	0	50	15.36	2,8
E-UTRA Band 7 - 15MHz	FDD	2,620	2,500	15	0	75	23.04	2,8
E-UTRA Band 7 - 20MHz	FDD	2,620	2,500	20	0	100	30.72	2,8
E-UTRA Band 7 - 5MHz	FDD	2,620	2,500	5	0	25	7.68	2,7
E-UTRA Band 8 - 10MHz	FDD	925	880	10	0	50	15.36	3,5
E-UTRA Band 8 - 5MHz	FDD	925	880	5	0	25	7.68	3,4

Figura 31: Tabla de bandas frecuenciales disponibles en ATOLL.

Además, se ha decidido presentar una pequeña muestra a modo de resumen de las características frecuenciales de la banda 7 para que el lector divise de manera intuitiva la relación con la que el *software* ATOLL nos ofrece.

LTE Banda 7 (IMT-E)			
Tipo	Frecuencias	Ancho	Uso
FDD	2500-2570 MHz	70 MHz	Subida
	2620-2690 MHz	70 MHz	Bajada

Figura 32: Características principales de la banda 7 del estándar LTE.

Fuente: Extraído de [14].

Tal y como se puede observar se escoge una técnica de duplexado FDD. Esto es debido a que gracias a que esta técnica utiliza partes separadas del espectro para el enlace descendente y ascendente se obtiene una mayor eficiencia espectral y unos resultados mejores a los obtenidos con la técnica TDD.

Por lo tanto, de todas las bandas que ofrece el estándar LTE, presentadas en el capítulo 2: Estado del arte, en este proyecto se ha optado por el uso de la banda 7, véase en figuras anteriores. El motivo de esta elección reside en que la banda escogida es la utilizada, mayoritariamente, por las compañías telefónicas que operan en la zona de trabajo. A continuación, se muestran dos tablas que recogen el espectro otorgado en Catalunya a cada operadora y justifica la elección de la banda en este proyecto:

Licitador	Número de blocs	Banda del bloc	Tamany del bloc
COTA	1	2,6 GHz	10 MHz (TDD)
Euskatel	1	2,6 GHz	2x10 MHz
	1	2,6 GHz	10 MHz (TDD)
FranceTelecom	2	800 MHz	2x5 MHz
	2	2,6 GHz	2x10 MHz
	1	2,6 GHz	10 MHz (TDD)
JazzTelecom	5	2,6 GHz	2x10 MHz
ONO	9	2,6 GHz	2x10 MHz
R	1	2,6 GHz	2x10 MHz
	1	2,6 GHz	10 MHz (TDD)
TELECOMCLM	1	2,6 GHz	2x10 MHz
Telecable	1	2,6 GHz	2x10 MHz
	1	2,6 GHz	10 MHz (TDD)
Telefónica	2	800 MHz	2x5 MHz
	1	900 MHz	2x5 MHz
	1	900 MHz	2x4,8 MHz
	2	2,6 GHz	2x10 MHz
Vodafone	2	800 MHz	2x5 MHz
	2	2,6 GHz	2x10 MHz
	22	2,6 GHz	2x5 MHz

Figura 33: Resultados de subastas del espectro radioeléctrico.

Fuente: Extraído de [15].

Bloque	Subida	Bajada	Cobertura	Operador
2x20 MHz	2500-2520MHz	2620-2640MHz	Estatal	Movistar
2x20 MHz	2520-2540MHz	2640-2660MHz	Estatal	Orange
2x15 MHz	2540-2555MHz	2660-2675MHz	Estatal	Vodafone
2x5 MHz	2555-2560MHz	2675-2680MHz	Autonómica	Vodafone
2x10 MHz	2560-2570MHz	2680-2690MHz	Autonómica	Jazztel
				Telecable
				Telecom CLM
				R cable
				Euskaltel
				(Sin asignar)
				Ono
1x10 MHz	2595-2605MHz		Autonómica	(Varios)

**Figura 34: Resultados de subastas del espectro radioeléctrico.**  
Fuente: Extraído de [14].

La obtención de las bandas de frecuencias en cada país por parte de sus operadoras, se basa en diferentes estrategias de adjudicación como, por ejemplo, una subasta del espectro radioeléctrico. Por lo tanto, en cada país se escoge una banda de frecuencias a utilizar (dentro de las propuestas en el estándar LTE). La elección de estas bandas está sujeta a varios factores como, por ejemplo, el tipo de terreno del país y/o la población, entre otros.

Finalmente, más motivos que han impulsado a la elección de esta banda residen en que el uso de la misma banda para el despliegue de estas redes que la utilizada en muchos otros lugares implica una importante ventaja y, además, esta banda, al trabajar a frecuencias de 2.6 GHz, posee condiciones de propagación realmente buenas en exteriores.

### 4.3.2 Elección del modelo de propagación

Refrescando conceptos, según la definición establecida en el capítulo anterior el modelo de propagación registra un conjunto de expresiones matemáticas y algoritmos usados para representar las características radio de un ambiente dado. Dicho modelo, puede ser empírico, teórico o una combinación de estos dos.

Llegados a este punto, debemos escoger uno de los diferentes modelos de propagación que nos aporta ATOLL que mejor se adapte a nuestras condiciones iniciales y al entorno. Si nos fijamos en la siguiente figura observamos que en el apartado siguiente: *Parameters Propagation Models* se encuentran todos los modelos de propagación que ofrece el software ATOLL. →

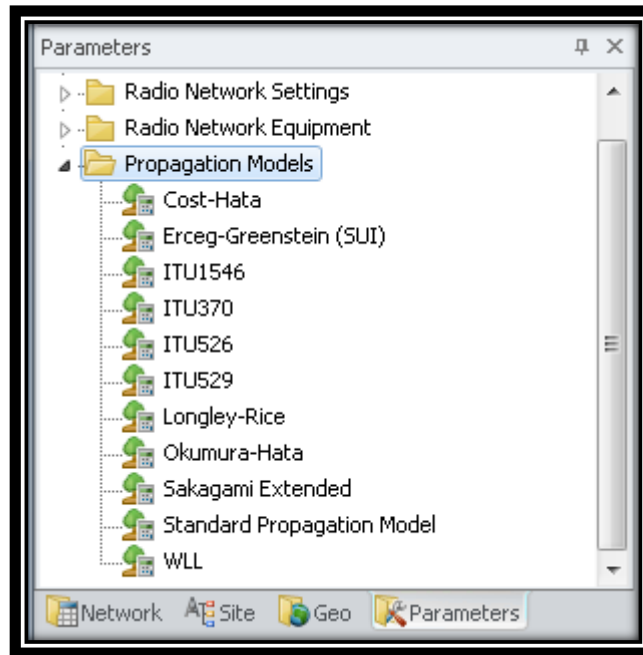


Figura 35: Modelos de propagación disponibles para LTE.

Sin embargo, en el momento de configurar el modelo de propagación en nuestra red deberemos acceder con el botón derecho a *Transmitters* → *Transmitters Properties: Propagation* y allí seleccionar el modelo de propagación que se crea óptimo. Véase la figura adjunta:

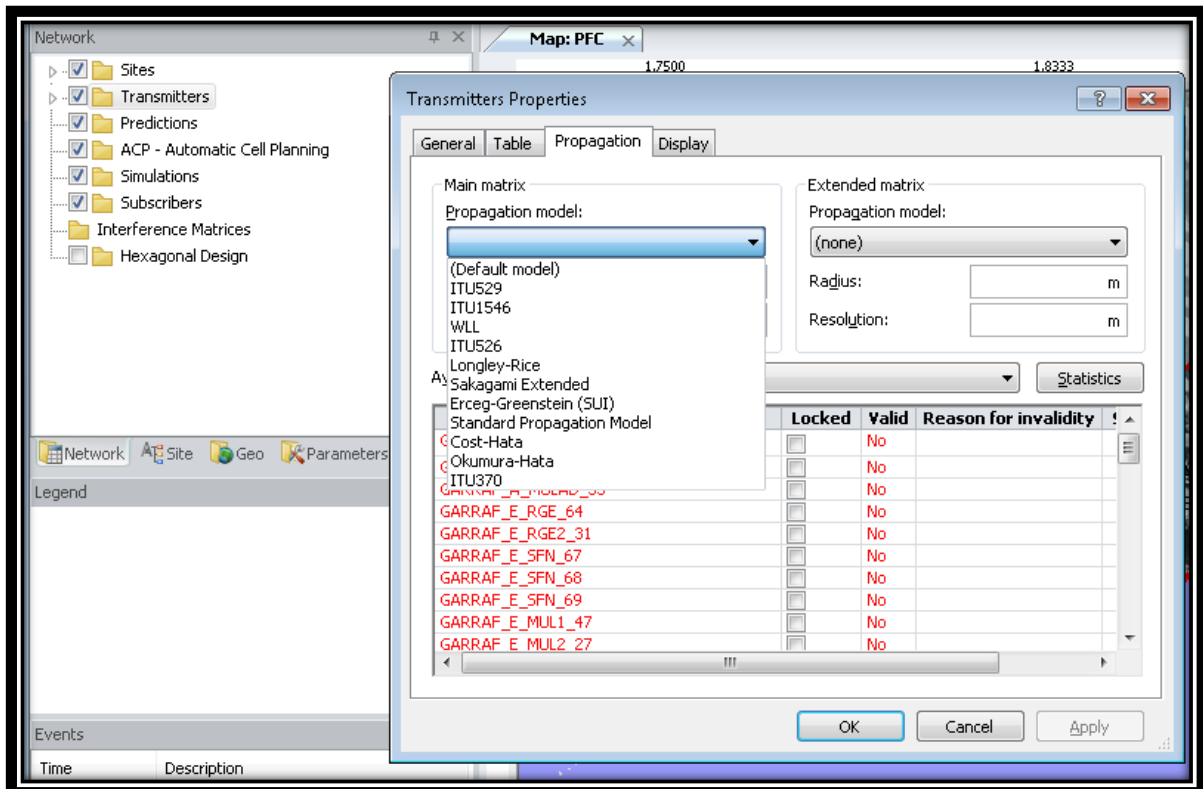


Figura 36: Configuración del modelo de propagación en ATOLL.



Observando las características de los modelos de propagación que nos ofrece el *software* ATOLL, se ha optado la elección del Standard Propagation Model (SPM).

Standard Propagation Model (SPM) es un modelo, deducido a partir de Okumura-Hata, indicado especialmente para las predicciones en frecuencias comprendidas entre 150 MHz y 3500 MHz y también para tratar largas distancias, en concreto las que se encuentran entre 1 km y 20 km ( $1 \text{ km} < d < 20 \text{ km}$ ). Además, diversos estudios corroboran que es un modelo muy adecuado para GSM900/1800, UMTS, CDMA2000, WiMAX y LTE. Como valor añadido se debe decir que este modelo utiliza el perfil del terreno, los mecanismos de difracción (calculados de varias maneras) y tiene en cuenta las clases de ocupación del suelo (*Clutter Classes*) y las alturas efectivas de las antenas con el fin de calcular la pérdida de trayectoria (*Path Loss*), es por eso que se ha creído que este modelo es el idóneo para la realización del presente proyecto.

### 4.3.3 Configuración de los parámetros globales del sistema LTE

Después de realizar los establecidos como primeros pasos básicos para desarrollar una red de LTE en ATOLL, que serían importar los mapas de altimetría, orthofoto, los clutters y las carreteras de la zona de estudio (véase la figura 30) y tener definidos estratégicamente los parámetros que van a afectar en nuestro diseño (Modelos de propagación y bandas frecuenciales) se debe continuar por la estipulación de los parámetros globales del sistema LTE, tal y como se muestra en las imágenes que se adjuntan a continuación y que, para más información, son los que ATOLL ofrece por defecto si nos adentramos con botón derecho en *Radio Network Settings* → *Properties*:

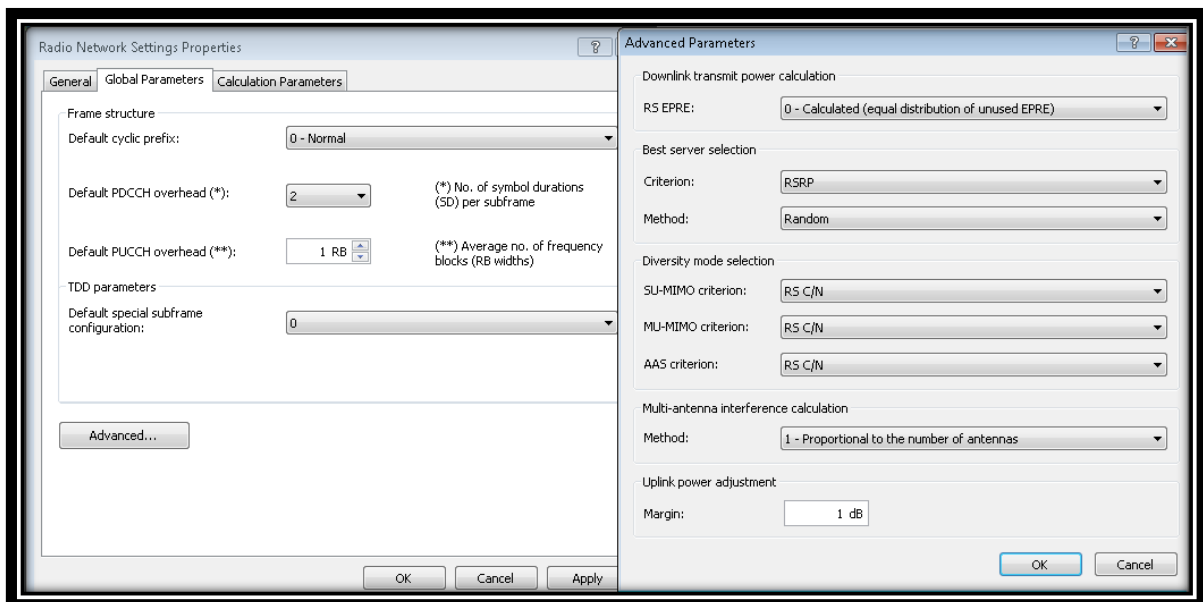
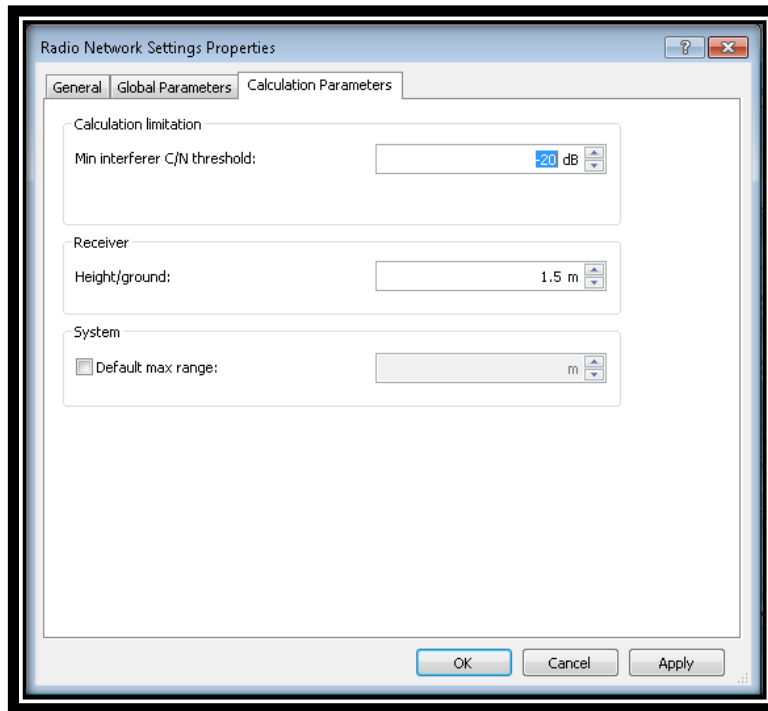
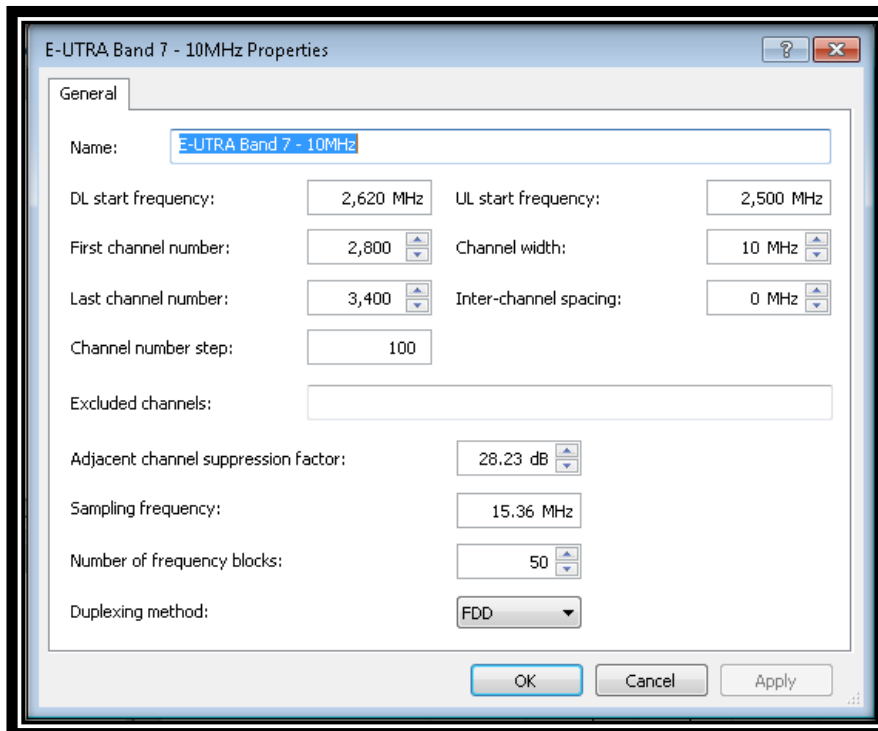


Figura 37: Parámetros globales del sistema LTE.



**Figura 38: Parámetros de cálculo del sistema LTE.**

Tal y como se ha comentado anteriormente, la banda de frecuencias a usar es la banda 7 del estándar LTE. En un primer estudio se opta por una canalización de 10 MHz, con lo que si la banda 7 tiene las siguientes frecuencias: 2500-2570 MHz y 2620-2690 MHz para el enlace ascendente y descendente respectivamente, la configuración de la banda en nuestro caso es la siguiente (*Radion Network Settings* → *Frequencies* → *Bands* → *Botón derecho en la banda de interés* → *Record Properties*):



**Figura 39: Configuración de la banda 7**

Finalmente, antes de pasar a la configuración de los parámetros de tráfico, resulta apropiado comentar que tanto la configuración de los *Radio Bearers* como la del *Cell/UE Equipment* y el *Scheduler* se ha dejado por defecto.

#### 4.3.4 Configuración de los parámetros de tráfico

En este apartado se procede a la configuración de los parámetros de tráfico que engloba ATOLL. Estos son los servicios disponibles (*Services*), los tipos de movilidad que pueden llegar a suceder (*Mobility types*), los terminales empleados (*Terminals*), los perfiles de usuario (*User Profiles*) y los diferentes ambientes posibles (*Environments*).

Por lo que hace referencia a los tres primeros parámetros incluidos en *Traffic Parameters: Services, Mobility types* y *Terminals*, se ha creído conveniente dejar sus respectivas configuraciones por defecto. Por otro lado, se han creado dos usuarios (*Users*) adicionales a los que ATOLL ofrece por defecto (*Standard User* y *Business User*) bajo el nombre de *Home User* y *Driver User*. El primer tipo de usuario, recoge las características de aquella persona que se encuentre en su domicilio, oficina o lugar de trabajo, por lo tanto resulta lógico establecer que tan sólo haga uso de los servicios de voz y datos de forma puntual, ya que para no hacer gasto puede hacer uso de telefonía fija o, en el caso del servicio de datos, puede emplear wifi. Sin embargo, el segundo tipo engloba a aquellos usuarios de telefonía móvil que se encuentran en un coche o, también, en un barco en el mar ya que nuestra situación geográfica lo permite. En este caso parece útil razonar que estos usuarios poseen una movilidad mayor a la del resto de usuarios y, siguiendo el argumento empleado en el caso de los *Home Users*, generan el doble de llamadas que estos últimos aunque debido a la dificultad de maniobra y a la ley vigente, sean de duración más corta. Véanse aquí sus respectivas configuraciones.

