

TECNOLOGÍA MÓVIL DE VANGUARDIA

Evolución Hacia la 5ta Generación

Esteban Martín Lagoria

Ingeniería en Telecomunicaciones

Facultad de Ingeniería

2018

Tecnología Móvil de Vanguardia

Evolución Hacia la 5ta Generación

Profesor Guía: **Ing. Emiliano Vera**



Ing. Emiliano S. Vera
26757684

A mis amados padres.

Por haber dedicado su vida a hacer mejor la mía.

A mi querido hermano.

Por ser el ejemplo de rectitud y valor cuando no encontraba el mío.

A Laura.

Por toda su ayuda y amor, la razón principal de que este trabajo se encuentre concluido.

Gracias.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
	1.1.1. La Evolución Tecnológica	1
	1.1.2. Apartado Teórico	1
	1.1.3. Apartado Práctico	2
	1.1.4. Alcance	2
	1.1.5. Criterios de Éxito	2
	1.1.6. Etapas	2
	1.2. Las Generaciones de Comunicación Móvil	2
	1.2.1. 1G y 2G: Tecnologías orientadas a la Voz	3
	1.2.2. 3G y 4G: Ancha Banda Móvil	3
	1.2.3. 5G: La Sociedad Interconectada	5
2.	LTE	7
	2.1.1. Acceso de Radio	7
	2.2. Tecnologías Básicas de LTE	7
	2.2.1. Esquema de Transmisión	7
	2.2.2. Planificación Dependiente del Canal y Adaptación de la Tasa de Transmisión	9
	2.2.3. Coordinación de Interferencia Inter-Celda	11
	2.2.4. Transmisión Multi-Antena	11
	2.2.5. Flexibilidad del Espectro	12
	2.2.6. Soporte Multicast y Broadcast	13
	2.2.7. Posicionamiento	14
3.	Evolución de LTE	15
	3.1. Flexibilidad del Espectro	16
	3.1.1. Agregación de Portadoras	16
	3.1.2. Acceso de Licencia Asistida (License-Assisted Access)	17

3.2. Mejoras Multi Antena.....	18
3.2.1. Transmisión Multi Antena Extendida.....	18
3.2.2. Coordinación y Transmisión Multi Punto	19
3.2.3. Estructura Mejorada del Canal de Control	20
3.3. Densificación, Celdas Pequeñas y Despliegues Heterogéneos.....	20
3.3.1. Retransmisión	21
3.3.2. Despliegues Heterogéneos.....	21
3.3.3. Celda Pequeña Activa/ No Activa	22
3.3.4. Conectividad Dual	22
3.3.5. TDD Dinámico	22
3.3.6. Interfuncionamiento con WLAN.....	23
3.4. Mejoras de Dispositivos	23
3.5. Nuevos Escenarios.....	24
3.5.1. Comunicación Dispositivo-a-Dispositivo.....	24
3.5.2. Comunicación Tipo Máquina	24
3.6. Evolución de la Tecnología LTE.....	25
4. Pilares de 5G	27
4.1.1. Evolución de las RATs existentes	27
4.1.2. Despliegue Hiperdenso de Small-Cells	28
4.1.3. Self-Organizing Network (SON).....	28
4.1.4. Comunicación Tipo Máquina	28
4.1.5. Desarrollo de RATs Millimeter-Wave	28
4.1.6. Rediseño de los Enlaces de Backhaul.....	29
4.1.7. Eficiencia Energética	29
4.1.8. Asignación de Nuevo Espectro para 5G	29
4.1.9. Espectro Compartido	29
4.1.10. Virtualización de la RAN	29
5. Diseño.....	31
5.1. Metodología.....	31
5.1.1. El Proceso de Planeación.....	31
5.2. Planeamiento Inicial	31
5.2.1. Elección del Software	32
5.2.2. Consideraciones Geográficas.....	33