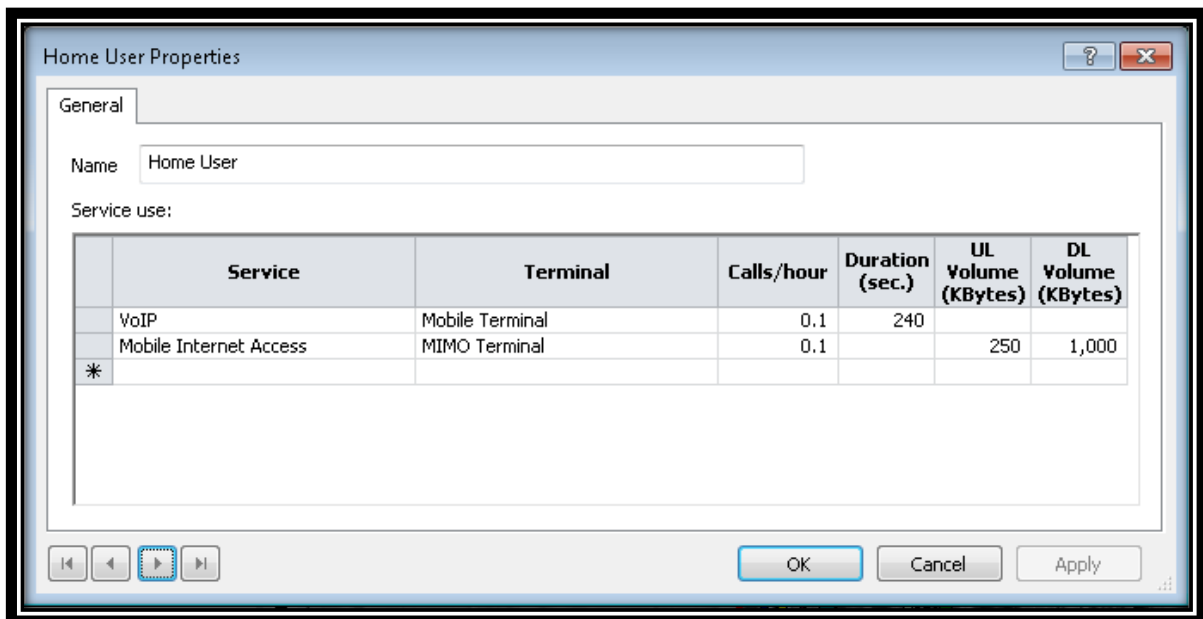
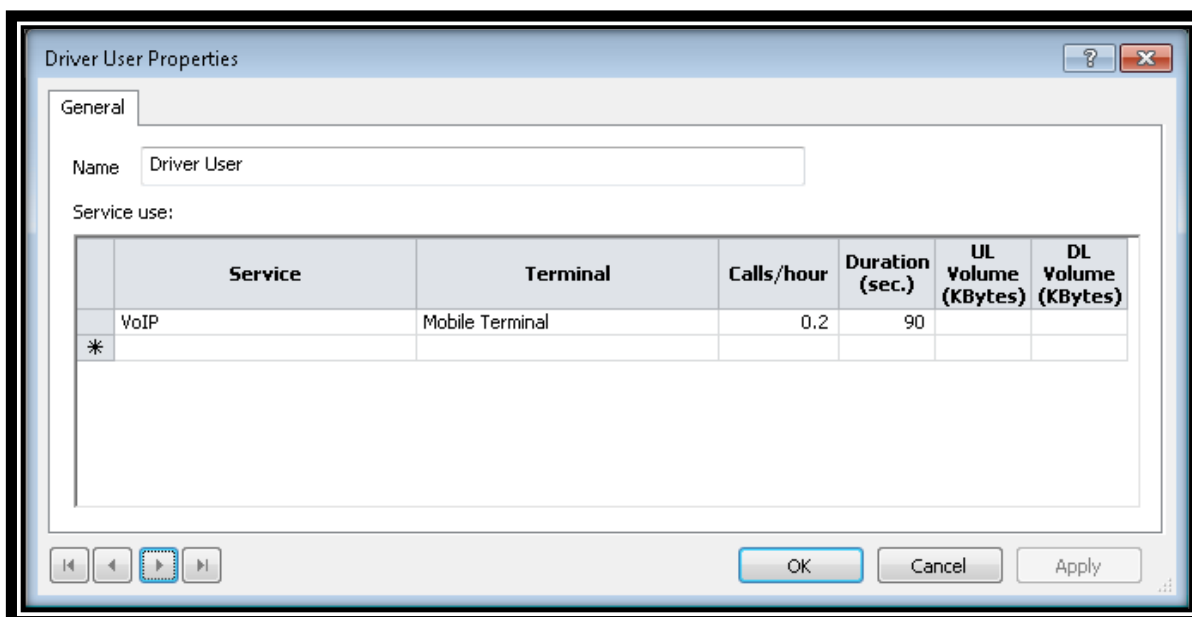


Figura 39: Configuración del *Home User*.



**Figura 40: Configuración del *Driver User*.**

En referencia a los usuarios que ATOLL ofrece de inicio (*Business User* y *Standard User*) cabe decir que, en ambos, ha sido innecesario modificar sus parámetros por defecto. Sin embargo, facilita la comprensión proporcionar sus características generales.

El *Business User* acoge a aquellos usuarios que disponen de un terminal MIMO con todos los servicios definidos y ofrecidos por la red. En nuestro caso, VoIP, navegación web (*Mobile Internet Access*), video conferencias (*Video Conferencing*) y descargas FTP (*High Speed Internet*). Es decir, este tipo de usuario hace un uso de la red más elevado al resto de usuarios.

En cambio, el *Standard User* engloba a aquellos usuarios que tienen un terminal móvil normal y hacen uso de los servicios de VoIP y de navegación web de forma, ligeramente, inferior al uso de los *Business Users*.

Por otra parte, en ATOLL, para realizar simulaciones de tráfico se deben definir los denominados *Environments*. Por defecto, existen cuatro tipos de entornos a considerar cuando queremos desplegar una red LTE: *Dense Urban*, *Urban*, *Suburban* y *Rural*. Cada entorno, está formado tanto por diferentes tipos de usuarios con sus respectivas movilidades y densidades como por diferentes tipos de zonas definidas por el mapa de *Clutters*. Sin embargo, la configuración de los entornos (*Environments*) depende prácticamente del criterio escogido por el usuario y pueden definirse nuevos entornos si se cree conveniente.

En este proyecto, debido a la creación de nuevos usuarios (*Users*), se ha realizado una modificación de las configuraciones que vienen por defecto en los diferentes *Environments* con el fin de definir la densidad de usuarios y sus movilidades. Por tanto, la configuración de los *Environments* procede de la siguiente forma:

- El entorno *Dense Urban* tendrá diferentes usuarios: *Business*, *Standard*, *Driver* y *Residential User* con diferentes densidades. En este caso, se ha creído oportuno establecer en mayor medida usuarios *Business* y *Standard* con una movilidad baja, seguidos de los usuarios *Driver*, con una movilidad de 50 km/h para terminar con una menor aportación de *Home Users*, con movilidad nula, debido a la actividad que se caracteriza en el núcleo de Sitges.

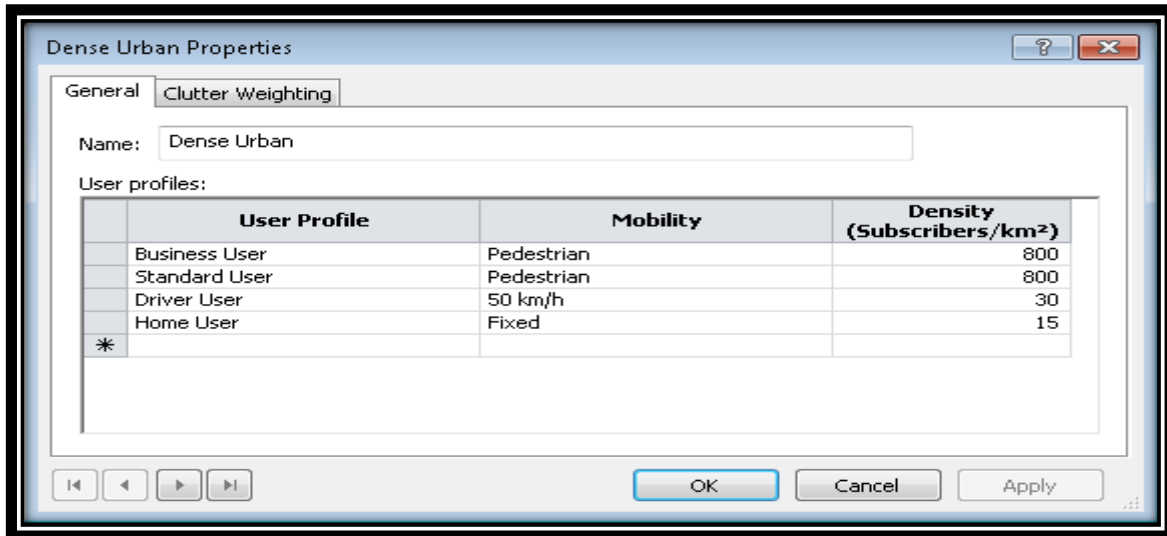


Figura 41: Configuración del entorno *Dense Urban*.

- El entorno *Rural* tendrá, mayoritariamente, usuarios *Standard* con movilidad baja y con una densidad destacablemente menor a la que se ha presenciado en el *Environment Dense Urban*. Además, constará de usuarios *Driver* con una movilidad de 90 km/h, puesto que es sabido que en las salidas de las ciudades de Sitges se disponen de carreteras en las que el límite de velocidad es más elevado que en el centro. Finalmente, se han configurado, con menor densidad, una serie de *Home Users* que representan a los pequeños núcleos residenciales que se pueden dar en las zonas rurales. Véase a continuación:

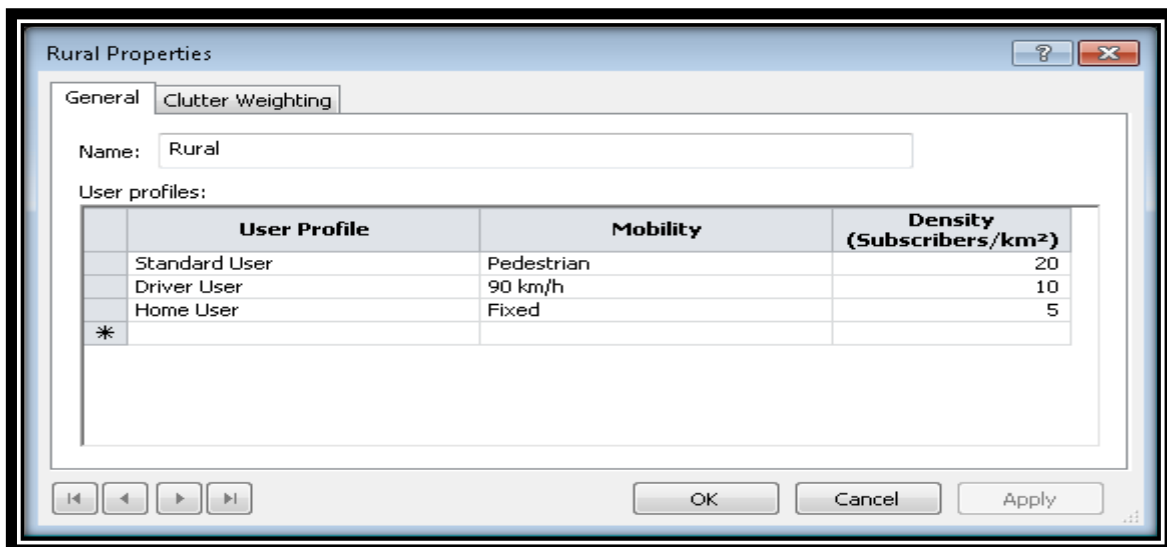
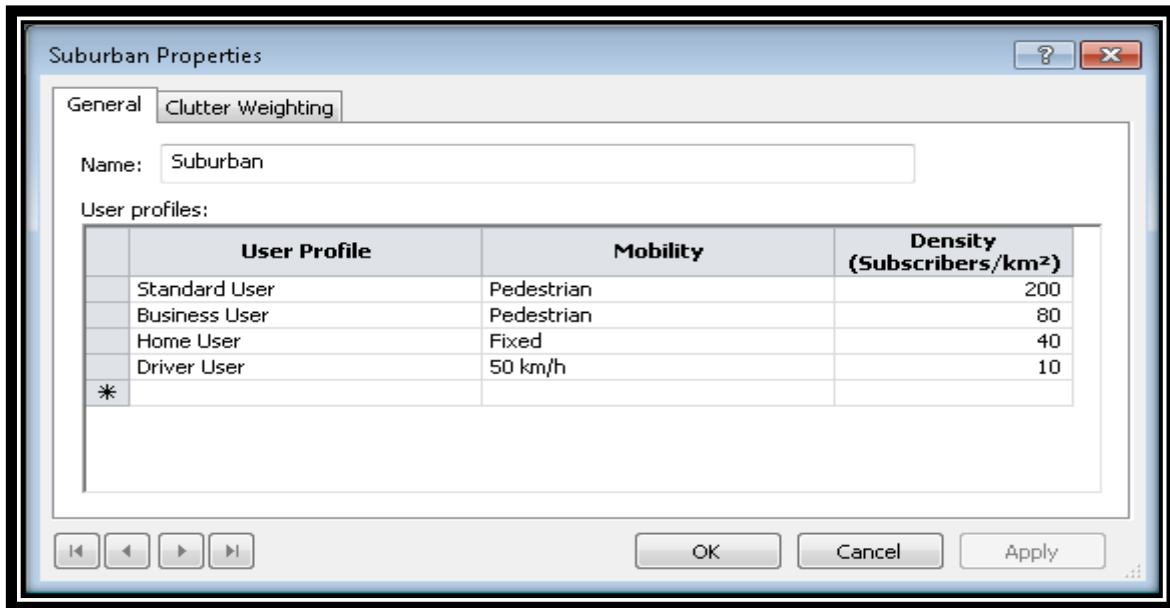


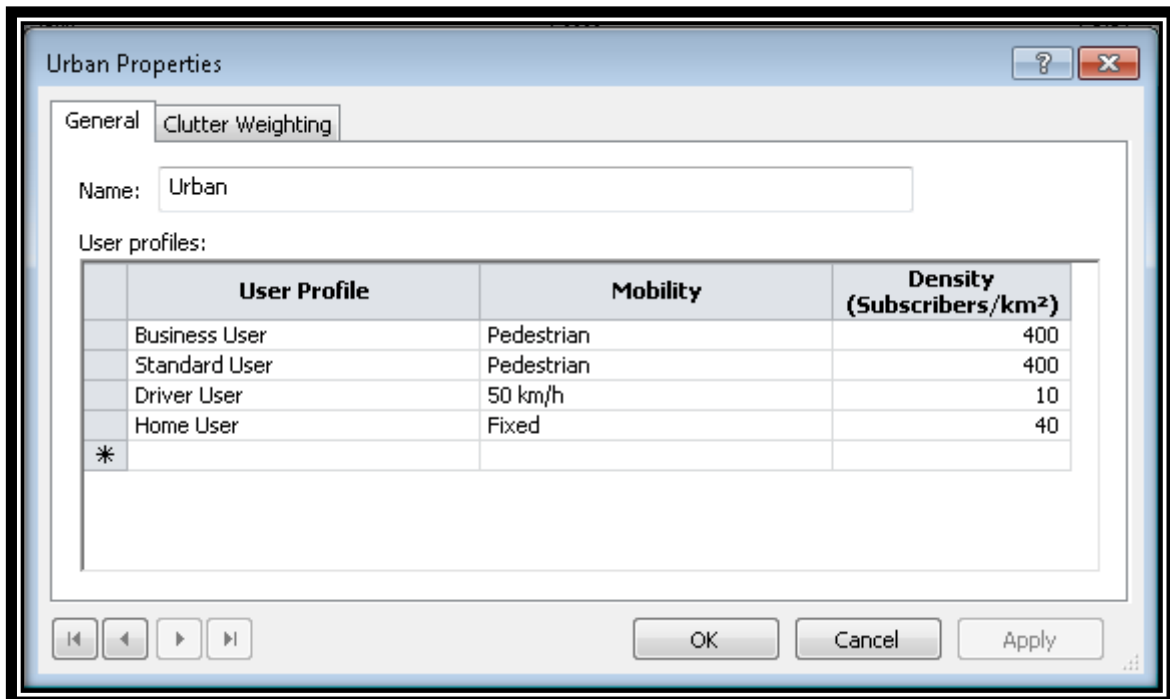
Figura 42: Configuración del entorno *Rural*.

- Por lo que hace referencia al entorno *Suburban*, se ha optado por una configuración en la que destaca el *Home User* ya que se trata de la zona periférica al centro de Sitges, donde se concentran las zonas residenciales. A continuación la imagen que lo demuestra.



**Figura 43: Configuración del entorno *Suburban*.**

- De forma análoga, el entorno *Urban* incluye la zona centro de Sitges, que a diferencia de *Dense Urban*, contempla más viviendas. Véase en la siguiente figura:



**Figura 44: Configuración del entorno *Urban*.**

Posteriormente a la configuración de los *Environments* presentados en hojas previas, se ha realizado la elección de la antena que formará parte de nuestro equipo. De inicio se ha definido una antena de 60° con diagrama de radiación existente en las antenas de ATOLL para las frecuencias de la banda 7. Véase a continuación su configuración (*Radio Network Equipment* → *Antennas* → *Physical Antenna:60deg 16dBi* → (*Botón derecho*)60deg 16 dBi 4Tilt 2600MHz):

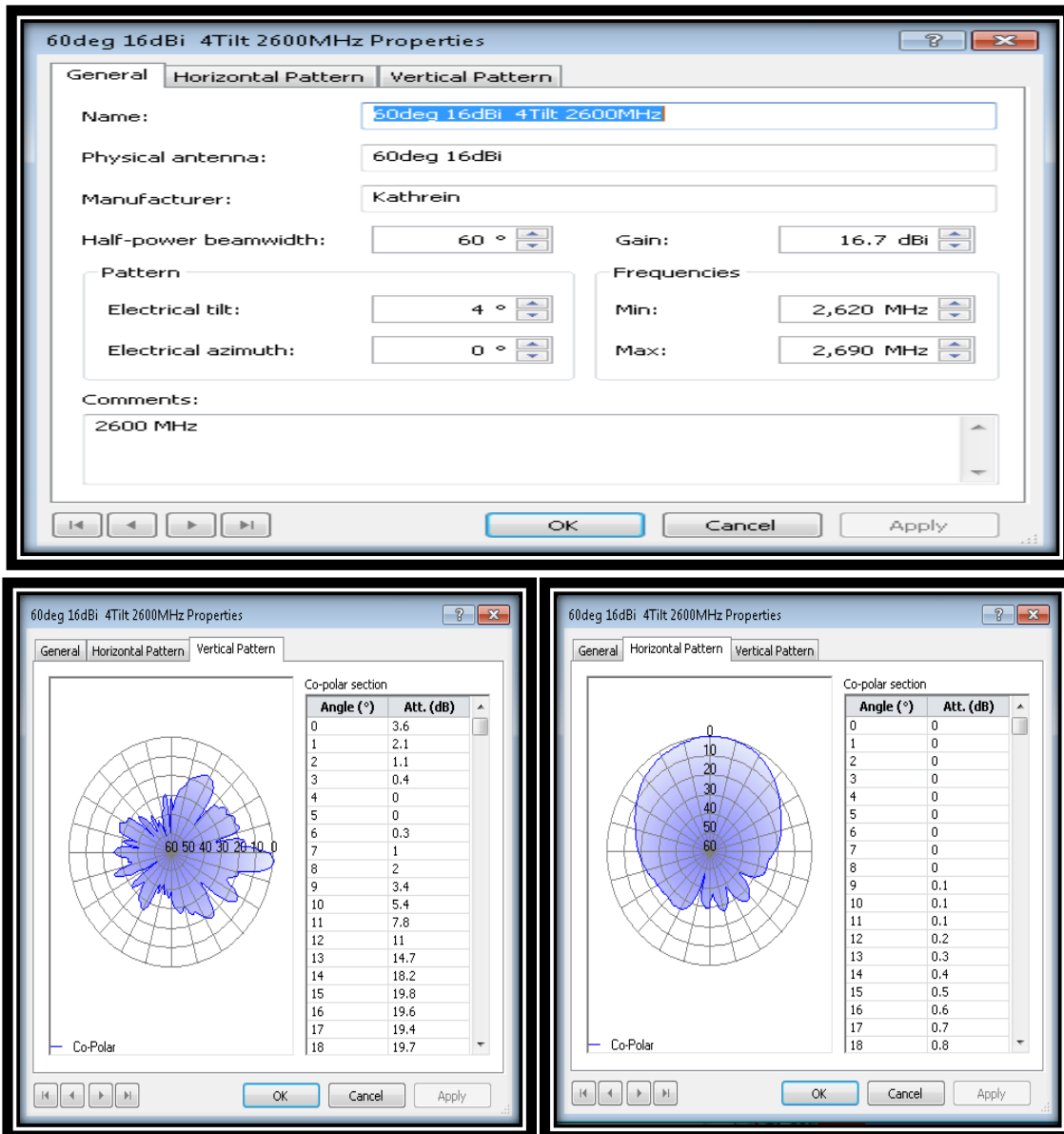


Figura 45: Elección y configuración de la antena.

Finalmente, se ha creído oportuno proporcionar un ejemplo de una posible antena real que cumpla con las características de la antena escogida. Véase aquí:

<http://www.alphaantennas.com/documents/AW3088DataSheet.pdf>

### 4.3.5 Configuración de la plantilla LTE

En este último apartado se pretende configurar la plantilla LTE, definida en capítulos anteriores, de la manera aprendida e interiorizada en la asignatura “Laboratorio de Comunicaciones Móviles”. Para crear una nueva plantilla accedemos a la pestaña *Parameters*, dentro de la carpeta *Radio Network Settings* → *Station Templates* y creamos una copia de la plantilla *10 MHz – FDD – Urban (3 sectors)*, cambiando el nombre por *Plantilla LTE*. De este modo, esta nueva plantilla se utilizará como base para añadir nuevas estaciones.

Abrimos la plantilla creada y vemos una ventana de configuración con varias pestañas, en concreto, cuatro. Realizamos las correspondientes modificaciones y el resultado final es el que se muestra a continuación:

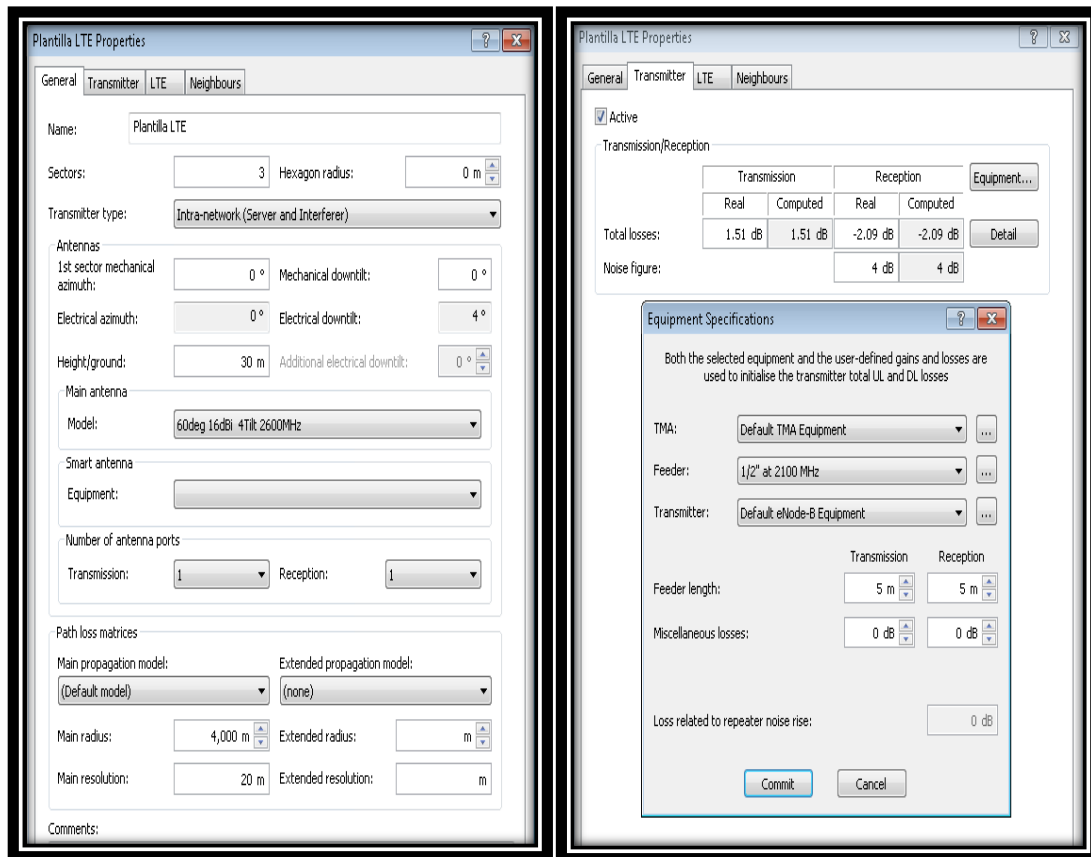
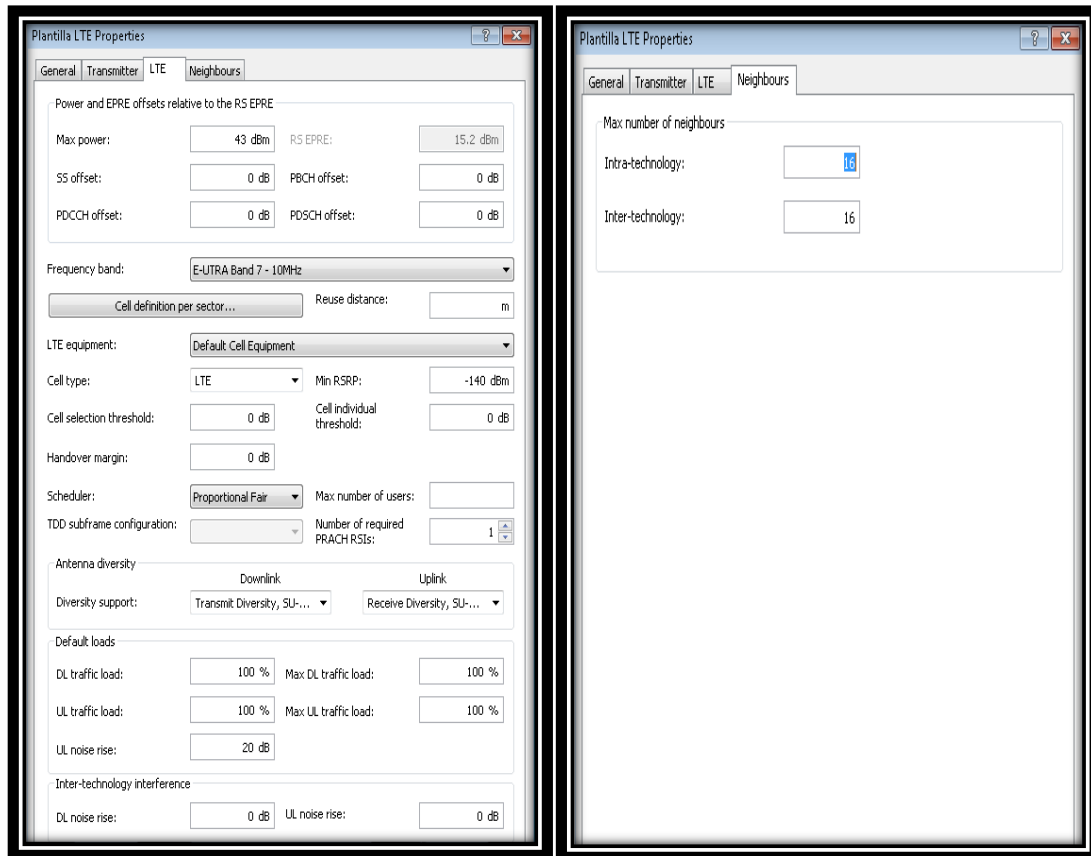


Figura 46: Configuración de la plantilla LTE (pestañas *General* y *Transmitter*).





**Figura 47: Configuración de la plantilla LTE (pestañas LTE y Neighbours).**

Como última apreciación sobre este apartado, cabe mencionar que se ha considerado una configuración por defecto del *Feeder* a 2100 MHz puesto que para un cable de, aproximadamente, 0,5 m no se contempla la introducción de una atenuación apreciable para una frecuencia, en nuestro caso, 500 MHz superior.

Llegados a este punto, procedemos a dar por concluida la parte encargada de configurar nuestro entorno de trabajo para dar lugar al capítulo de desarrollo del proyecto en sí.



## 5.- Desarrollo

---

Tal y como se ha mencionado en el capítulo 3, el diseño de una red está formado por dos etapas básicas y fundamentales: La fase de planificación y la etapa de dimensionado. Por tanto, el presente capítulo tiene como objetivo mostrar la implementación de este diseño a través del *software* ATOLL. Para conseguir tal meta de manera clara y estructurada se realizará una división del capítulo en dos apartados: Planificación y dimensionado.

### 5.1 Planificación

En un primer lugar, a la hora de tomar la decisión acerca del emplazamiento de las estaciones base se ha pretendido usar los mismos emplazamientos que usan las tecnologías de acceso móvil anteriores. Por eso, en la fase inicial se han tomado como referencia los emplazamientos procedentes de dos fuentes: Por un lado, se han añadido y recopilado en un documento de Excel los emplazamientos procedentes de un portal web del ministerio de industria, energía y turismo [16]. Por otro lado, con el fin de complementar la información extraída de la primera fuente, se han incorporado aquellas estaciones base que se incluyen en un archivo otorgado por la propia guía y tutora del proyecto, Anna Umbert.

De todas formas, en caso de ser necesario, serán añadidas nuevas estaciones base en futuros apartados, siempre razonando el motivo de su implementación.

A modo de nota recordatoria, puesto que ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, el modelo de propagación usado es el *Standard Propagation Model* (SPM) y su configuración puede contemplarse en la siguiente captura:

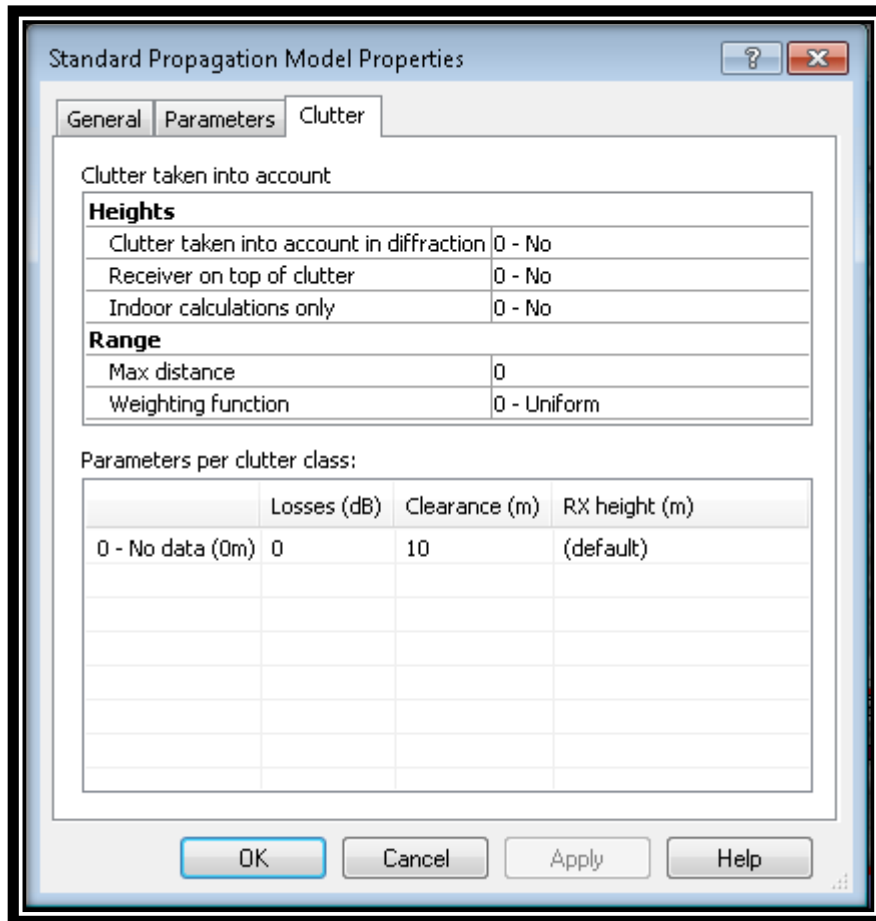


Figura 48: Configuración del Standard Propagation Model (SPM).

Para la verificación de la cobertura en la zona de estudio, en primer lugar se ha realizado una predicción de cobertura por nivel de señal puesto que este tipo de predicción muestra la cantidad de potencia presente en cada pixel del mapa, sin tener en cuenta a que transmisor pertenece dicha potencia. Por tanto, es una predicción idónea para visualizar si hay zonas del mapa que no tienen señal o en las que esta es insuficiente.

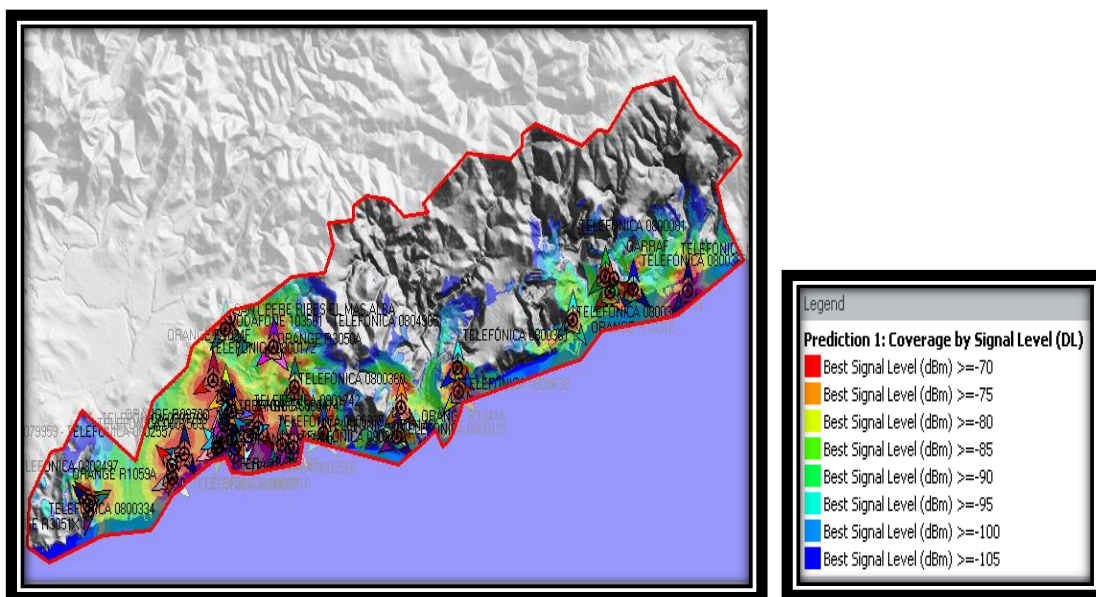


Figura 49: Predicción n°1, cobertura por nivel de señal.

Puede observarse, en la leyenda, que cuanto más rojiza es la zona más nivel de señal albergará esta y, en caso contrario, cuanto más azulada se presente la zona menos potencia residirá en esta. En el mapa también puede observarse que en la zona de interés conviven *Sites* de tres operadoras diferentes: Telefónica, Vodafone y Orange.

Por tanto, la primera conclusión a la que se ha llegado es que, observando el mapa a simple vista, parece haber una cobertura aceptable en la mayoría de los puntos urbanos de la zona de estudio pero, pese a estar proporcionándoles niveles de potencia superiores a -100 dBm, los cuales son niveles de señal suficientes para el funcionamiento del sistema LTE, se presiente la existencia de una interferencia entre transmisores que nos complicará el trabajo si no se trata delicadamente. En cambio, las zonas montañosas existentes entre la zona de Garraf y Sitges, entre otras zonas pertenecientes al área de interés, presentan una nula cobertura. En definitiva, debemos mejorar el entorno de estudio.

Llegados a este punto se han considerado diversas estrategias. En primer lugar, se ha considerado una buena opción escoger las estaciones base pertenecientes a una única compañía telefónica, es decir, Vodafone, Telefónica u Orange. El motivo de esta decisión reside en que los grandes operadores, como son las entidades comentadas anteriormente, tienen sus propias redes distribuidas y después prestan sus recursos a otros operadores que los subcontratan, es decir, puede darse la situación en que Vodafone posea una estación base y vende parte de sus recursos a Telefónica, haciendo que en un mismo punto se transmita señal de dos operadores diferentes. Es por esta razón que en la figura anterior se observan diferentes zonas en las que conviven dos o tres *Sites* en una misma coordenada o en coordenadas relativamente cercanas. Por tanto, se ha decidido deshacerse de todas las estaciones base que no pertenezcan a Telefónica ya que es la operadora que ofrece una red más extensa y compacta. Finalmente, con esta modificación se espera ver y comprobar que tanto el nivel de señal como la interferencia mejoran considerablemente.

La segunda maniobra de mejora ha consistido en incrementar el número de estaciones base con el fin de conseguir paliar los problemas de cobertura que presenta la primera predicción. Véase a continuación:

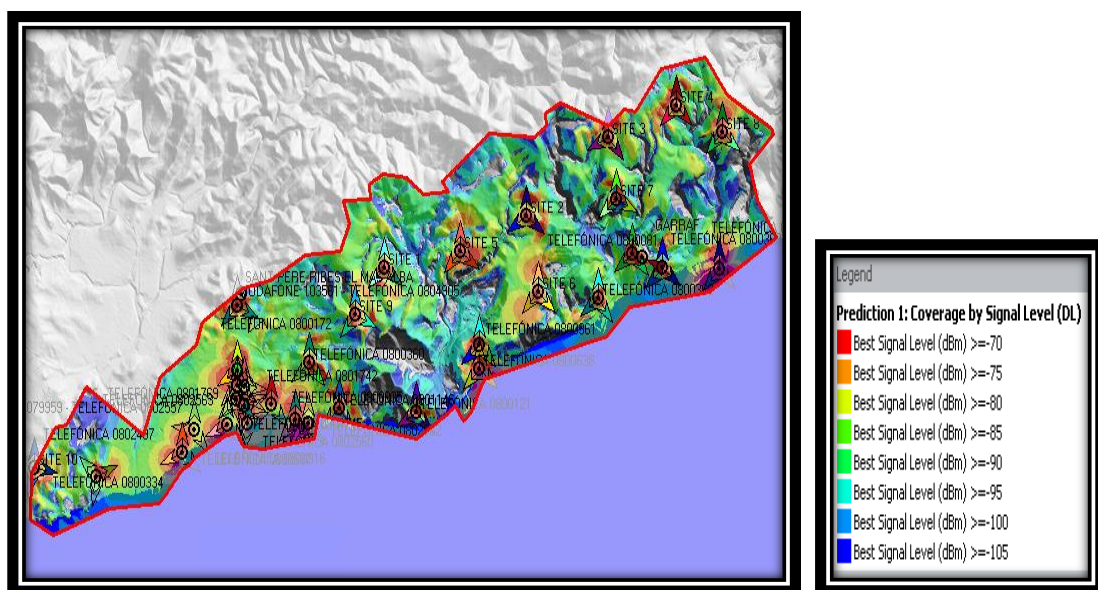


Figura 50: Predicción nº1, cobertura por nivel de señal del nuevo entorno de trabajo.

Tal y como se observa en la figura adjunta, se han añadido un total de 10 estaciones base nuevas, intentando trazar una diagonal y favoreciéndose de la opción que ofrece Atoll, *Move to a Higher Location* para obtener una mejor cobertura por nivel de señal. Además, se han eliminado todas las estaciones base que no pertenecen al operador de Telefónica y se han seleccionado los *Transmitters* adecuados para disminuir al máximo la interferencia.

Finalmente, se puede comprobar visualmente como se ha corregido la falta de cobertura presente en la figura 49 y, además, se ha corroborado con la ayuda del histograma que ha mejorado ligeramente la cobertura resultante, obteniendo unos niveles de potencia superiores a -95 dBm en el 85% de la zona de estudio.

La siguiente figura muestra una predicción de las zonas solapadas. Para informar al lector, este tipo de predicciones muestran el número de transmisores que están proporcionando nivel de señal a una determinada zona y así, hacerse una idea de si se tendrán muchos interferentes o no. Por lo tanto, en este estudio, en cada pixel del mapa se tendrá un color que indicará el número de transmisores que proporcionan señal en ese pixel y, de la misma forma que en el caso anterior, cuanto más rojizo sea ese color implicará que más transmisores proporcionan señal en ese pixel. De forma análoga, cuanto más azul sea, menos.

El histograma de la misma figura, muestra el número de servidores (transmisores que proporcionan señal a una zona) que cubren cada porcentaje de terreno de la zona de estudio.

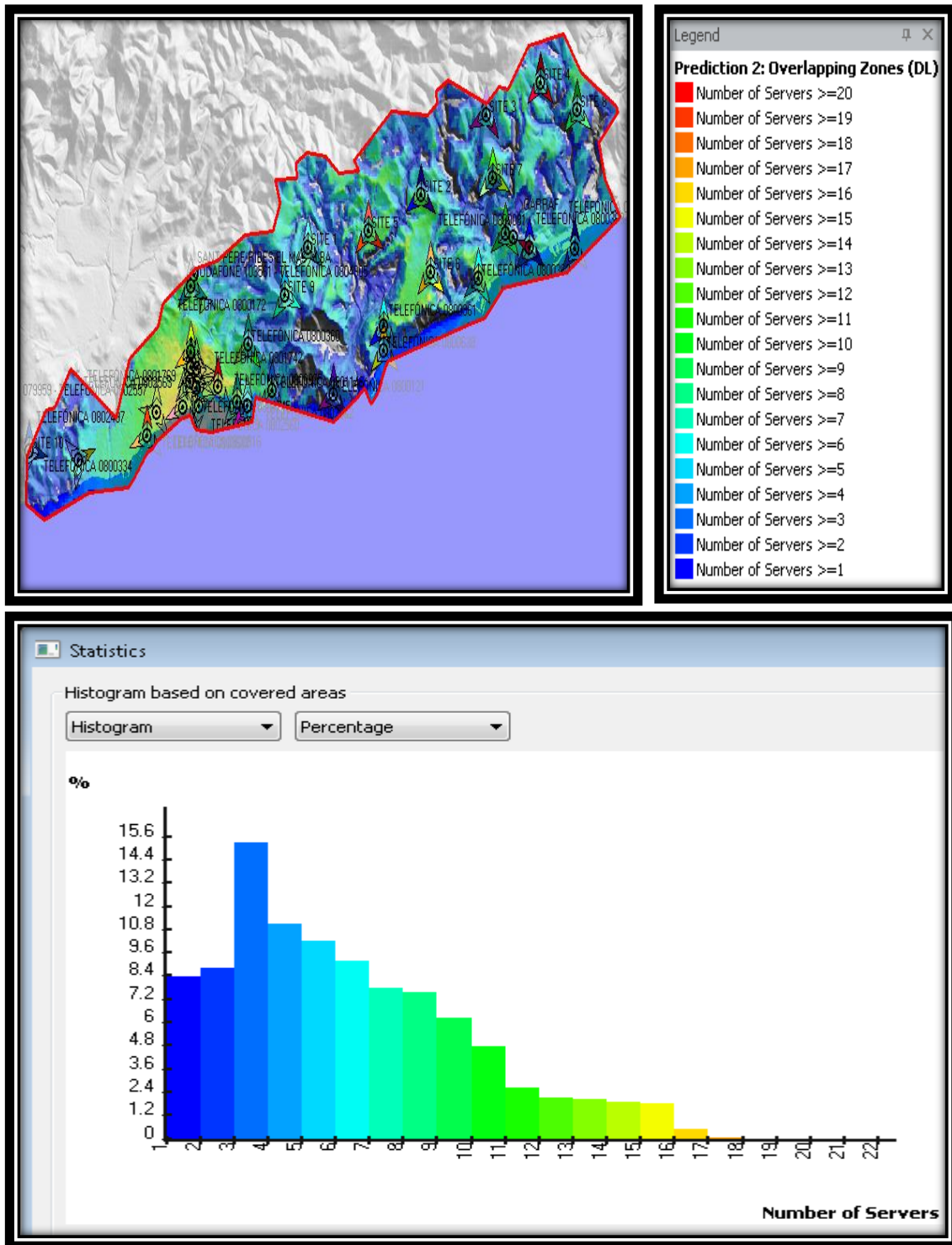


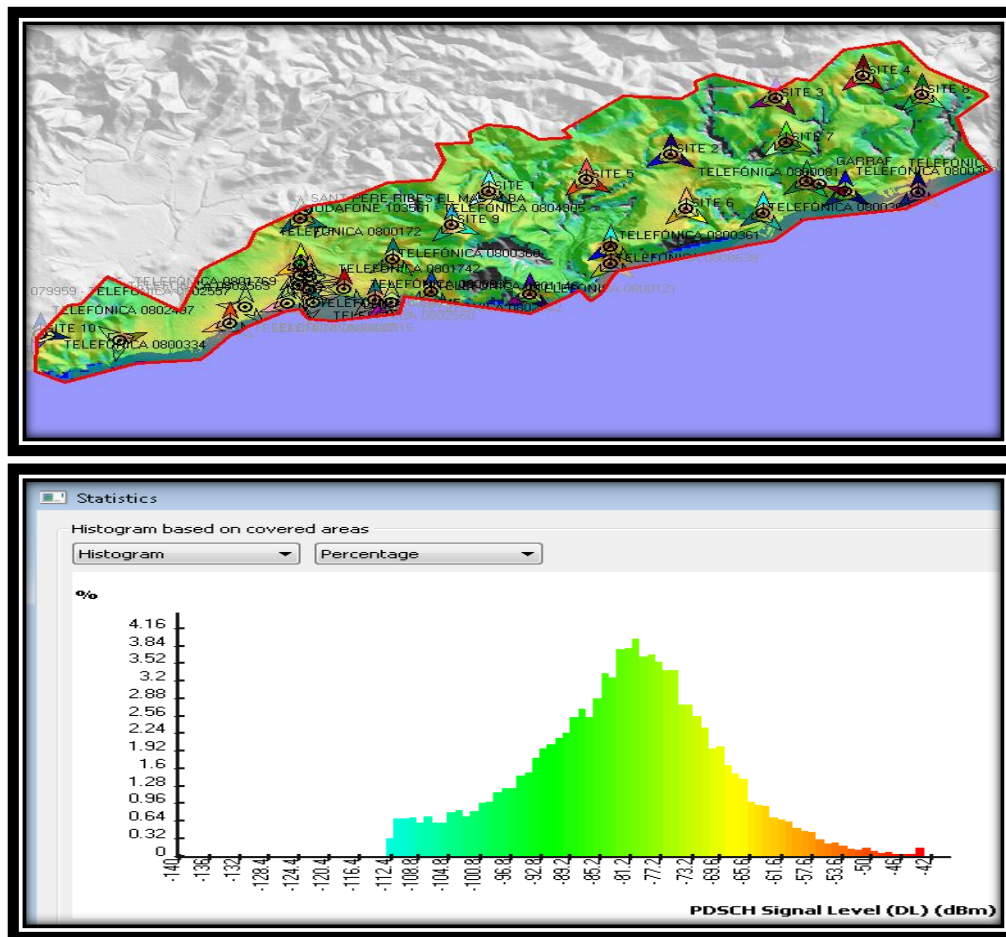
Figura 51: Predicción n°2, zonas solapadas.