5.3. Dimensionamiento	34
5.3.1. Datos Topográficos.....	35
5.4. Estado Actual.....	38
5.4.1. Distribución de Sitios Reales de una empresa.....	38
5.5. Creación de Plantilla LTE en Atoll	38
5.5.1. Zona de Computación.....	39
5.5.2. Densidad Poblacional	40
5.5.3. Ambientes y Perfiles de Tráfico	43
5.5.4. Consideraciones Legales sobre Estructuras Soporte de Antenas.....	44
5.6. Planificación Detallada	44
5.6.1. Elección del Modelo de Propagación	45
5.6.2. Planificación de la Configuración	48
5.6.3. Parámetros de Radio	48
5.6.4. Antenas	51
5.6.5. Planificación de Capacidad y Cobertura.....	52
5.7. Capacidad de Sitios.....	53
5.7.1. Dimensionamiento de Capacidad	53
5.7.2. Capacidad del Sitio	54
5.7.3. Número de Sitios Debido a la Capacidad	54
5.7.4. Número de Sitios Debido a la Cobertura.....	54
5.7.5. Limitación en Cobertura o Capacidad	54
5.7.6. Factores que Afectan la Capacidad de la Celda.....	54
5.7.7. Planificación de la Capacidad con Sistemas MIMO	55
5.8. Dimensionamiento de la Cobertura	56
5.8.1. Link Budget de LTE	57
5.9. Selección del Sitio	58
5.9.1. Asignación Automática de Celdas Vecinas	60
5.9.2. Asignación Automática de Frecuencias.....	61
5.9.3. Asignación Automática de Physical Cell IDs.....	63
6. Predicciones	64
6.1. Predicciones en Banda 4	66
6.1.1. Cobertura por Nivel de Señal (DL)	66
6.1.2. Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL).....	67



6.1.3. Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)	70
6.1.4. Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)	71
6.1.5. Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)	72
6.1.6. Análisis del Área de Servicio (DL)	73
6.1.7. Análisis del Área de Servicio (UL)	74
7. Optimización	75
8. Rediseño de la Red	77
8.1.1. Cambio de Banda	77
8.1.2. Cambio de Antena	78
8.1.3. Recalculo de Link Budget	80
8.1.4. Colocación de Sitios	80
8.2. Predicciones Banda 7 – Altura = 15m	82
8.2.1. Cobertura por Nivel de Señal (DL)	82
8.2.2. Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL).....	83
8.2.3. Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)	84
8.2.4. Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)	85
8.2.5. Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)	86
8.2.6. Análisis del Área de Servicio (DL)	87
8.2.7. Análisis del Área de Servicio (UL)	88
8.3. Simulaciones de Monte Carlo	89
8.3.1. Mapas de Tráfico	89
8.3.2. Polígonos de Mapas de Tráfico	89
8.3.3. Creación de Simulaciones.....	91
8.3.4. Resultados de Simulaciones	92
8.4. Predicciones Basadas en Simulaciones	94
8.4.1. Análisis de Área del Servicio (DL)	94
8.4.2. Análisis de Throughput (DL).....	95
8.5. Comparación con Datos de un Sitio Real	96
8.5.1. Tablas de Datos.....	97
8.5.2. Throughputs Máximos.....	99
8.5.3. Cantidad Máxima de Usuarios Conectados	101
8.5.4. Accesibilidad	102
8.5.5. Conclusión de las Comparaciones	104



9. LTE-A en un Evento Masivo	105
9.1. Sobre el Evento	105
9.2. Simulaciones sin Modificación de la Red	107
9.3. LTE-Advanced	108
9.3.1. Configuración de Celdas LTE-Advanced.....	108
9.3.2. Colocación de Sitios Para LTE-A.....	110
9.3.3. Resultados de Nuevas Simulaciones	111
9.3.4. Análisis del Área de Servicio (DL) con Sitios LTE-A	113
10. Conclusión	115
11. Líneas Futuras de Investigación.....	119
11.1. Estimaciones hacia el año 2021	119
11.1.1. Tráfico de datos móviles.....	119
11.1.2. Tráfico de Video Móvil	119
11.1.3. Dispositivos	119
11.2. Radiobases Temporales	120
Bibliografía	121