En nuestro caso, el histograma nos muestra que en la mayoría del terreno, aproximadamente el 75%, se tienen 10 o menos servidores. En otras palabras, esta información se traduce en que en el 75% de la zona de trabajo hay señales pertenecientes a 10 o menos servidores. Esto resulta ser una buena noticia, puesto que los posibles problemas en relación a interferencias que puedan surgir debido a la excesiva presencia de servidores se hacen presentes cuando existen zonas en las que conviven una veintena de servidores. Hoy en día es habitual, y la vez prácticamente inevitable, encontrar una diversidad de transmisores como la obtenida en este proyecto.

En el mismo histograma, se observa como a partir de 8 servidores el porcentaje de zona ocupada disminuye de forma exponencial obteniendo muy poco porcentaje de área con más de 12 servidores (6% aproximadamente). Cabe decir que el hecho de desactivar los transmisores que puedan entorpecer la calidad de la comunicación ha sido el detonante de los resultados obtenidos.

Volviendo al mapa, y para finalizar con el análisis del solapamiento entre zonas, solo se quiere anotar que la única zona en la que puedan surgir importantes problemas de interferencias se ubica en la zona urbana de Sitges, donde se acumulan un mayor número de antenas con muy poca distancia entre ellas.

Una vez realizado el estudio de cobertura de las zonas y viendo que este es satisfactorio, se ha realizado un estudio de cobertura por nivel de señal de los canales más relevantes para *Downlink* (DL) y *Uplink* (UL), en concreto, observando el nivel de señal y de C/N de los respectivos canales compartidos para cada uno (PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) en el caso del DL y PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) en el caso del UL). Véase la figura adjunta:



**Figura 52: Predicción n°3, análisis de señal efectiva (PDSCH).**

La figura 52 representa una predicción del nivel de potencia del canal PDSCH. En este tipo de predicción se muestra la cantidad de potencia, de la señal a estudiar, que llega a cada pixel del mapa, siguiendo la misma escala de colores que se han utilizado en los caso anteriores. Por tanto, el color rojo simboliza más potencia mientras que el azul menos.



El motivo por el que ha se ha elegido el PDSCH reside en que es una señal de vital importancia ya que transporta datos de usuario y es capaz de transportar información de aviso por parte de la red.

Analizando los resultados expuestos en la figura se observa que el mapa es, en su mayoría, de un color verdoso y amarillento, hecho que se traduce en que la mayoría de las zonas del mapa tendrán niveles de potencia para el PDSCH superiores a -95 dBm. Además, dicha información puede comprobarse revisando el histograma que, representa los niveles de potencia del PDSCH que cubren cada porcentaje de la zona de estudio. Por tanto, de dicho histograma se extrae que resulta ser, aproximadamente, un 85% de la zona de interés la que presenta un nivel de potencia superior a los -95 dBm comentados anteriormente.

Con ánimo de mejorar el análisis del PDSCH, se ha realizado una predicción de la C/N del mismo. A diferencia del caso anterior, esta predicción muestra en cada pixel del mapa la C/N o relación señal a ruido para este canal. A continuación se muestran los resultados obtenidos gráficamente:

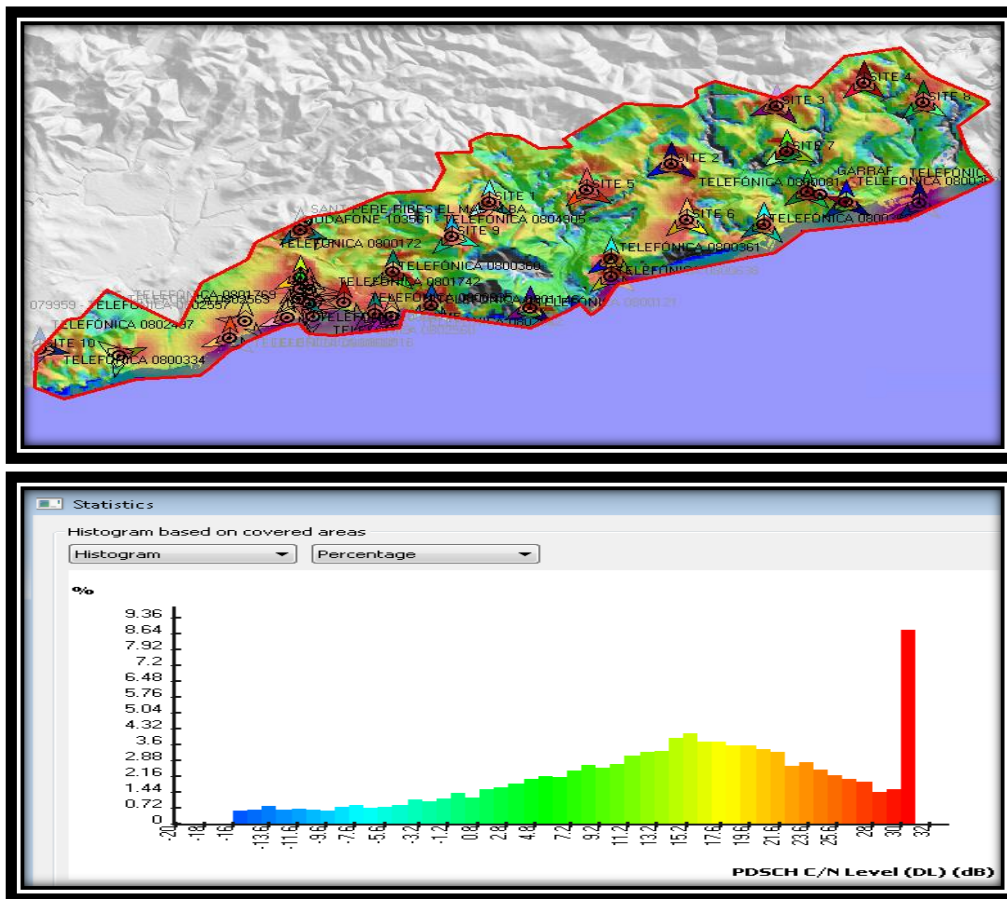


Figura 53: Predicción nº 4, análisis de señal efectiva (PDSCH C/N).

Si se analiza esta última predicción de la misma forma que la anterior, se puede afirmar que la mayoría del mapa contiene colores verdes, amarillos y, en el caso de las zonas que se encuentran más cercanas a los eNB, rojos tal y como se esperaba antes de realizar la predicción puesto que, es sabido que a menor distancia entre usuario y eNB, mejor potencia de señal se recibirá. Por otra parte, del histograma obtenemos que, aproximadamente el 70% de la población situada en la zona de estudio tiene niveles de C/N superiores a 10 dB. En otras palabras, este hecho implica que prácticamente el 70% de la zona de interés recibe 10 veces más cantidad de señal del PDSCH que de ruido, lo cual nos hace ser optimistas en cuanto a problemas de cobertura en nuestra zona. Además, resulta coherente que exista este 15% de diferencia respecto a la predicción anterior ya que, aunque no se está midiendo del todo lo mismo, resultaría extraño a la vez que incorrecto abarcar el mismo porcentaje de mapa en presencia de ruido.

Finalmente, a la vista de los resultados se espera que el enlace descendente no tenga problemas en términos de recepción de potencia puesto que, mayoritariamente, suministra niveles de potencia mayores a -95 dBm en sus zonas de cobertura, lo cual es un nivel de potencia suficiente para que el sistema LTE trabaje de forma adecuada.

De forma análoga a los análisis representados en las figuras 52 y 53, las imágenes que se presentan a continuación representan el análisis del canal PUSCH, comentado anteriormente, y del canal PUCCH que es encargado de transmitir información de control del usuario si este no tiene datos a transmitir. Por lo tanto, en estos casos nos centramos en el enlace ascendente o *Uplink* (UL). Véase a continuación:

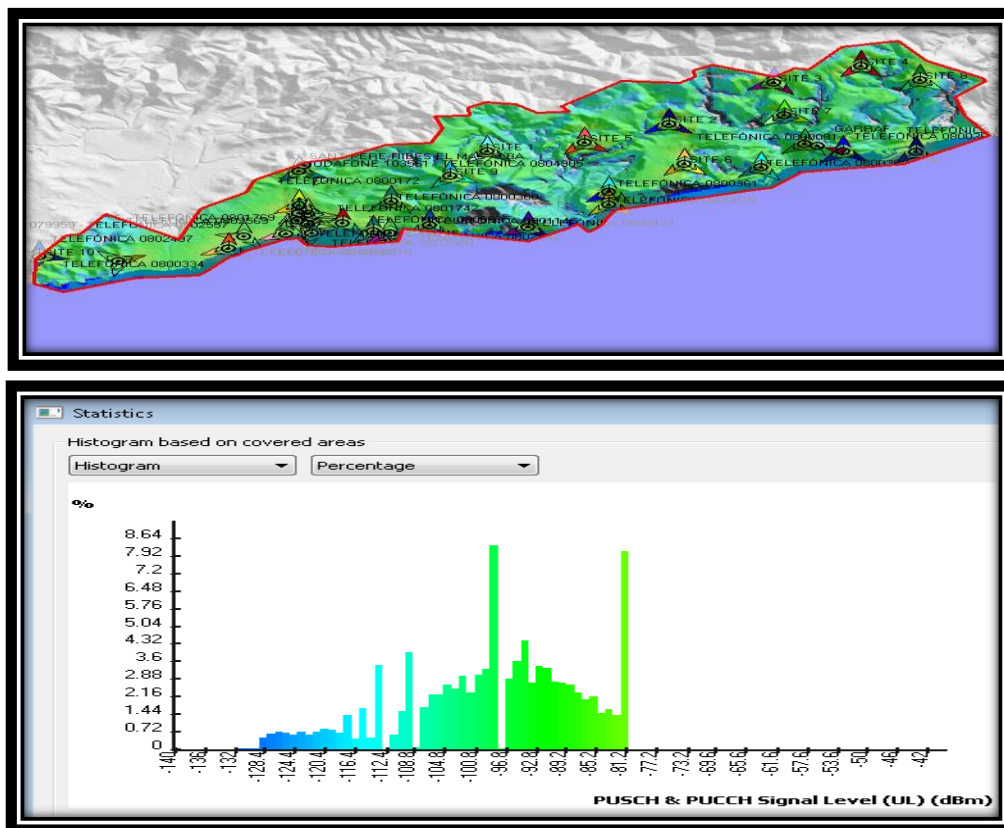


Figura 54: Predicción nº 5, análisis de señal efectiva (PUSCH & PUCCH)

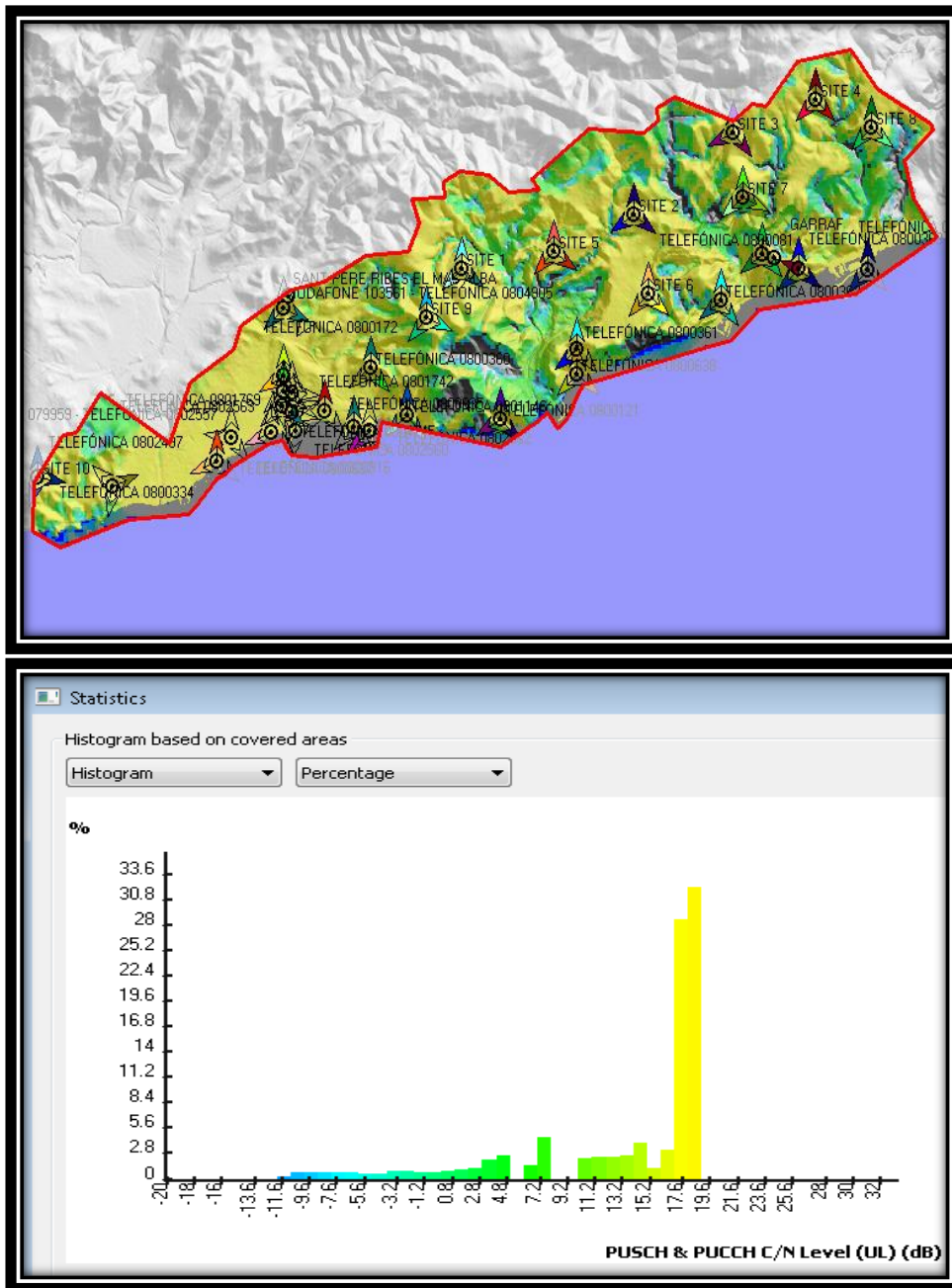


Figura 55: Predicción nº 6, análisis de señal efectiva (PUSCH & PUCCH C/N).

Después de realizar los mismos análisis que para el PDSCH y visto que el modo de interpretación es el mismo, procedemos a analizar los resultados directamente.

Prestando nuestra atención a la figura 54 se concluye que los resultados parecen adecuados y lógicos debido a que, aproximadamente, el 75% del área analizada presentan niveles de potencia superiores a -110 dBm. Sin embargo, existe un porcentaje de, aproximadamente, el 25% de la población del área de interés, que presenta unos niveles de potencia de entre -110 y -130 dBm. En dichos casos el funcionamiento de este canal puede adentrarse en un compromiso. Cambiando a la figura 55, se observa que, por lo general, los resultados también son satisfactorios puesto que se tiene una C/N superior a los 10 dB para el 75% del área analizada, llegando a obtener niveles de 18 dB de diferencia, es decir, que el nivel de potencia de la señal útil es, aproximadamente, 63 veces al del ruido.

Finalmente, para dar por finalizada con esta parte inicial de la planificación previa al dimensionado, se han realizado ciertas predicciones dependientes de la carga de tráfico. Dichas predicciones sirven para analizar la capacidad de la red y tener una primera aproximación de su funcionamiento. La carga de tráfico puede ser prefijada por el usuario, de forma uniforme, o ser el resultado de simulaciones de mapas de tráfico. En esta sección se opta por la opción de prefijar un valor del 85% de carga, valor por encima del 80% de carga que las operadoras consideran como umbral en el que la red está congestionada, para realizar un estudio en un caso más crítico. La segunda opción se realizará en apartados posteriores con el fin de optimizar la red.

En las siguientes figuras se pretende mostrar las predicciones de  $C/(I+N)$  tanto para el canal PDSCH (DL) como para los canales PUSCH y PUCCH (UL). La predicción de  $C/(I+N)$  para el canal PDSCH representa en cada punto del mapa la relación, en decibelios, señal útil a interferencia y ruido de este canal. Esto resulta ideal para observar si se tiene una cantidad de señal interferente nociva para el despliegue del servicio. Para facilitar la comprensión de los resultados, se recuerda que cuanto más azulado sea un punto peor  $C/(I+N)$  presentará, mientras que cuanto más rojo será mejor. De forma análoga, el análisis de la predicción de  $C/(I+N)$  para el PUSCH y PUCCH es idéntico al realizado para la predicción anterior. A continuación, se muestran los resultados y las conclusiones obtenidas de los mismos.

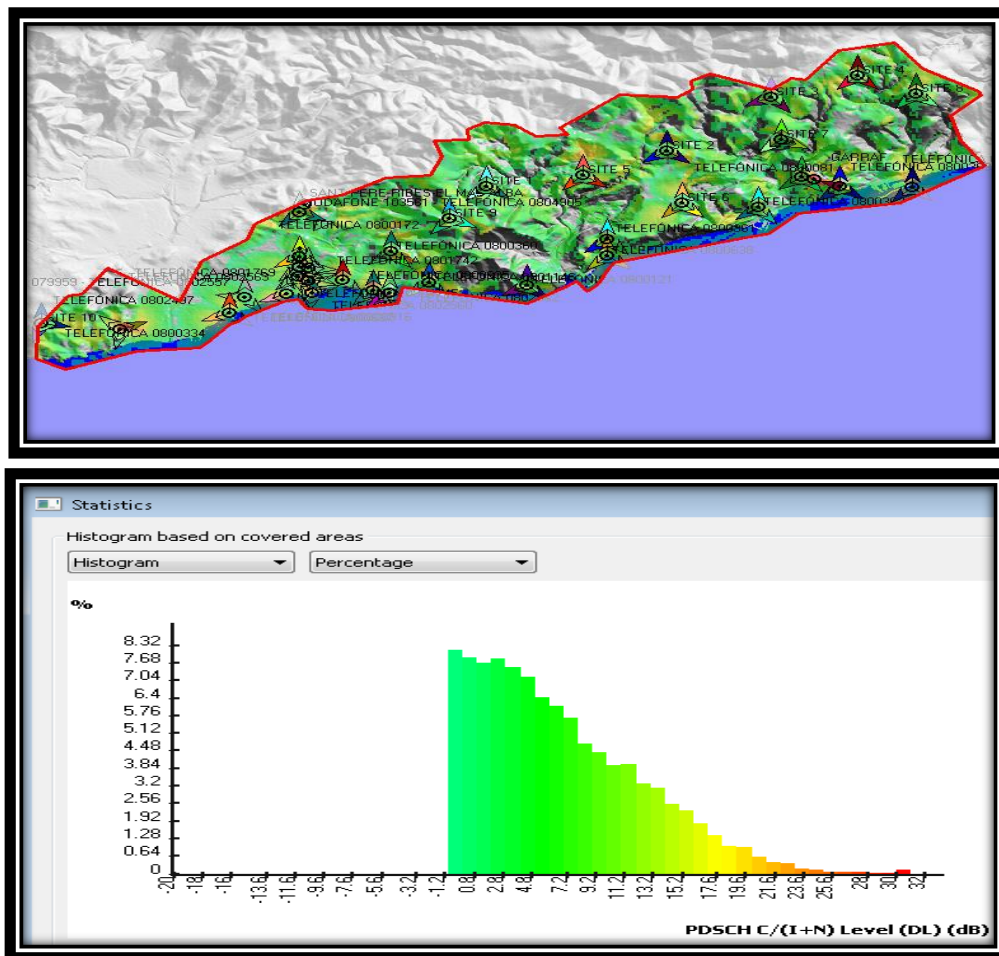


Figura 56: Predicción nº 7, Cobertura por nivel de PDSCH  $C/(I+N)$

En la figura anterior se observa en el mapa que las zonas cercanas a los transmisores tienen un  $C/(I+N)$  de color azul verdoso, hecho que se reivindica en el histograma donde se contempla que, aproximadamente, el 65% de los niveles de  $C/(I+N)$  es inferior a 10 dB. Además, es necesario mencionar que debido a que el usuario fija unos umbrales y fuera de estos no se representa nada, se han manifestado muchas zonas en las que no se ha representado la  $C/(I+N)$ . Es más, en este estudio concreto se han considerado unos umbrales desde -20 dB hasta 30 dB. Por tanto, en este caso los puntos en los que no hay nada se deben a niveles de  $C/(I+N)$  tan bajos que son despreciables.

Por tanto, la conclusión que nos desvela esta predicción es que debemos tratar las interferencias a la hora de dimensionar la red para mejorar estos resultados, intentando paliar ese 65% que recibe un nivel de señal por debajo de lo necesario.

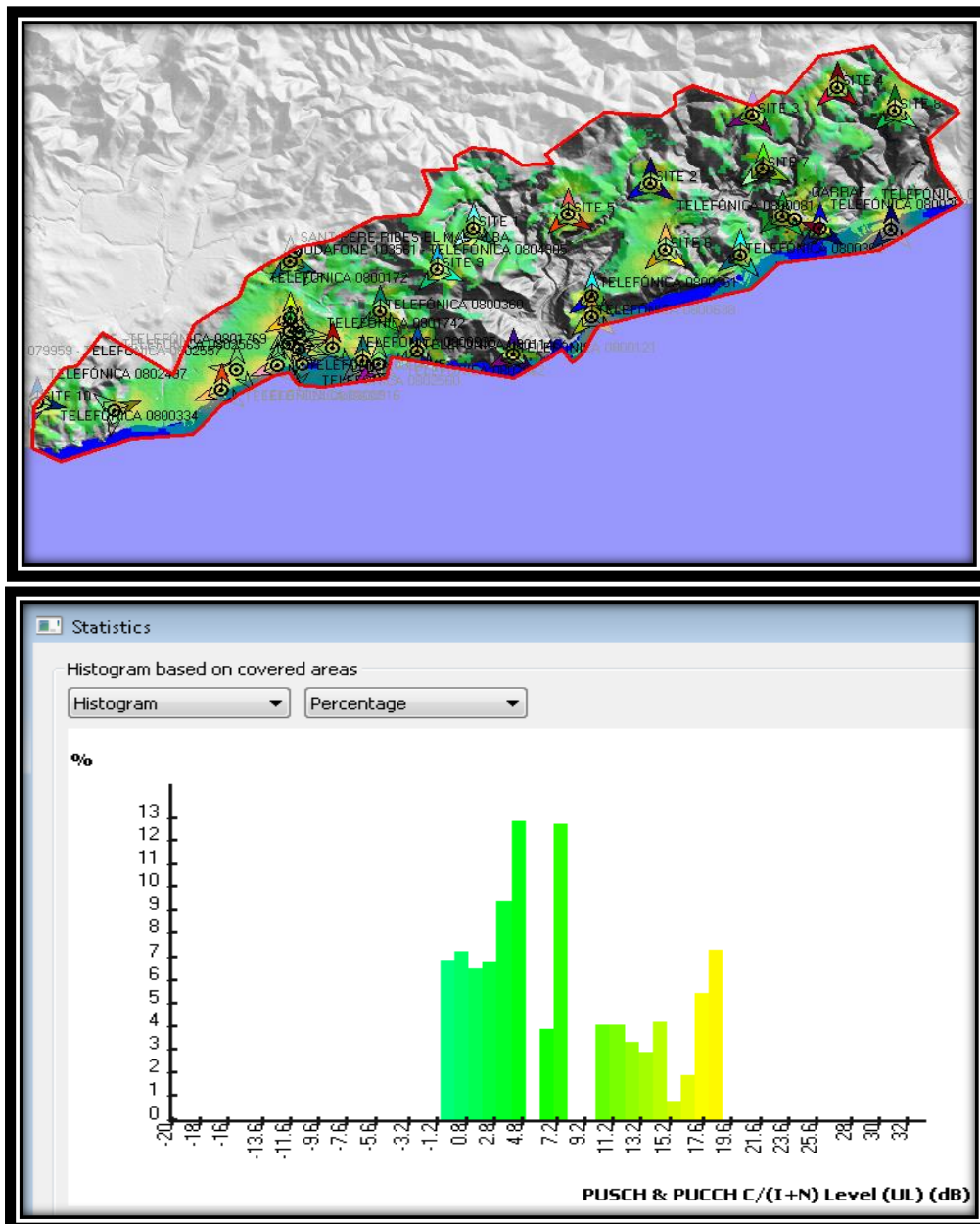


Figura 57: Predicción nº 8, Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH  $C/(I+N)$

En el caso del enlace ascendente, el análisis elaborado ha seguido el mismo procedimiento que para el descendente. Para este caso observamos dos principales diferencias respecto al caso anterior. Por un lado, se tienen mejores niveles de  $C/(I+N)$  que en el *Downlink*, lógicamente, ya que en el nivel de señal enviado por la estación base es superior y por otro lado, la altura y ubicación de los *Sites* les proporciona cierta ventaja a la hora de abarcar terreno. Sin embargo, la única igualdad que observamos en ambas predicciones reside en que, en los dos histogramas, los niveles de  $C/(I+N)$  de un aproximado 65% de la zona de estudio son inferiores a los 10 dB que consideramos imprescindibles a la hora de elaborar una red LTE.

Por lo tanto, para los estudios de nivel de  $C/(I+N)$  los resultados obtenidos han sido insuficientes para el correcto funcionamiento del sistema LTE. El motivo de esta ineficiencia reside en que se han obtenido niveles de  $C/(I+N)$  muy bajos, sobretodo en el enlace ascendente, y zonas muy amplias en las que esta relación es prácticamente despreciable debido al nivel de señal interferente presente en ellas.

En consecuencia a los resultados obtenidos se ha decidido observar mediante las predicciones *Service Area Analysis*, tanto para el DL como para el UL, los mejores *Radio Bearers* disponibles para ambos enlaces. Véanse los resultados obtenidos:

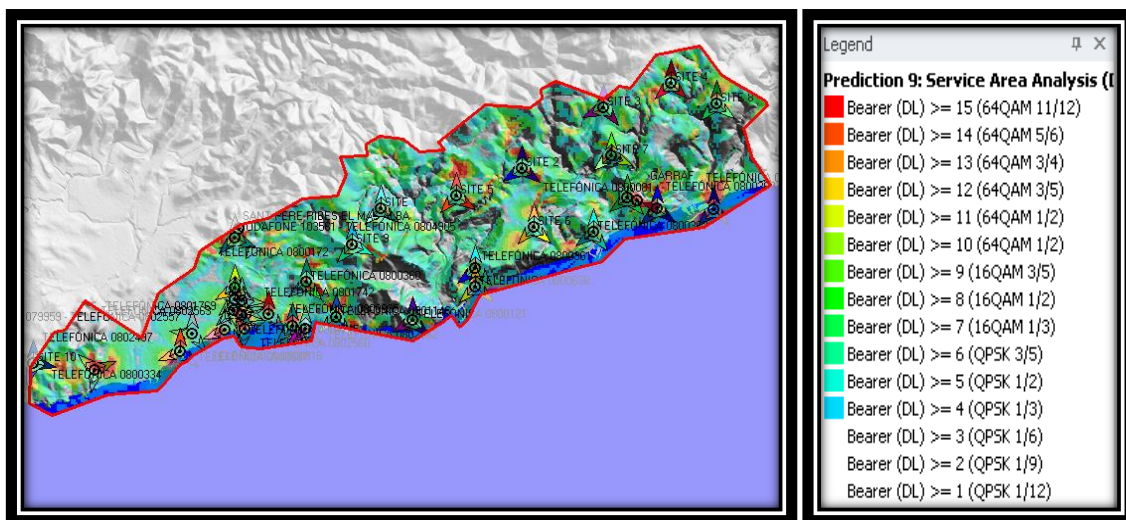


Figura 58: Predicción nº9, análisis del área de servicio (DL)

En la figura 58 se muestra una predicción de los mejores servicios portadores disponibles en función de la  $C/(I+N)$ . Con el fin de facilitar la comprensión de los resultados, en cada pixel del mapa se representa por un color el tipo de servicio portador que es posible obtener. Por tanto, se ha observado que cuanto más próximo se encuentra del transmisor mejor será el servicio portador que se podrá emplear, en otras palabras, se podrá utilizar una modulación espectralmente más eficiente cuanto más cercanos del transmisor estemos, aunque eso sí, la modulación será menos robusta. No obstante, si se consulta el histograma se observa que, el 55% de los servicios portadores disponibles son aquellos que tienen modulaciones robustas como la QPSK (véase la leyenda) y no se llegan a ofrecer más que el 45% de servicios portadores con la modulación QAM, hecho que va a limitar impactantemente la velocidad máxima de bajada que se pueda alcanzar.

Otro hecho que también hay que mencionar es que, tal y como ha pasado en predicciones anteriores (predicción nº 7 y 8), hay zonas en las que nos ofrece ningún *Radio Bearer* ya que la relación  $C/(I+N)$  es bastante mala por la abundante presencia de señales interferentes.

Llegados a este punto, se ha realizado una nueva predicción del estilo de la anterior aunque, en este caso, para el enlace ascendente. En ella, se observa que, pese a ofrecer servicios portadores en puntos en los que en el *Downlink* no son posibles, los servicios prestados no alcanzan en la mayoría del mapa el esquema menos de robusto de modulación y, por lo tanto, no permitirán aprovechar todo el potencial que contiene el sistema LTE. Véase el figura que justifica estas líneas.

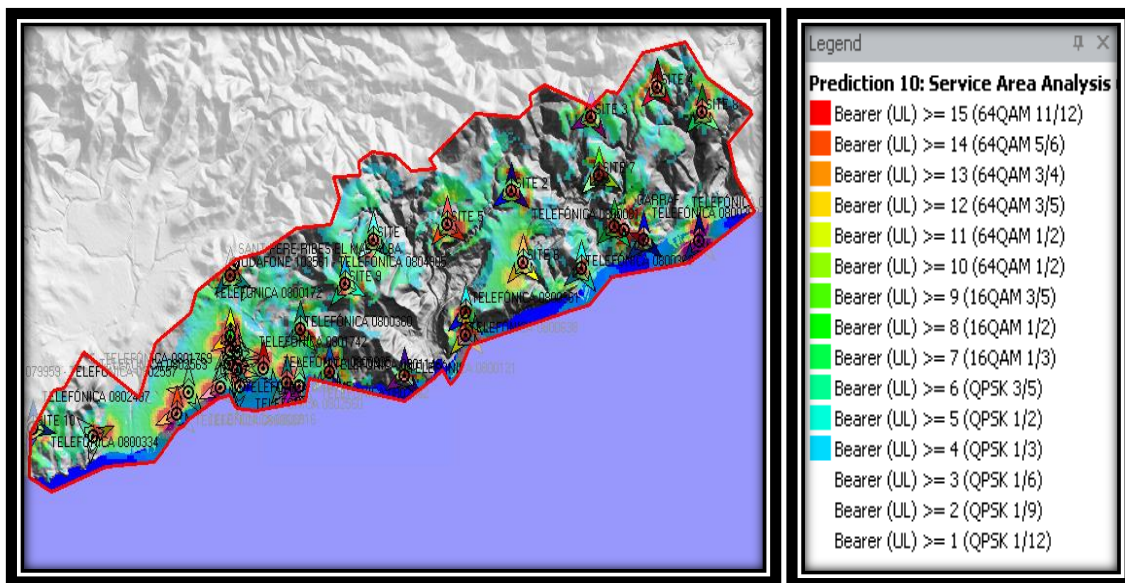


Figura 59: Predicción nº 10, análisis del área de servicio (UL)

Por lo tanto, los *Radio Bearers* que se pueden utilizar son tan sólo aquellos respaldados por modulaciones más eficientes y que se encuentran en las zonas cercanas a los transmisores. En el caso de las zonas que se sitúan más alejadas la calidad de la señal no permite el uso de casi ningún *Radio Bearer*.

Finalmente, se ha creído oportuno realizar una última predicción antes de cerrar el apartado. En concreto, se ha elaborado una predicción de *Throughput*, predicción dependiente de la carga que permite calcular y mostrar el *Throughput* y la capacidad de la celda basándose en el nivel de  $C/(I+N)$  en cada píxel del mapa. A continuación, se muestran los resultados obtenidos, tanto para el canal ascendente como para el descendente, pero cabe mencionar que son resultados muy pobres comparados con lo que puede llegar a ofrecer el estándar LTE.

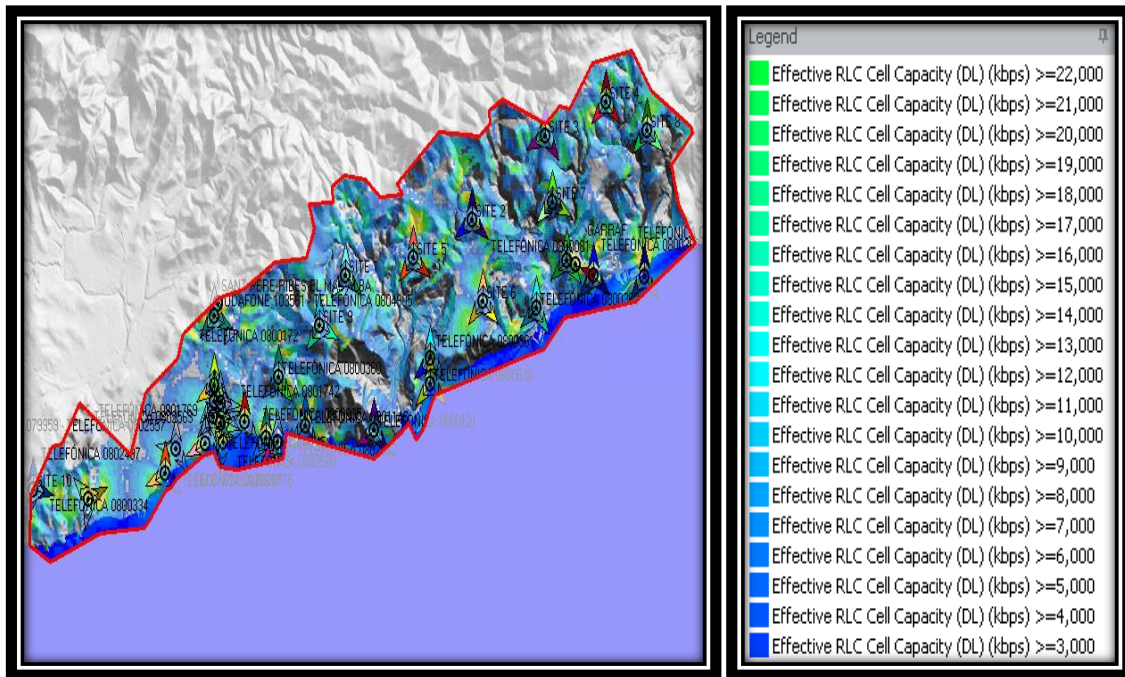


Figura 60: Predicción nº 11, cobertura por *Throughput* (DL)

Tal y como se puede comprobar visualmente en la figura 60 y 61, los resultados obtenidos son los siguientes: En el caso del *Downlink*, se obtienen como mínimo unos 8 Mbps en el 65% de las celdas situadas en las zonas donde hay servicio. Sin embargo, en el *Uplink* podemos confirmar una capacidad, también aproximada, de 7 Mbps o más para el 75% de la zona de estudio. Por tanto, tal y como se había comentado en el párrafo anterior, son resultados más que mejorables.

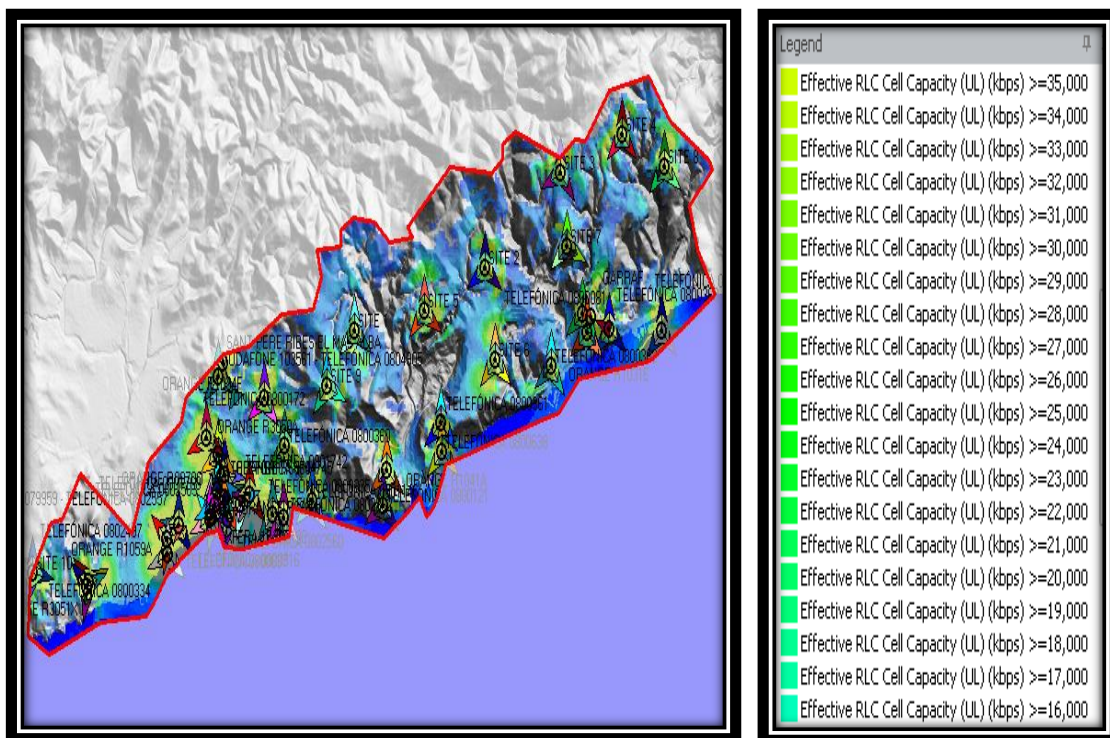


Figura 61: Predicción nº 12, cobertura por *Throughput* (UL)



Para concluir, tras el análisis de los estudios anteriores se llegó a las siguientes conclusiones:

- Existe cobertura adecuada en la zona de estudio.
- Se obtienen resultados favorables para el correcto funcionamiento de la red en relación a niveles de potencia en caso de no tener en consideración la carga y el tráfico de las celdas.
- Por consiguiente, considerando la carga y el tráfico de las celdas, distribuidos de forma uniforme, se puede concluir que se ofrece servicio a determinadas zonas, en concreto a aquellas localidades cercanas a los *Sites* y no a toda nuestra área de interés.
- Para solucionar los presentes problemas hay que realizar modificaciones en la red. Para ello, consultando proyectos anteriores que tratan la materia, se ha creído que una planificación frecuencial puede ser una buena opción.

## 5.2 Dimensionado

Este apartado tiene como misión mostrar el proceso de optimización de la red mediante la modificación de una serie de parámetros y la posterior elaboración de un conjunto de simulaciones que ayuden a comprobar dicha optimización.

En nuestro caso, el proceso de optimización consta de varias partes. En primer lugar, se determinan los vecinos de cada celda. A posteriori, se procede a la asignación de frecuencias por celda y la asignación de identificadores de celda.

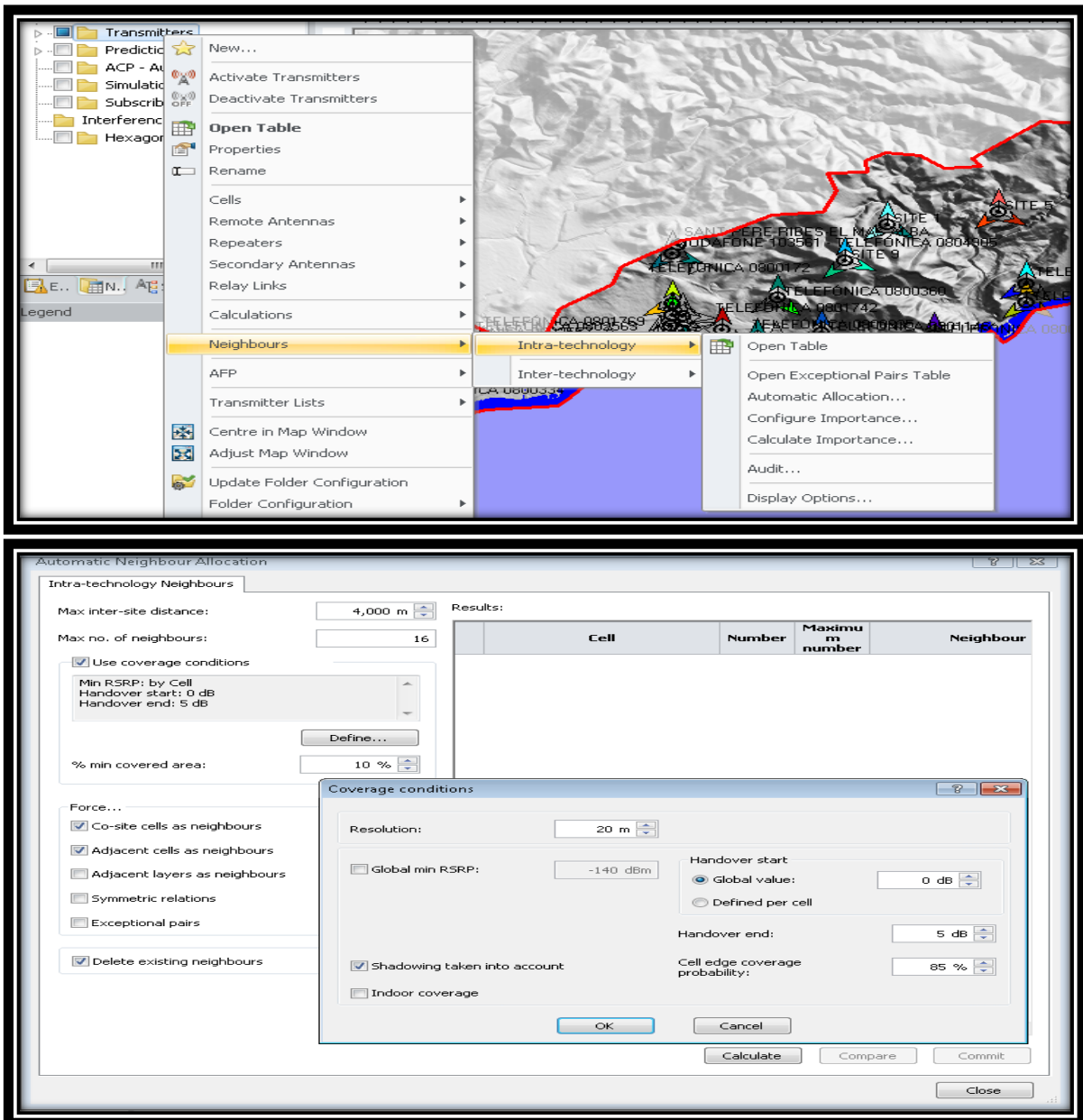
### 5.2.1 Planificación de vecinos y frecuencias

Para la realización de este apartado, se parte de la base de que ATOLL dispone de una herramienta para la asignación automática de vecinos y frecuencias. Sin embargo, antes de adentrarnos en dicha herramienta, se cree conveniente aclarar al lector una serie de conceptos.