Índice de Imágenes

Imagen 1-1 Generaciones Móviles con sus Tecnologías (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011).....	3
Imagen 2-1 LTE y su Evolución (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)	7
Imagen 2-2 Planificación Dependiente del Canal y Adaptación de la Tasa de Transmisión (Dahlman, Parkvall, Sköld, & Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, 2008)	10
Imagen 2-3 Soporte Multicast y Broadcast (Ahmadi, 2014).....	14
Imagen 3-1 Agregación de Portadoras (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011).....	17
Imagen 3-2 Evolución de Portadoras (Chapman, y otros, 2015).....	17
Imagen 3-3 Acceso de Licencia Asistida (License-Assisted Access) (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)	18
Imagen 3-4 Coordinación y Transmisión Multi Punto (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011).....	20
Imagen 3-5 Retransmisión (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011).....	21
Imagen 3-6 Despliegues Heterogéneos (Ahmadi, 2014).....	21
Imagen 4-1 Pilares de 5G (Rodriguez, 2015)	27
Imagen 5-1 El Proceso de Planeación (3GPP, 2013)	31
Imagen 5-2 Encuesta de Elección del Software (Akram).....	32
Imagen 5-3 Resultados de Preferencia de Encuestas (Akram).....	33
Imagen 5-4 Zona de Estudio	35
Imagen 5-5 Mapa de Earth Explorer (USGS).....	36
Imagen 5-6 Selección de DEM (USGS)	36
Imagen 5-7 Aster DEM Salta (USGS).....	37
Imagen 5-8 Mapa de Alturas Salta – DTM	37
Imagen 5-9 Distribución de Sitios Telecom	38
Imagen 5-10 Plantillas Atoll	39
Imagen 5-11 Propiedades del Proyecto	39
Imagen 5-12 Mapas Online Disponibles	40
Imagen 5-13 Zona de Interés	40

Imagen 5-14 Zonificación de Uso de Suelos (Municipalidad de la Ciudad de Salta, 2018)	41
Imagen 5-15 Densidades Poblacionales por Zonas (Secretaría de Planeamiento Urbano, 2015)	42
Imagen 5-16 Creación de Ambiente de Tráfico	43
Imagen 5-17 Perfil de Tráfico Business User	43
Imagen 5-18 Perfil de Tráfico Standard User	43
Imagen 5-19 Planificación Detallada (3GPP, 2013)	45
Imagen 5-20 Modelos de Propagación Disponibles	48
Imagen 5-21 Configuración de Celda LTE	50
Imagen 5-22 Antenas Disponibles	51
Imagen 5-23 Propiedades de Antena Elegida	52
Imagen 5-24 Patrones de Radiación	52
Imagen 5-25 Dimensionamiento de Capacidad (3GPP, 2013)	53
Imagen 5-26 Porcentaje de Aumento en la Eficiencia Espectral con MIMO (3GPP, 2013)	55
Imagen 5-27 Patrones Multi Antena en Configuración de Celda	56
Imagen 5-28 Modelo Hexagonal de Cobertura (3GPP, 2013)	56
Imagen 5-29 Modelo de Link Budget de LTE (3GPP, 2013)	57
Imagen 5-30 Resultado de Link Budget (LTE Encyclopedia)	58
Imagen 5-31 Radiobases - Banda 4 - 30 m	59
Imagen 5-32 Asignación Automática de Celdas Vecinas	60
Imagen 5-33 Resultado de Asignación Automática de Celdas Vecinas	61
Imagen 5-34 Asignación Automática de Frecuencias	62
Imagen 5-35 Resultado de Asignación Automática de Frecuencias	62
Imagen 5-36 Resultados de Asignación Automática de Physical Cell IDs	63
Imagen 6-1 Creación de Nueva Predicción Imagen 6-2 Tipos de Predicción	66
Imagen 6-3 Cobertura por Nivel de Señal (DL)	66
Imagen 6-4 Histograma de Cobertura por Nivel de Señal (DL)	67
Imagen 6-5 Principales Canales Físicos del Downlink (Quiñones, 2016)	68
Imagen 6-6 Principales Canales Físicos del Uplink (Quiñones, 2016)	68
Imagen 6-7 Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)	69
Imagen 6-8 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)	69
Imagen 6-9. Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)	70