Se les denomina vecinos de un transmisor o estación base a aquellos transmisores o estaciones base cuyas áreas de cobertura se solapan con el área de cobertura de la estación base de referencia. En ATOLL, estos vecinos pueden ser asignados de manera automática o manual. El motivo del uso de dichos vecinos reside en que son necesarios para los cálculos de asignación de frecuencias y para cálculos de asignación de recursos a usuarios, es decir, a qué celdas se pueden conectar durante la simulación.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la planificación de vecinos se puede hacer de forma manual, a través del menú *Transmitters* → *Neighbours* dentro de la pestaña *Explorer*. De esta forma se pueden configurar los vecinos intra-technology (*Intra-Technology Neighbours*), es decir, de la propia red U-TRAN, o inter-technology (*Inter-technology Neighbours*) si son de otras tecnologías de acceso. Por otro lado, para la propia red U-TRAN (*Intra-technology*) la asignación de vecinos se puede hacer de forma automática mediante la herramienta *Automatic Neighbour Allocation*. Para ello, debemos realizar click derecho en *Transmitters* → *Neighbours* → *Intra-Technology* → *Automatic Allocation*.

Por tanto, haciendo uso de estas herramientas que nos proporciona ATOLL, se hizo una reasignación automática de los vecinos y de las frecuencias de la red. Véanse a continuación el proceso de configuración y los resultados obtenidos:



**Figura 62: Configuración realizada para la asignación automática de vecinos.**

Finalmente, se han recogido en un documento de Excel los resultados obtenidos. Fruto de la gran extensión de este documento, se he considerado una mejor opción excluir los resultados en un documento externo al presente proyecto.

En cuanto a las frecuencias, el *software* ATOLL ofrece una herramienta muy útil para la planificación de frecuencias automática denominada AFP (Automatic Frequency Planning). Esta herramienta tiene en cuenta matrices de interferencia y distancias de reuso para determinar la asignación de frecuencias. De hecho, también tiene en cuenta la lista de colindancias por cada celda. Por lo tanto, con esta opción es posible hacer la asignación de frecuencias de forma que se reduzca la interferencia intercelular de la red. Es muy importante destacar que la asignación de frecuencias se hace sobre portadoras o *carriers* de una banda. En consecuencia, en nuestro caso la banda que se ha seleccionado para la *plantilla LTE* es la 2620 FDD – 10 MHz (E-UTRA Band 7) y tiene un ancho de banda total de 70 MHz con una canalización de 10 MHz lo que da lugar a 7 canales en terminología de ATOLL. Conclusión, AFP tratará de asignar estas 7 *carriers* a los transmisores.

Otra cuestión que se ha creído conveniente comentar es que es posible realizar la asignación de frecuencias de forma normal abriendo la tabla *Cells* y modificando la columna *Channel Number*, aunque debido a que es un proceso crítico y que requiere la ayuda de ciertos algoritmos en este caso se ha optado lo asignación automática de frecuencias.

Entrando en materia, una vez conocido el proceso lo que se debe hacer es lo siguiente: Click derecho en la carpeta *Transmitters* → *AFP* → *Automatic Allocation* y una vez realizado esto, se ejecuta la asignación de frecuencias con el botón *start*. Una vez realizado el proceso, se clicka *commit* y *close* para guardar los resultados. Obsérvese a continuación:

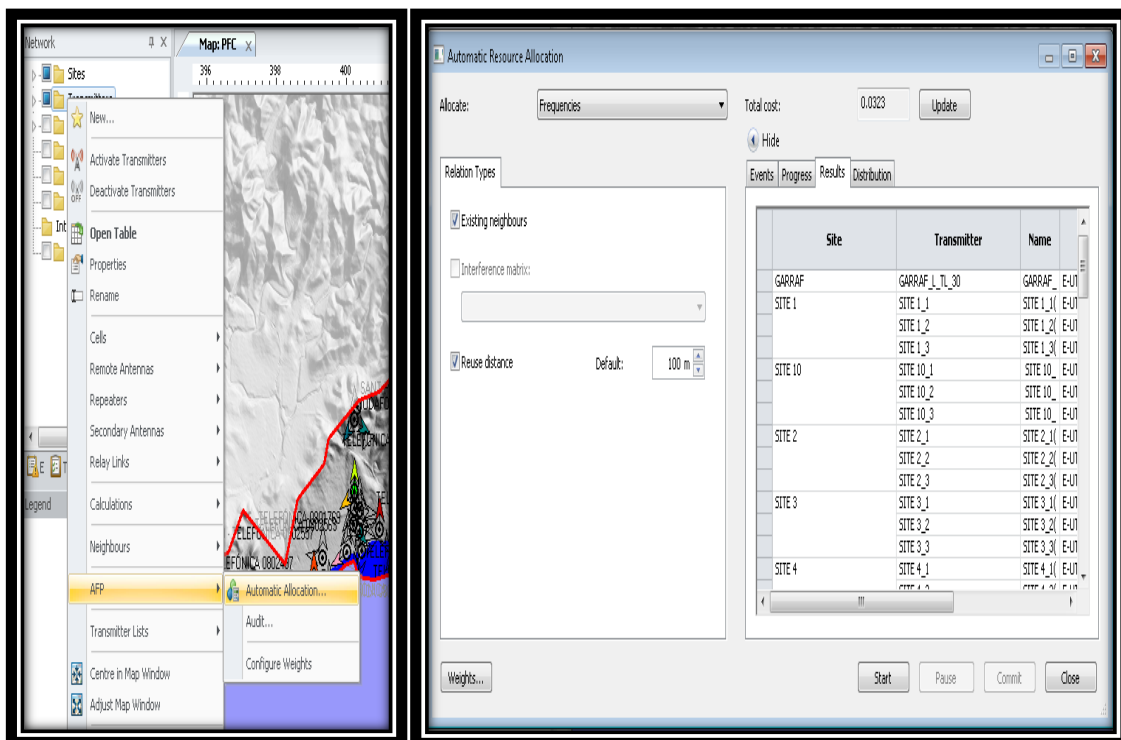


Figura 63: Configuración realizada para la asignación automática de frecuencias.

Para comprobar los resultados, se abre la tabla de celdas y se observa la columna *Channel Number*. Tal y como se ha comentado con anterioridad, se puede observar que se han usado las 7 portadoras disponibles (2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3300, 3400), y que en algunos transmisores no se les ha asignado ningún canal, véase en la figura adjunta el campo *Channel Allocation Status*. A estos transmisores a los que el algoritmo automático no les ha podido asignar canal se les puede asignar uno manualmente pero en nuestro caso se supone que corresponden a transmisores alejados de la zona de cálculo, por lo que los dejaremos como están.

Frequency Band	Channel Number	Channel Allocation Status
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,400	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,900	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,100	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,900	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,100	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,400	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,000	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,400	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,300	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,900	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,900	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,300	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,900	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,400	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,200	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,200	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,000	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,900	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,400	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,200	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,200	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Not Alloca
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,000	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2,800	Allocated
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3,300	Allocated

Figura 64: Comprobación de la asignación automática de frecuencias.

Llegados a este punto, se ha creído conveniente duplicar la predicción nº7 y volverla a analizar después de la asignación de vecinos y la planificación de frecuencias. Véase en la figura adjunta como los resultados son sumamente mejores a los obtenidos en la figura 56. Fruto de que se ha reducido la interferencia intercelular se ha pasado de tener un, aproximado, 65% de zona de interés con niveles inferiores a 10 dB a tan sólo un 25%. Por tanto, hechos como este nos indican que estamos trazando una buena planificación y dimensionado. Véase a continuación:

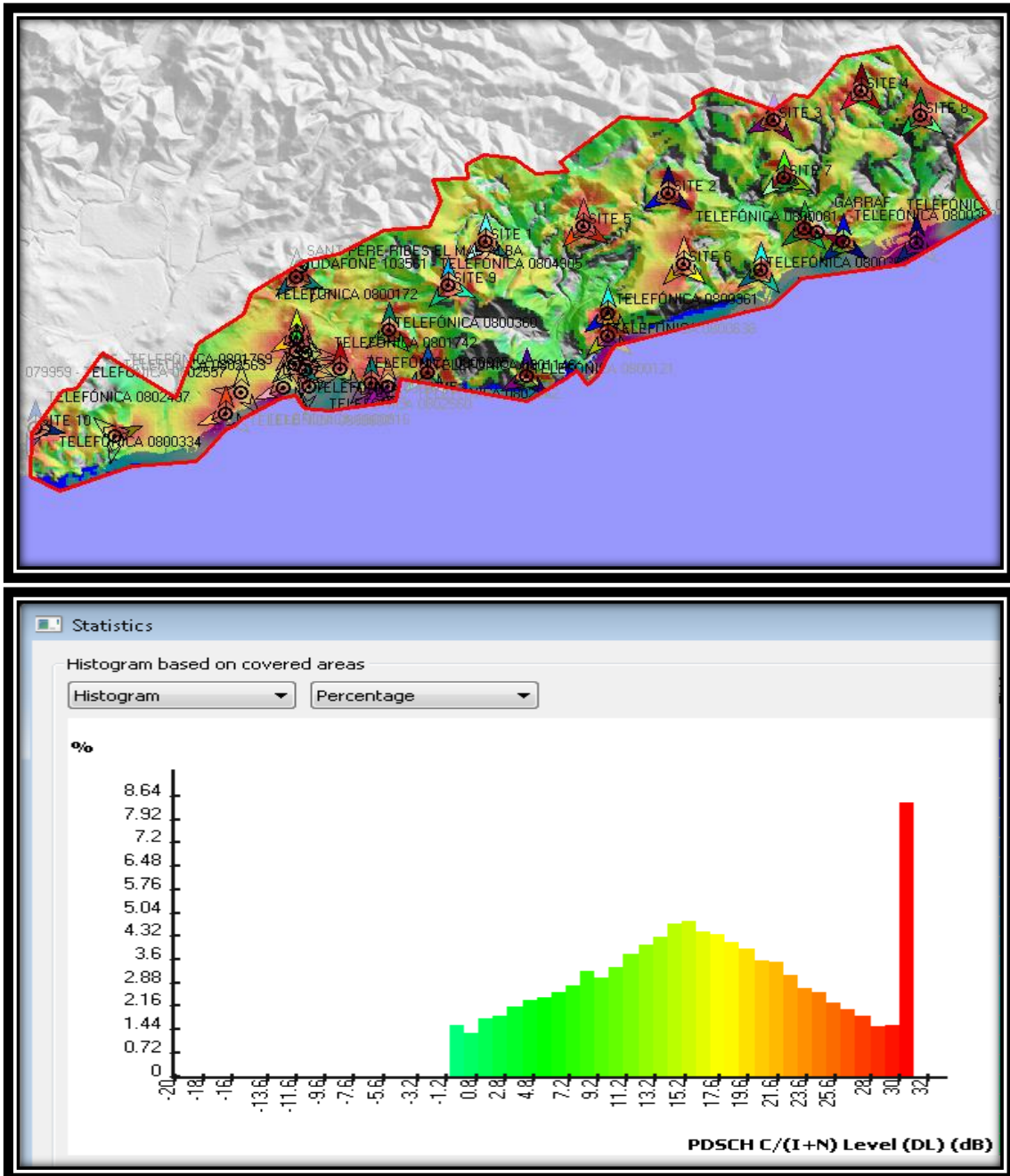


Figura 65: Predicción nº13, cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) – 7 Portadoras.

## 5.2.2 Planificación del Physical Cell ID

Rescatando información comentada en capítulos anteriores, el *Physical Cell ID* es un entero que varía entre 0 y 503 tal y como se define en las especificaciones del 3GPP. Se usa para que el terminal sepa identificar cada celda de forma que sepa interpretar las señales pseudo-aleatorias de referencia transmitidas por la base y que son usadas por el terminal para determinar la calidad del canal recibido. Además, ATOLL usa el *Physical Cell ID* para determinar el funcionamiento de los mecanismos de coordinación de la interferencia intercelular (ICIC). Por lo tanto, si no se hace una planificación del *Physical Cell ID* tanto la identificación de la celda, como el funcionamiento de la medida de la señal de referencia se ve comprometida.

Para facilitar la identificación del *Cell ID* al terminal, el rango de 504 *Physical Cell IDs* se divide en 3 grupos de 168 *Cell ID*. Cada grupo está determinado por el parámetro *Primary Synchronization Signal (PSS) ID* mientras que cada elemento dentro de un grupo se obtiene del *Secondary Synchronization Signal (SSS) ID*, que se obtienen en el proceso de sincronización en tiempo y frecuencia del terminal con el sistema.

Igual que en el caso de la planificación de frecuencias, la planificación del *Physical Cell ID* se puede hacer de forma automática en ATOLL. Esta opción se encuentra en el módulo AFP. En nuestro caso, se ha optado por realizar la planificación de forma automática y por ello, se debe realizar click derecho en *Transmitters* → *AFP* → *Automatic Allocation*. Una vez aparecida la pestaña de configuración, debemos seleccionar *Physical Cell IDs* dentro del campo *Allocate* y seleccionar los campos *Start*, *Commit* y *Close*. A continuación se adjunta el proceso en un conjunto de imágenes para así, facilitar la comprensión.

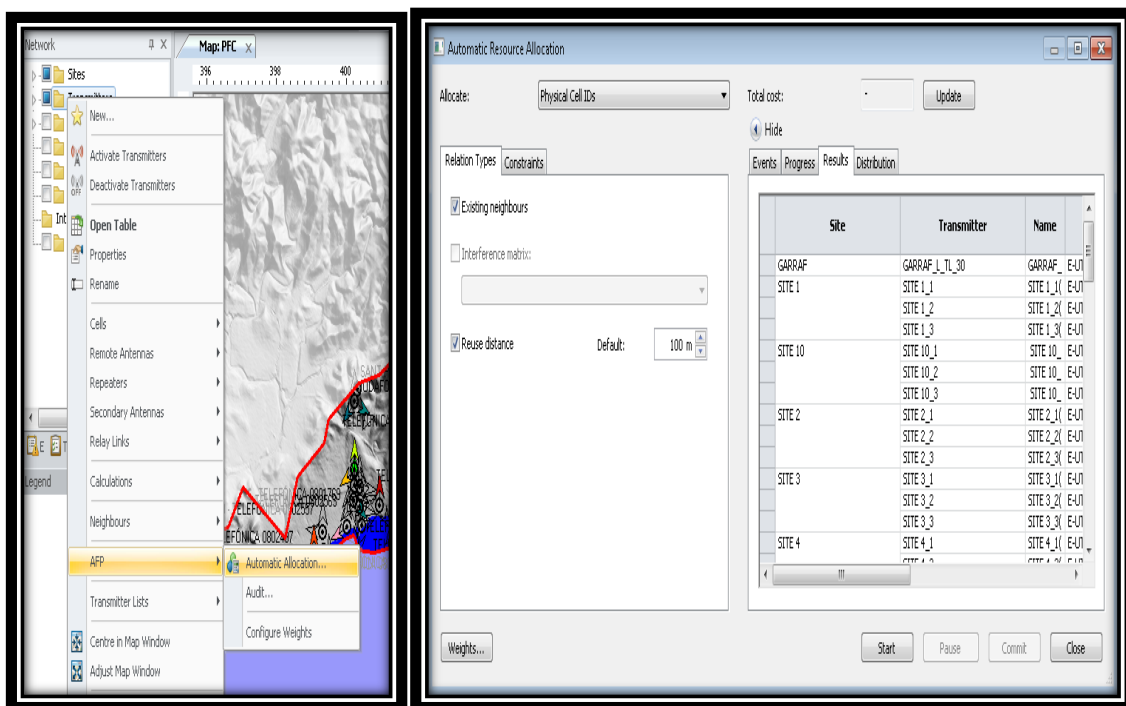


Figura 66: Configuración realizada para la asignación automática del *Physical Cell ID*.

Para comprobar los resultados, se abre la tabla de celdas y se observan las columnas *Physical Cell ID*, *PSS ID*, *SSS ID*. Se observa que a las celdas que no tienen canal asignado tampoco se les asigna un *Physical Cell ID*. Véase en la figura adjunta:

Channel Allocation Status	Physical Cell ID Domain	Physical Cell ID	PSS ID	SSS ID	PSS ID status	SSS ID status
Allocated		61	1	20	Allocat	Allocat
Allocated		162	0	54	Allocat	Allocat
Allocated		447	0	149	Allocat	Allocat
Allocated		1	1	0	Allocat	Allocat
Allocated		2	2	0	Allocat	Allocat
Allocated		405	0	135	Allocat	Allocat
Allocated		405	0	135	Allocat	Allocat
Allocated		405	0	135	Allocat	Allocat
Allocated		168	0	56	Allocat	Allocat
Allocated		2	2	0	Allocat	Allocat
Allocated		1	1	0	Allocat	Allocat
Allocated		191	2	63	Allocat	Allocat
Allocated		190	1	63	Allocat	Allocat
Allocated		95	2	31	Allocat	Allocat
Allocated		414	0	138	Allocat	Allocat
Allocated		58	1	19	Allocat	Allocat
Allocated		442	1	147	Allocat	Allocat
Allocated		62	2	20	Allocat	Allocat
Allocated		137	2	45	Allocat	Allocat
Allocated		111	0	37	Allocat	Allocat
Allocated		265	1	88	Allocat	Allocat
Allocated		28	1	9	Allocat	Allocat
Allocated		337	1	112	Allocat	Allocat
Not Alloca		0	0	0	Not All	Not All
Not Alloca		0	0	0	Not All	Not All
Not Alloca		0	0	0	Not All	Not All
Not Alloca		0	0	0	Not All	Not All
Not Alloca		0	0	0	Not All	Not All
Not Alloca		0	0	0	Not All	Not All
Allocated		438	0	146	Allocat	Allocat

Figura 67: Comprobación de la asignación automática de *Physical Cell IDs*.

### 5.2.3 Definición del mapa de tráfico

Los mapas de tráfico nos determinan cuantos usuarios se generan en cada zona del mapa y de qué perfil son. En ATOLL se pueden definir tres tipos de mapas de tráfico, tal y como se puede observar al ir a la carpeta *Geo*, hacer click derecho sobre la carpeta *Traffic Maps* → *New Map*.

Los mapas de tipo *Sector traffic*, se construyen a partir de datos reales de carga por sector de la red, de los que puede disponer el propio operador. Por otro lado, los mapas de tipo *User density* se construyen a partir de densidades de población en la zona a estudiar. Finalmente, en este proyecto se va a trabajar con los mapas del tipo *User profile*, que se basa en datos estadísticos de perfiles de usuario (*User Profiles*) habituales en un determinado entorno (*Environment*). El motivo de esta elección reside en que, en nuestro caso, se desconocen tanto los datos del operador sobre la carga por sector de la red como las densidades exactas de población de la zona de estudio.



Los mapas de la naturaleza escogida permiten definir una serie de polígonos sobre el mapa geográfico, correspondientes a un tipo de entorno o *Environment* coherente con la zona en la que se está generando. Las siguientes figuras muestran el proceso de configuración y el resultado final:

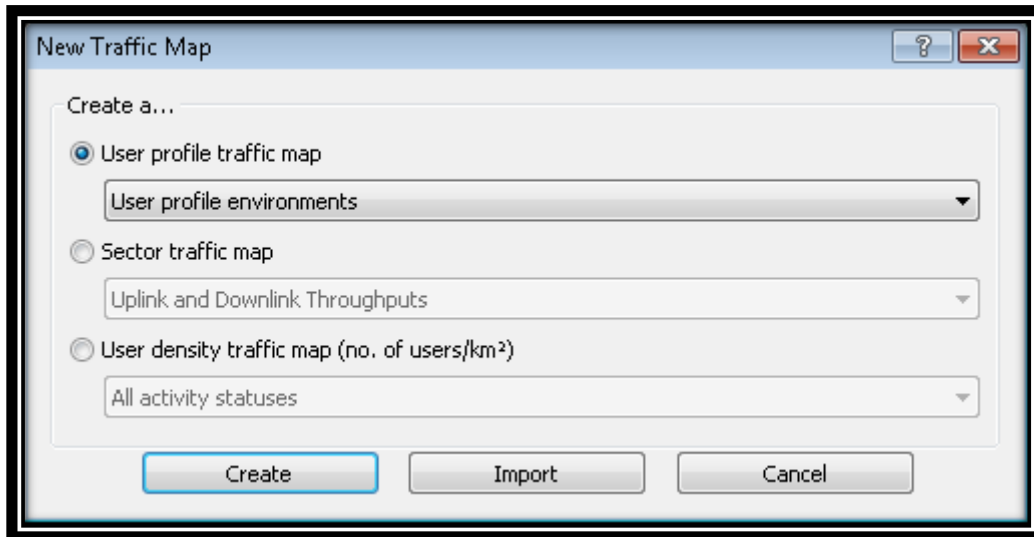


Figura 68: Creación de un nuevo mapa de tráfico.

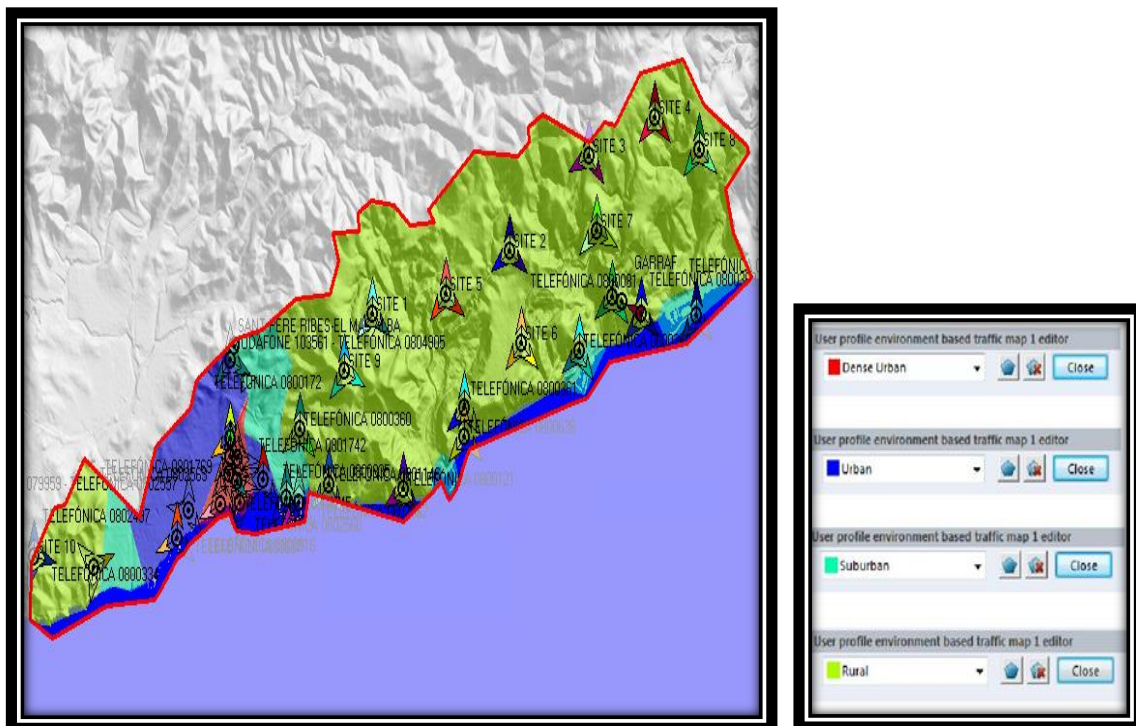


Figura 69: Mapa de tráfico resultante para nuestro proyecto.

A modo de recordatorio se sugiere al lector que revise las tablas de las densidades de usuario implícitas a cada entorno o *Environment* que han sido introducidas en el capítulo 4, pues serán útiles en los próximos análisis.

## 5.2.4 Configuración y ejecución de las simulaciones de Monte Carlo.

Una vez que se ha cargado el mapa, es posible realizar simulaciones basadas en el algoritmo de Monte Carlo.

En ATOLL, una simulación corresponde a una determinada distribución de los usuarios LTE. Se trata de una instantánea de una red LTE. Los principales resultados de una simulación son una distribución geográfica de los usuarios con una demanda de tráfico determinada, los recursos asignados a cada usuario de esta distribución, y la carga de las celdas.

La distribución de usuarios sobre el mapa se realiza de acuerdo al mapa de tráfico y siguiendo una distribución de Poisson. A continuación, ATOLL inicia un proceso iterativo, donde en cada paso se selecciona a un usuario sobre el mapa.

En nuestro caso, se ha generado un grupo de 10 simulaciones con los parámetros por defecto para intentar obtener unos resultados más precisos a los conseguidos hasta el momento. Véase a continuación el proceso de configuración y los resultados obtenidos tras hacer click derecho en *Simulations* → *New*:

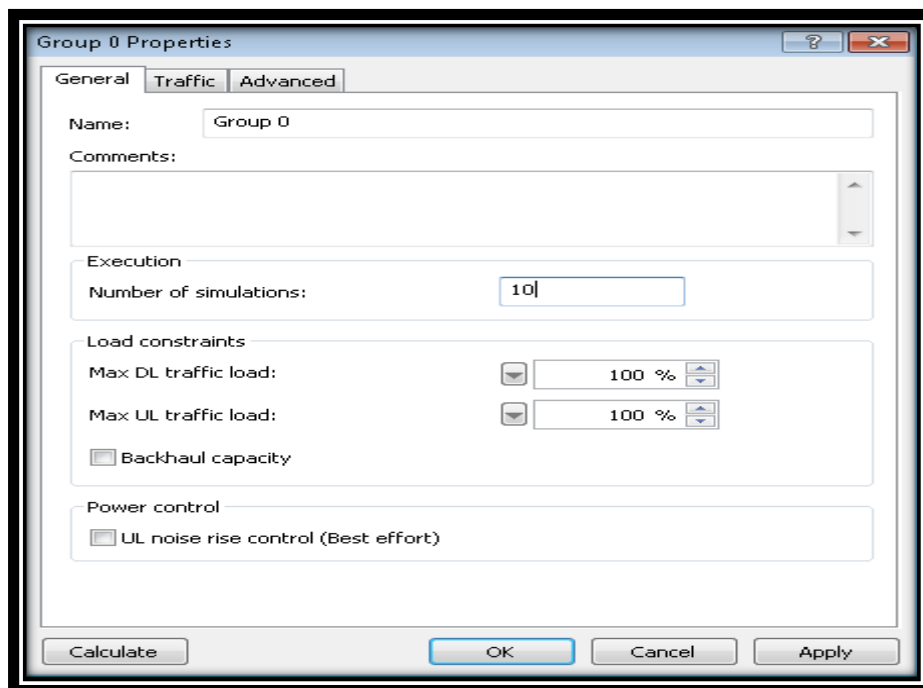
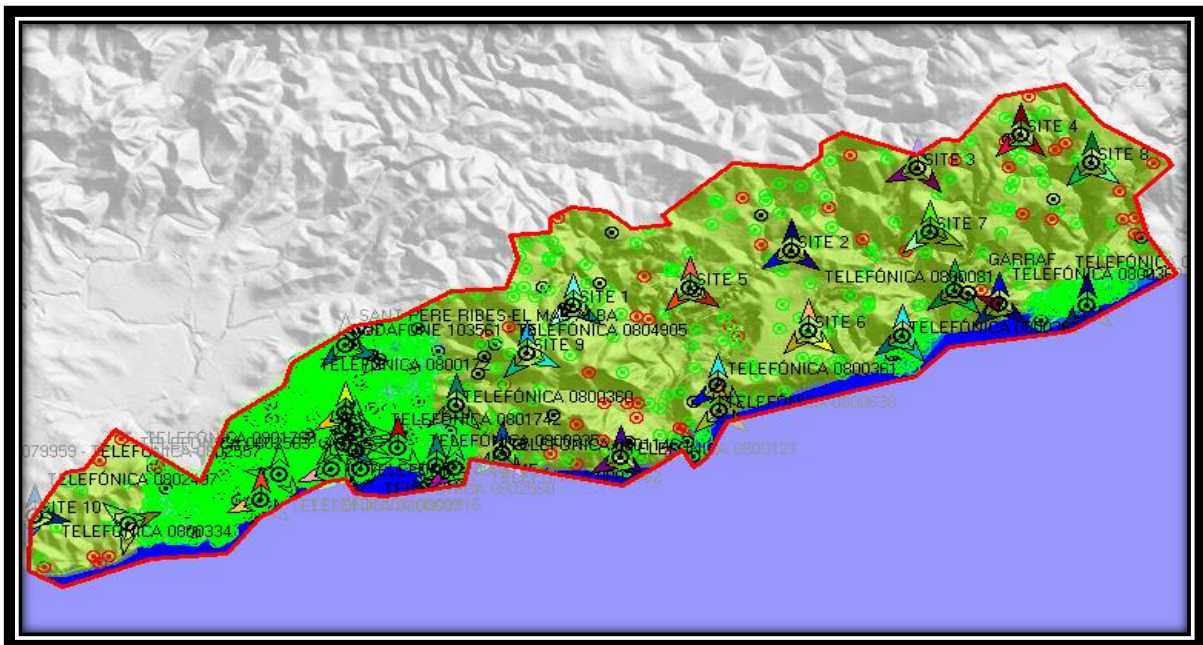


Figura 70: Configuración del grupo de 10 simulaciones.

El motivo de la elección de estas 10 simulaciones y no de un número superior o inferior reside en que los resultados obtenidos no varían en exceso. Se ha creído que vale la pena soportar esta pequeña diferencia en los resultados a cambio del ahorro computacional y temporal que supone realizar 50 simulaciones. A continuación, se muestra una tabla comparativa que sirve para aclarar posibles dudas existentes en referencia a la elección anterior.

SIMULATIONS	DEMAND					RESULTS				
	USERS	ACTIVE			INACTIVE	USERS	ACTIVE			INACTIVE
		DOWNLINK (DL)	UPLINK (UL)	DL+UL			DOWNLINK (DL)	UPLINK (UL)	DL+UL	
10	248	136	64	40	8	243	135	63	37	8
50	276	147	81	39	9	266	145	78	35	8

**Tabla 2: Comparativa de resultados entre la última simulación de los grupos de 10 y 50 simulaciones.**



**Figura 71: Resultados obtenidos realizando un conjunto de 10 simulaciones.**

Tal y como se puede observar en la figura adjunta, los usuarios se concentran en los *Environments* Urban, Dense Urban y Suburban puesto que, pese a que el entorno Rural es el que ocupa mayor parte de la computation zone, la densidad definida en esos *Environments* es mayor.

Por si existe alguna duda en referencia a los resultados obtenidos, se ha decidido incorporar a los resultados la leyenda de resultados, en la cual aparece el significado de cada parámetro. Se recuerda que para obtener dicha leyenda se ha ejecutado click derecho en *Simulation* → *Properties* → *Add to legend*:

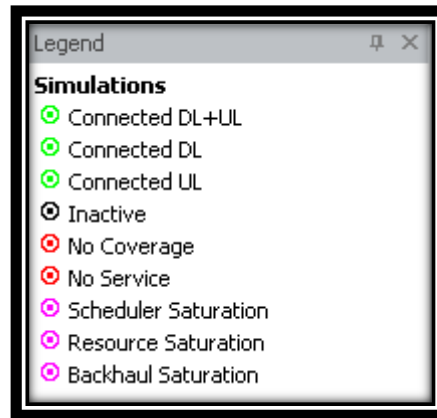


Figura 72: Leyenda representativa de los resultados conseguidos.

Llegados a este punto se dan por comprendidos e interiorizados los resultados. Tan solo se quiere puntuar que, en caso de que no se haya podido establecer la comunicación, el motivo de rechazo puede atender a diversas causas:

- **No coverage** si no se ha podido determinar la celda servidora.
- **No service** si no se consigue un nivel adecuado de señal para los canales LTE.
- **Scheduler Saturation** si el usuario no ha sido seleccionado para transmitir.
- **Resource Saturation** si no hay recursos disponibles en la celda.

### 5.2.5 Análisis de cobertura en la red optimizada.

En este tramo del proyecto el despliegue realizado cuenta con una planificación de colindancias, de frecuencias y de *Physical Cell ID*. También se han ajustado las cargas de tráfico por celda en función del mapa de tráfico esperado sobre el área bajo estudio. Ahora se pretende ver la mejora que estas tareas han traído al despliegue.

En nuestro caso, se repitieron las predicciones ya realizadas para ver la cobertura dependiente de la carga de la red. Para ello, han sido duplicados los estudios evaluados con anterioridad y se calcularon para el grupo de simulaciones. El modus operandi en esta situación es el siguiente: Se realiza click derecho sobre cada estudio y a continuación *duplicate*. Acto seguido se renombra el estudio que se acaba de generar y se vuelve a hacer click derecho sobre la predicción, *Properties* → *Conditions* → *Load Conditions* → *Group 0*.

Para la visualización de estas mejoras se ha decidido hacer hincapié en dos tipos de predicciones debido a que son en las que se puede observar de una forma más visual el impacto de las optimizaciones que se han hecho en la red.

La primera de estas predicciones es la del *Service Area Analysis*, tanto para el enlace descendente como ascendente. Véanse a continuación los resultados obtenidos:

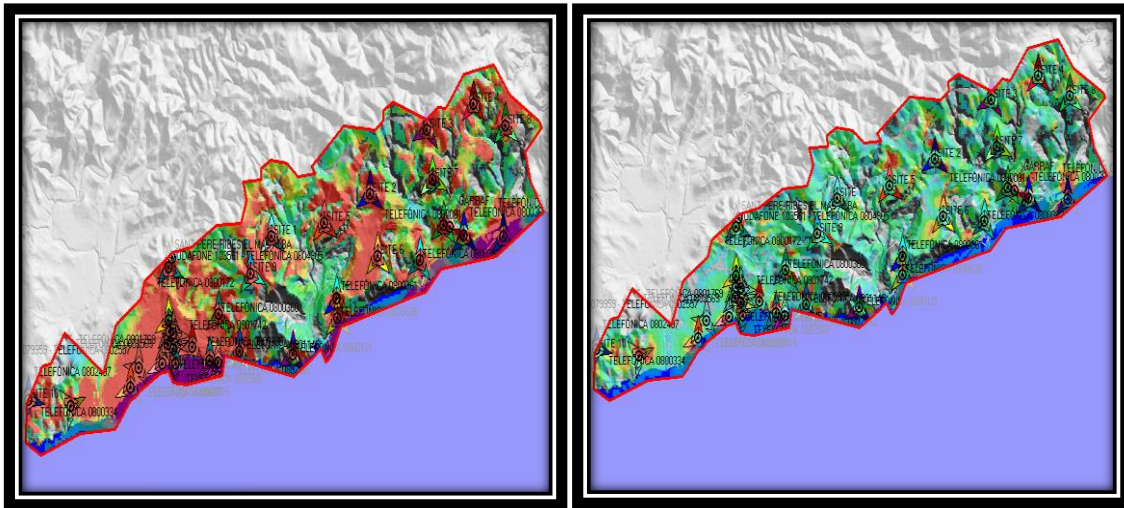


Figura 73: Comparativa de *Service Area Analysis* (DL) entre la red optimizada y sin optimizar.

A simple vista se puede comprobar que existe una mejora notable en lo que a términos de cobertura por parte de los *Radio Bearers* se refiere, es decir, ahora se ofrecen servicios portadores en algunas zonas donde antes era imposible ofrecer y en las que ya se ofrecía, se ha mejorado. Es decir, que ahora se pueden ofrecer servicios portadores con modulaciones espectralmente más eficientes, y en consecuencia menos robustas, debido a las mejoras en los enlaces radio. Como comprobante de ello, se ha adjuntado a continuación la comparativa de los histogramas relacionados con los resultados anteriores puesto que en ellos, se justifica la asombrosa mejora obtenida.

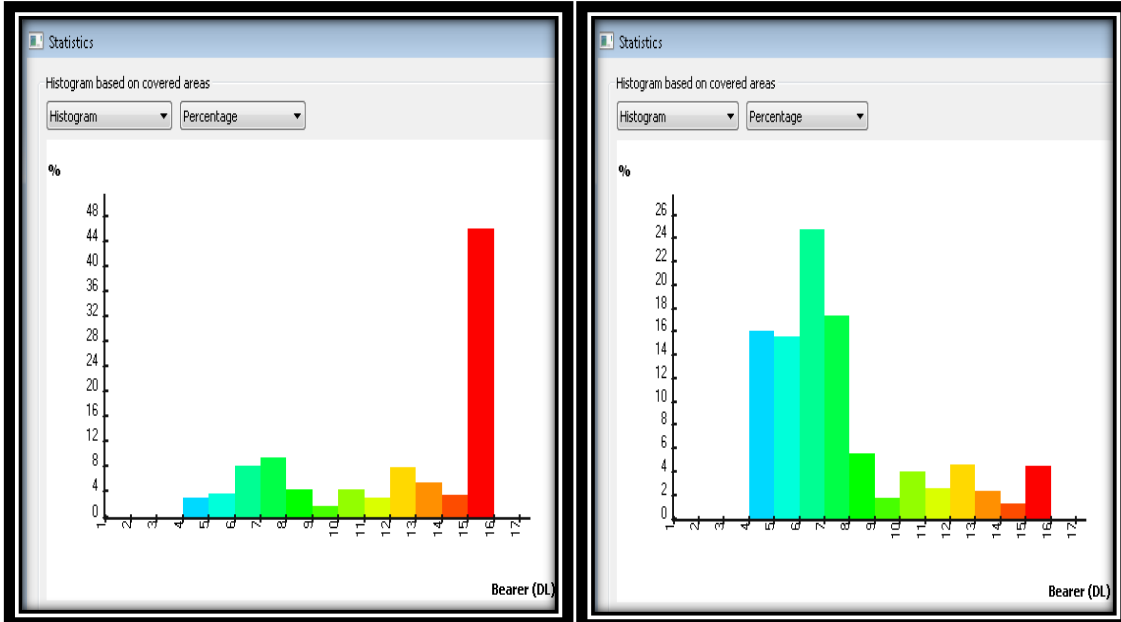


Figura 74: Comparativa de histogramas de *Service Area Analysis* (DL) entre la red optimizada y sin optimizar.

En este caso, quizás resulta más intuitiva la mejora. Sabiendo que las modulaciones a emplear son las representadas con colores más cálidos, se relaciona con facilidad que el dimensionado de nuestra red ha provocado que se puedan elegir las modulaciones que mejor prestaciones tienen para hacer uso de LTE. Si se habla de números, se observa como se ha pasado de un 45% a un 85% de posibilidades de uso de modulaciones QAM. Prácticamente, se ha duplicado el alcance gracias a la correcta asignación de vecinos y a la planificación de frecuencias.

De forma análoga al caso anterior, se pueden observar mejoras similares para el enlace ascendente (UL). Estas no serán tan llamativas como en el caso del *Downlink* en lo que hace referencia a cobertura, pero si en lo referente a calidad. En las siguientes figura se muestran los resultados:

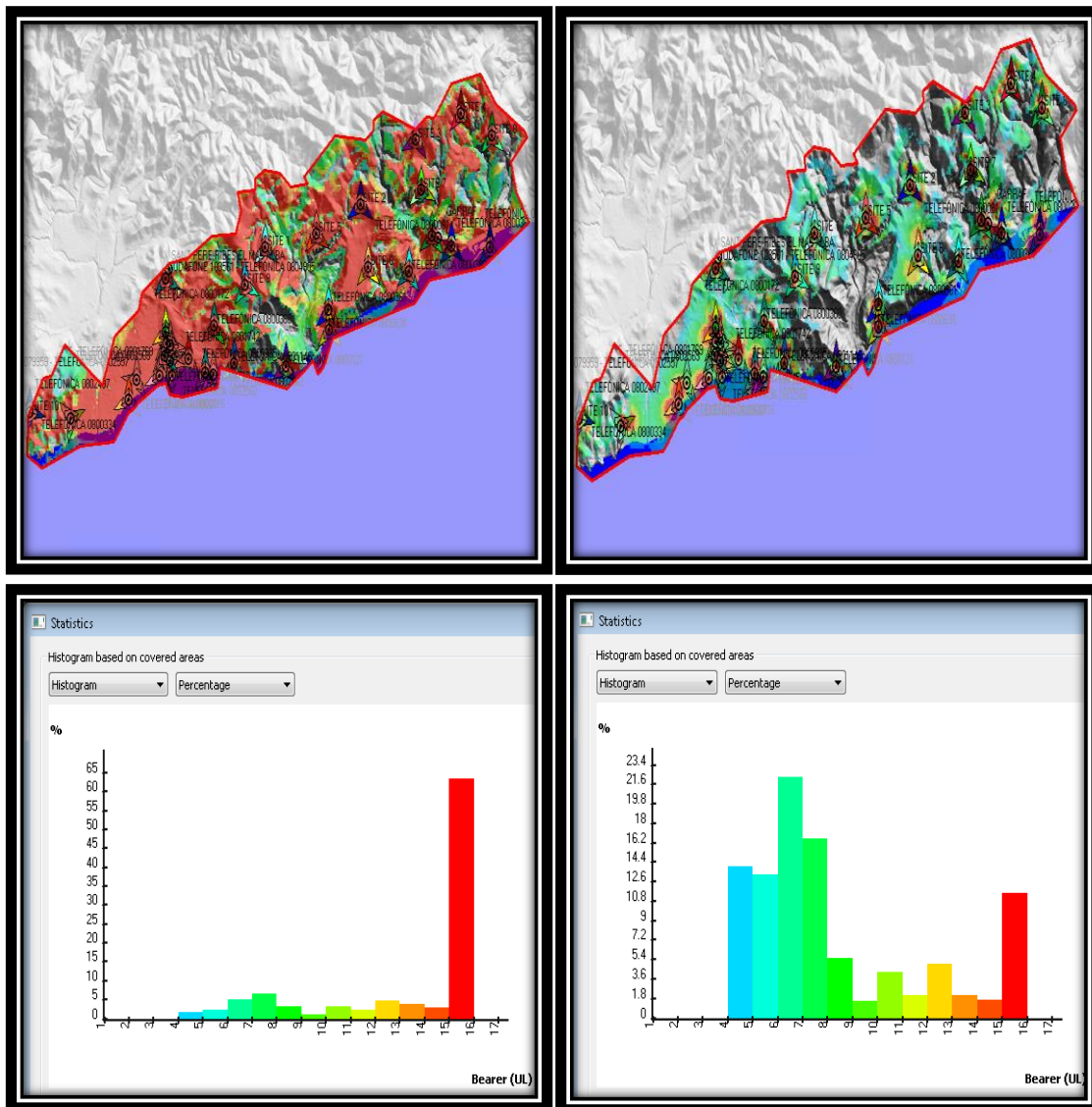
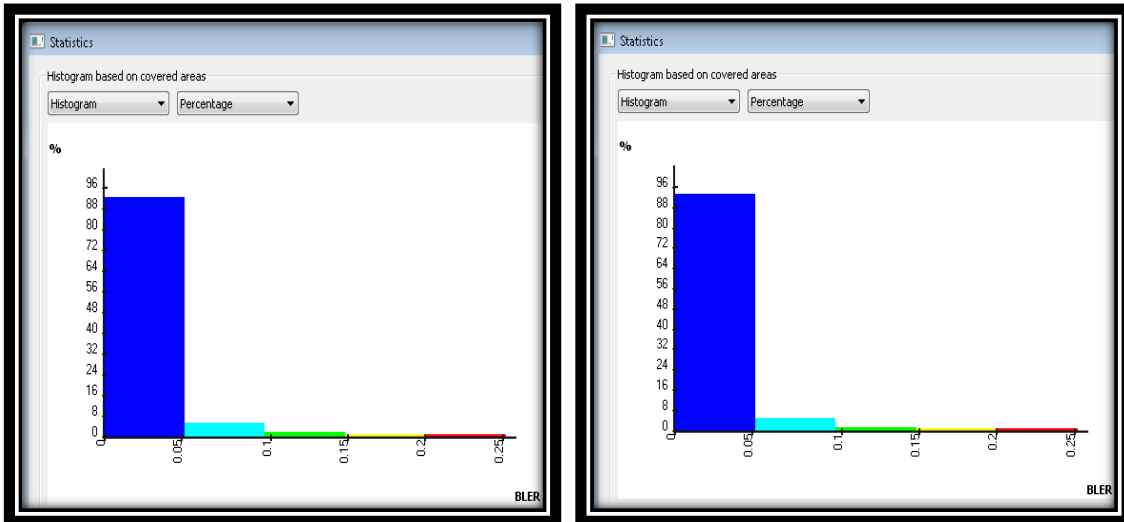


Figura 75: Comparativa de *Service Area Analysis* (UL) entre la red optimizada (izda) y sin optimizar (dcha).

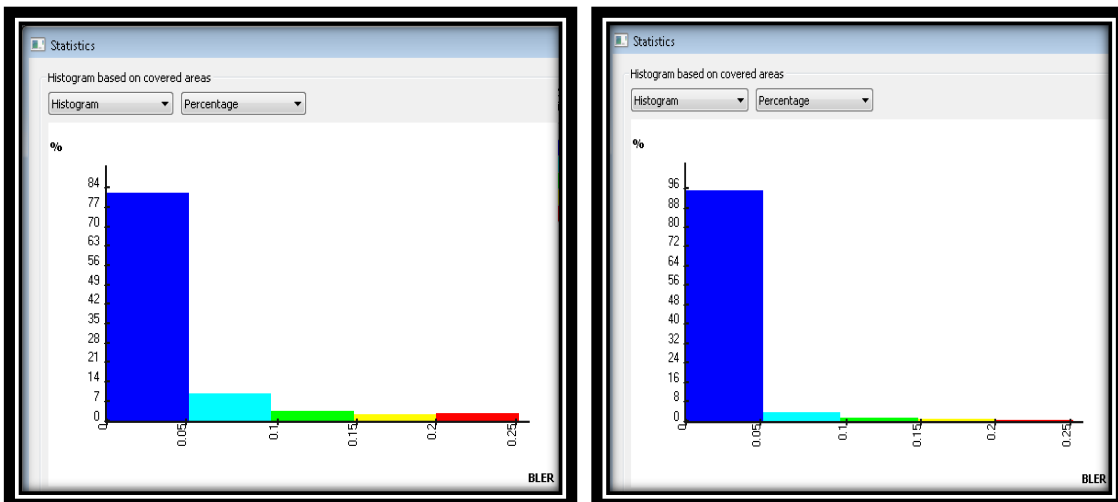
Finalmente, para acabar con el análisis del impacto generado por las optimizaciones realizadas en la red se ha creído conveniente analizar las predicciones *Coverage by Quality Indicator* para ambos enlaces. Con el fin de facilitar la comprensión, cabe introducir que estas predicciones muestran indicadores de calidad (BLER y BER) en función del estado del canal. Véanse las figuras adjuntas:



**Figura 76: BLER de red sin optimizar (izquierda) y red optimizada (derecha) en el enlace descendente (DL).**

Para el Downlink se ha observado que se ha mejorado tan sólo un 1% con respecto al estado anterior. Es decir, se ha pasado de proporcionar BLERs menores al 5% al 92% de la zona de estudio, al 93%. A primera vista puede parecer una mejora escasa, pero cabe decir que se parten de resultados considerablemente buenos en términos de BLER, lo cual está realmente bien para que exista un funcionamiento más eficaz del sistema LTE.

En lo que se refiere al *Uplink* se obtuvo una BLER menor al 5% en el 95% de la zona de estudio, lo que supone un incremento del 13% de terreno con menor BLER. Obsérvense las figuras adjuntas para corroborar la información:



**Figura 77: BLER de red sin optimizar (izquierda) y red optimizada (derecha) en el enlace ascendente (UL).**

## 5.2.6 Optimización de los parámetros de la red usando ACP.

La herramienta *Automatic Cell Planning (ACP)* de ATOLL permite calcular automáticamente, para una red creada, la configuración óptima en términos de cobertura de la red y de calidad.

ACP está destinado principalmente a mejorar el despliegue de la red existente mediante la reconfiguración de los principales parámetros que pueden ser controlados a distancia por los operadores: la inclinación de la antena eléctrica y la potencia piloto de la celda. También se puede utilizar durante la fase inicial de planificación de una red, permitiendo la selección de la antena, y su azimut, altura y la inclinación mecánica. ACP no sólo tiene en cuenta en la optimización los transmisores, sino que también los repetidores y antenas remotas. Finalmente, ACP también se puede utilizar para medir y optimizar la exposición a los campos electromagnéticos-CEM (EMF) creados por la red. Esto permite la optimización de la configuración de energía y la antena para reducir la excesiva exposición a los CEM en las redes existentes y la selección del lugar óptimo para nuevos transmisores.

Esta herramienta utiliza objetivos definidos por el usuario, como por ejemplo la cobertura de las celdas, para evaluar la optimización, así como para calcular su coste de implementación. Una vez definidos los objetivos y los parámetros de red a optimizar, utiliza un algoritmo eficiente de búsqueda global para probar muchas configuraciones de red y proponer las reconfiguraciones que mejor se ajusten a los objetivos marcados.

Con el objetivo de optimizar la red propuesta, ha hecho uso de esta herramienta. No obstante, no se observaron cambios significativos para esta optimización. Las mejoras que se proponían incrementaban la cobertura de las señales de referencia en un 2% aproximadamente. Para que el usuario visualice como generar estas mejoras, ATOLL proporciona una tabla con las modificaciones a realizar sobre los transmisores. Estas modificaciones están marcadas en verde sobre la tabla. La figura adjunta muestra algunas modificaciones propuestas por el *software* ATOLL para conseguir dicha mejora.

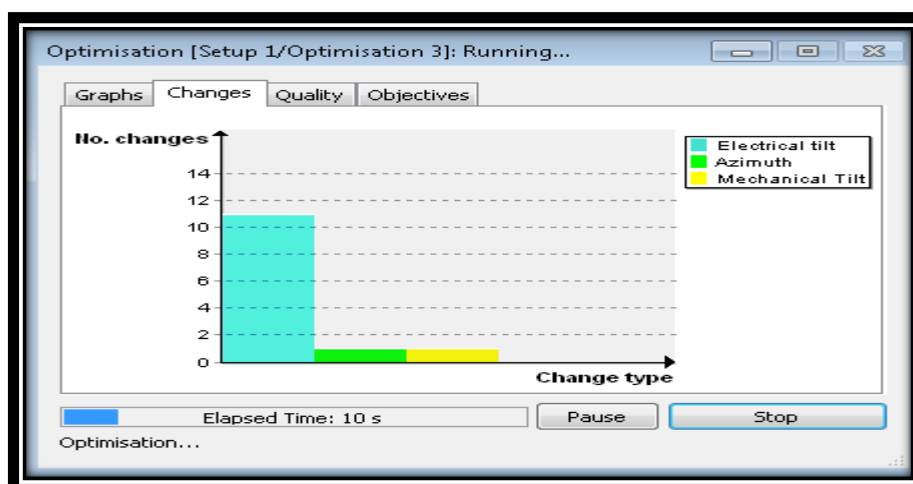


Figura 78: Visualización de cambios propuestos durante la realización de ACP



## 6.- Conclusiones y líneas futuras

Actualmente, la evolución de las comunicaciones móviles en España se centra en la implantación de redes comerciales de fibra óptica por parte de las principales operadoras de telefonía móvil. Sin embargo, se ha obviado que pese a tener desplegadas redes del sistema LTE en las ciudades más importantes, debido a la densidad de población claro está, todavía existen demasiadas regiones que no han llegado a abastecer, en términos de LTE. Este el caso de Sitges, una pequeña localidad barcelonesa que sufre este exceso de degradación en su servicio frente al excelente nivel de señal residente en Barcelona y otras localidades.

Durante estos años, los operadores han previsto y vendido que el mapa de cobertura 4G queda completamente cubierto en días como hoy. Sin embargo, en la figura que se adjunta a continuación se puede observar como existe un leve síntoma de publicidad engañosa, pues mientras que los núcleos o ciudades de gran densidad quedan totalmente abastecidos, existen demasiadas zonas extintas de las condiciones necesarias para obtener una buena señal 4G.



**Figura 79: Mapa de cobertura 4G en España.**

En lo referente a términos de calidad de servicio, la mayoría de operadoras suelen ofrecer unas velocidades teóricas máximas de pico de bajada entre 75 y 150 Mbps y entre 25 y 50 Mbps de subida. No obstante, cualquier usuario de esta tecnología puede comprobar empíricamente que, generalmente, estas velocidades no son alcanzables, quedándose en velocidades 50 Mbps de descarga y 10 Mbps de subida, aproximadamente. Ahora sí, debe concretarse que estas velocidades son realmente buenas para los servicios disponibles hoy en día aunque disten de los valores teóricos.

Por lo tanto, a la vista de esta situación, queda bastante claro que la implantación de las redes LTE en este país se encuentra en una fase que se puede mejorar pese a que ya se estén trabajando con tecnologías más avanzadas como LTE-Advanced y fibra óptica.

En este proyecto, se ha definido una metodología para la planificación y dimensionado de redes LTE con la herramienta profesional ATOLL. Esta ha consistido en una fase de planificación y despliegue físico de la red, configurando sus parámetros y una segunda fase de comprobación y mejora del rendimiento de la red.

Por lo tanto, las conclusiones establecidas han sido las siguientes:

- Para el emplazamiento de los eNB el modelo más recomendable para una primera aproximación es el modelo hexagonal. Este modelo, adaptándolo a las condiciones de terreno, nos permite un emplazamiento óptimo, más o menos de forma sistemática, de las estaciones base con el objetivo de dar cobertura a toda la zona de estudio con el menor número de estaciones base.
- Una vez configurados, en primera aproximación, los parámetros de radio frecuencia de las estaciones base, es recomendable realizar un estudio de cobertura para visualizar si todas las zonas reciben un nivel de potencia aceptable o no, y de no recibirlo poder configurar parámetros o añadir eNBs. En este proyecto, una vez realizado el despliegue de la red, se ha observado en una primera fase que habían zonas en las que no había presencia de señal o que esta, era escasa. Este hecho está directamente relacionado con la orografía del terreno, es decir, en lugares con desniveles pronunciados entre el eNB y su zona de cobertura, la presencia de estos desniveles impedían la propagación de la señal radioeléctrica, haciendo así una función de obstáculo. Para solucionar este problema se ha optado por desplazar levemente algunas estaciones base y ajustar su azimuth y altura para evitar tener en la zona de estudio un exceso de puntos ciegos a los eNBs.
- A continuación, se debe seguir por analizar las zonas que tendrán señal de otros transmisores de celdas diferentes con el objetivo de visualizar la posible presencia de interferentes. No obstante, es aconsejable evitar, si es posible, realizar cambios en la configuración de la red ya que este estudio no dará el nivel de señal recibida y por lo tanto no se podrá saber si las señales presentes en una zona serán nocivas o no para el funcionamiento de la red. Por el contrario, si se realizan modificaciones de la configuración de la red, es posible perder la cobertura lograda anteriormente.
- Posteriormente, se aconseja hacer un estudio de los niveles de potencia de las principales señales de LTE. En este estudio se observaron los canales PDSCH, para el DL, el PUSCH y PUCCH para el UL. Se escogieron estos canales debido a que todos transportan señalización de usuario y datos y por lo tanto es necesario comprobar que tengan niveles de potencia aceptables. En este proyecto se ha considerado un buen nivel de señal aquel por encima de -90 dBm ya que esta es la potencia que suelen recibir los terminales en las redes reales y con las que el sistema funciona correctamente.

- Para finalizar con esta fase de planificación, se optó por estudiar las relaciones señal a interferente más ruido,  $C/(I+N)$ , de los enlaces con el objetivo de visualizar la posible presencia nociva de interferentes. También se puede estudiar los Radio Bearers disponibles en estas condiciones, pero esto no aportará mucha más información en este momento.

Para la red propuesta, la presencia de interferentes era abundante y además tenían la suficiente potencia para degradar los enlaces.

Una posible solución a este hecho podría haber sido la modificación de los emplazamientos de los eNB o la variación de potencia de estos en las zonas más conflictivas. No obstante, se optó por seguir adelante ya que posteriormente se haría uso de técnicas de optimización de la red que podrían solucionar estos problemas y por lo tanto, habiendo conseguido una buena cobertura para todas las zonas, no se quiso comprometerla realizando cambios cuando todavía se podían evitar.

- Con el objetivo de optimizar la red, se ha de llevar a cabo la fase de dimensionado. La primera acción que se debe hacer es la de planificar las frecuencias. Esto implica que del espectro disponible, se asignen frecuencias diferentes a las diferentes celdas para minimizar así el efecto de los interferentes más cercanos a ellas. Para realizar esta asignación se ha de seguir una estrategia o método que minimice las interferencias entre enlaces que comparten frecuencias. Dada la complejidad de estas redes, es muy recomendable hacer esta planificación con algoritmos automáticos que realice algún programa de planificación radio que brinde esta opción.

En este proyecto, el resultado de esa planificación fue realmente bueno, mejorando notablemente la  $C/(I+N)$  y, por lo tanto, reduciendo los niveles de señales interferentes presentes en las diferentes zonas.

También se realizó otra planificación automática: la planificación automática del *Physical Cell ID*. Así se evita que la identificación de celda y el funcionamiento de la medida de la señal de referencia se vean perjudicadas.

- Una vez hechos estos ajustes se debe comprobar el efecto de los mismos. Para ello, se realiza unas simulaciones del funcionamiento de la red y se generan los estudios anteriores con la finalidad de comprobar si se ha obtenido una mejora del funcionamiento de la red. Tanto si se obtiene como si no esa mejora, todavía no es aconsejable realizar cambios en la configuración de la red ya que LTE ofrece más posibilidades para mejorar sus prestaciones.

En la red de este proyecto, se comprobó que con los ajustes automáticos que proporciona la herramienta Atoll, se había logrado una mejoría muy notable en lo referente al nivel de señales interferentes, de tal forma que las  $C/(I+N)$  eran mucho mejores y por lo tanto, se podían ofrecer Radio Bearers menos robustos que permiten el aumento de la velocidad ofertada a los usuarios. No obstante, pese a haber mejorado el nivel de interferentes todavía se podía considerar elevado en algunas zonas.

- El último paso para realizar la red, es realizar el ACP (Automatic Cell Planning) el cual permite calcular automáticamente la configuración de red óptima en términos de cobertura de la red y de calidad. En esta red, no se obtuvo una mejora apreciable.
- Finalmente, hay que analizar el funcionamiento de la red una vez optimizada.

Por lo tanto, después de todo este proceso todavía se puede mejorar la configuración de la red.

Queda como línea futura de investigación la reducción del nivel de interferencia en el borde de las celdas. Por los resultados obtenidos y el proceso realizado, se recomienda visualizar las zonas más conflictivas, en lo referente a interferentes, y estudiarlas con detalle.



## 7.- Anexos

### 7.1 Anexo 1: Bandas LTE

Band	UL (MHz)	DL (MHz)	Simp. BW (MHz)	Total BW (MHz)	Mode	Notes
1	1920 - 1980	2110 - 2170	60	120	FDD	EMEA, Japan
2	1850 - 1910	1930 - 1990	60	120	FDD	Quad band GSM
3	1710 - 1785	1805 - 1880	75	150	FDD	Quad band GSM. DCS 1800
4	1710 - 1755	2110 - 2155	45	90	FDD	AWS
5	824 - 849	869 - 894	25	50	FDD	Quad band GSM
6	830 - 840	875 - 885	10	20	FDD	Not applicable to 3GPP
7	2500 - 2570	2620 - 2690	70	140	FDD	EMEA
8	880 - 915	925 - 960	35	70	FDD	Quad band GSM. GSM 900
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	35	70	FDD	1700 MHz. Japan
10	1710 - 1770	2110 - 2170	60	120	FDD	Extended AWS
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	25	50	FDD	1.5 GHz Lower, Japan
12	698 - 716	728 - 746	18	36	FDD	Lower 700 MHz, C Spire+USCC-LTE
	N/A	716 - 722	6	6	DL	Originally Ch.55 for QCOM mDTV venture - only MediaFLO. Spectrum was sold to AT&T.
13	777 - 787	746 - 756	10	20	FDD	Upper 700 MHz, VzW-LTE
14	788 - 798	758 - 768	10	20	FDD	US FCC Public Safety
15	1900 - 1920	2600 - 2620	20	40	FDD	
16	2010 - 2025	2585 - 2600	15	30	FDD	
17	704 - 716	734 - 746	12	24	FDD	AT&T-LTE
18	815 - 830	860 - 875	15	30	FDD	Japan 800 MHz Lower
19	830 - 845	875 - 890	15	30	FDD	Japan 800 MHz Upper
20	832 - 862	791 - 821	30	60	FDD	800 MHz EMEA
21	1447.9 - 1462.9	1495.9 - 1510.9	15	30	FDD	1.5 GHz Upper. Japan
22	3410 - 3490	3510 - 3590	80	160	FDD	3.5G
24	1626.5 - 1660.5	1525 - 1559	34	68	FDD	
25	1850 - 1915	1930 - 1995	65	130	FDD	AWS-G. Sprint LTE within this band
	1915 - 1920	1995 - 2000	5	10	FDD	AWS-H, will be auctioned by Feb. 2015.
26	814 - 849	859 - 894	35	70	FDD	Sprint / Nextel iDen
27	807 - 824	852 - 869	17	34	FDD	Lower 850 MHz
28	703 - 748	758 - 803	45	90	FDD	700 MHz APAC
	2000 - 2020	2180 - 2200	20	40	FDD	Dish Network to deploy LTE-A by 2016.
33	1900 - 1920		20		TDD	
34	2010 - 2025		15		TDD	China Mobile (CM) TD-SCDMA
35	1850 - 1910		60		TDD	
36	1930 - 1990		60		TDD	
37	1910 - 1930		20		TDD	
38	2570 - 2620		50		TDD	European - TD-LTE
39	1880 - 1920		40		TDD	CM TD-SCDMA
40	2300 - 2400		100		TDD	CM TD-LTE
41	2496 - 2690		194		TDD	TDD 2.5 GHz
42	3400 - 3600		200		TDD	TDD 3.5 GHz
43	3600 - 3800		200		TDD	TDD 3.6 GHz
44	703 - 803		100		TDD	700 MHz APAC



## 8.- Bibliografía

---

- [1] [http://telos.fundaciontelefonica.com/seccion=1268&idioma=es\\_ES&id=201007270832001&activo=6.do](http://telos.fundaciontelefonica.com/seccion=1268&idioma=es_ES&id=201007270832001&activo=6.do)
- [2] <http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2014-e.pdf>
- [3] Farley, T. (2005). Mobile Telephone History. *Teletronikk*, 34.05, 22-34.  
[www.telenor.com/wp-content/uploads/2012/05/T05\\_3-4.pdf](http://www.telenor.com/wp-content/uploads/2012/05/T05_3-4.pdf)
- [4] Diapositivas de la asignatura Laboratorio de Comunicaciones Móviles (LCM)
- [5] Gorricho, M. & Gorricho, J.L (2002). *Comunicaciones móviles*. Barcelona: Edicions UPC
- [6] Sallent, O. , Valenzuela, J.L & Agustí, R. (2003). *Principios de comunicaciones móviles*. Barcelona: Edicions UPC
- [7] Tecuanhuehue, J. (2006, Febrero). *Sistemas CDMA: cdmaOne, cdma 2000*. Cholula, Puebla, México.  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/tecuanhuehue\\_r\\_j/portada.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/tecuanhuehue_r_j/portada.html)
- [8] Frenkiel, R. (n.d.) A brief History of Mobile Communications.  
[www.winlab.rutgers.edu/~naraya~/course/wireless\\_Revolution/vts%20article.pdf](http://www.winlab.rutgers.edu/~naraya~/course/wireless_Revolution/vts%20article.pdf)
- [9] Dahlman, E. , Parkvall, S. , Sköld, J. & Beming, P. (2007). *3G Evolution: HSPA and LTE for mobile Broadband*. San Diego: Academic Press
- [10] Sesia, S. , Toufil, I. & Baker, M. (2011) *LTE-the UMTS Long Term Evolution: From theory to Practice*. Chichester: Wiley.  
[www.aldraji.com/download/the\\_UMTS\\_Long\\_Term\\_EvolutionB.pdf](http://www.aldraji.com/download/the_UMTS_Long_Term_EvolutionB.pdf)
- [11] Agusti, R. , Bernardo, F. , Casadevall, F. , Ferrús, R. Pérez, J. & Sallent, O. (2010) *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Barcelona: Fundación Vodafone España.  
<https://proyectolte.files.wordpress.com/2012/09/lte-nuevas-tendencias.pdf>
- [12] <https://es.wikipedia.org>
- [13] Forsk (2011). *Atoll User Manual Radio versión 3.1.2*
- [14] [http://wiki.bandaancha.st/Frecuencias\\_telefon%C3%ADa\\_m%C3%B3vil](http://wiki.bandaancha.st/Frecuencias_telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil)
- [15] Sánchez Velázquez, H. *Estudi de les bandes freqüencials en el sistema LTE a Barcelona, 2013*. PFC presentat a l'ETSETB. (Disponible al pou de documentes de l'UPC (upcommons)).
- [16] <https://geoportal.minetur.gdo.es/VCTEL/vcne.do>