Imagen 6-10 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)	70
Imagen 6-11 Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)	71
Imagen 6-12 Histograma de Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)	71
Imagen 6-13 Cobertura por nivel de PUSCH &PUCCH C/(I+N) (UL)	72
Imagen 6-14 Histograma de Cobertura por nivel de PUSCH &PUCCH C/(I+N) (UL)	72
Imagen 6-15 Análisis del Área de Servicio (DL)	73
Imagen 6-16 Histograma de Análisis del Área de Servicio (DL)	73
Imagen 6-17 Análisis del Área de Servicio (UL)	74
Imagen 6-18 Histograma de Análisis del Área de Servicio (UL)	74
Imagen 7-1 Optimización (3GPP, 2013)	75
Imagen 7-2 Proceso Simplificado de Optimización (3GPP, 2013)	76
Imagen 8-1 Canales de Banda 4	77
Imagen 8-2 Banda 7 (ENACOM, Norma Técnica ENACOM-Q2-61.04 V17.1, 2017)	77
Imagen 8-3 Canales de Banda 7	78
Imagen 8-4 Configuración de Nueva Antena	78
Imagen 8-5 Propiedades de Nueva Antena	79
Imagen 8-6 Patrones de Radiación de Nueva Antena	79
Imagen 8-7 Resultado de Nuevo Link Budget	80
Imagen 8-8 Radiobases - Banda 7 - 15 m.	81
Imagen 8-9 Cobertura por Nivel de Señal (DL)	82
Imagen 8-10 Histograma de Cobertura por Nivel de Señal (DL)	82
Imagen 8-11 Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)	83
Imagen 8-12 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)	83
Imagen 8-13 Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)	84
Imagen 8-14 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)	84
Imagen 8-15 Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)	85
Imagen 8-16 Histograma de Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)	85
Imagen 8-17 Cobertura por nivel de PUSCH &PUCCH C/(I+N) (UL)	86
Imagen 8-18 Histograma de Cobertura por nivel de PUSCH &PUCCH C/(I+N) (UL)	86
Imagen 8-19 Análisis del Área de Servicio (DL)	87
Imagen 8-20 Histograma de Análisis del Área de Servicio (DL)	87

Imagen 8-21 Análisis del Área de Servicio (UL)	88
Imagen 8-22 Histograma de Análisis del Área de Servicio (UL).....	88
Imagen 8-23 Configuración de Ambientes de Trafico	90
Imagen 8-24 Polígonos de Tráfico	90
Imagen 8-25 Creación de Group 1 de Simulaciones	91
Imagen 8-26 Resultado de Simulaciones de Monte Carlo para Group 1	92
Imagen 8-27 Detalle de Resultado de Simulaciones de Monte Carlo para Group 1 ...	93
Imagen 8-28 Resultado de Tipos de Servicio	93
Imagen 8-29 Carga de Group 1 en Condiciones de Predicción.....	94
Imagen 8-30 Análisis del Área de Servicio (DL)	94
Imagen 8-31 Histograma de Comparación de Área de Servicio (DL) con y sin Simulación Cargada.....	95
Imagen 8-32 Análisis de Throughput (DL)	95
Imagen 8-33 Histograma de Análisis de Throughput (DL).....	96
Imagen 8-34 Throughputs Máximos 4AALVAR (NetChart, 2018)	99
Imagen 8-35 Throughputs Máximos por Celdas (Simulación)	100
Imagen 8-36 Porcentaje de Capacidad Utilizado por Celda	100
Imagen 8-37 TELECOM_User_Max (NetChart, 2018).....	101
Imagen 8-38 Cantidad de Usuarios Conectados/No Conectados (Simulación)	102
Imagen 8-39 TELECOM_Accesibilidad_Total Packet (NetChart, 2018).....	102
Imagen 8-40 Connection Success Rate (%) (Simulación).....	103
Imagen 8-41 Simulación con Doble Factor de Tráfico	104
Imagen 9-1 Mapa de Tráfico de Procesión.....	106
Imagen 9-2 Configuración de Ambiente Procesión.....	107
Imagen 9-3 Simulación de Monte Carlo sobre zona de Procesión	107
Imagen 9-4 Detalle de Simulación sobre Zona de Procesión	108
Imagen 9-5 Plantilla LTE Advanced Imagen 9-6 Configuración de Celda LTE-A	109
Imagen 9-7 Sitios LTE-A	110
Imagen 9-8 Activación de LTE-A en Perfiles de Usuarios	111
Imagen 9-9 Simulación de Monte Carlo con Sitios LTE-A	112
Imagen 9-10 Detalle de Simulación de Monte Carlo con Sitios LTE-A.....	113
Imagen 9-11 Análisis del Área de Servicio (DL) con Sitios LTE-A.....	114
Imagen 9-12 Histograma de Análisis del Área de Servicio (DL) con Sitios LTE-A .	114



Imagen 10-1 Exportación de Sitios y Cobertura en 3D a Google Earth (a)	117
Imagen 10-2 Exportación de Sitios y Cobertura en 3D a Google Earth (b)	117
Imagen 10-3 Comparación Visual de Radiobases LTE y LTE-A	118
Imagen 10-4 Plano Cercano de una Radiobase LTE en Google Earth	118

Abstract

El siguiente proyecto es la condensación de información relativa a las comunicaciones móviles, principalmente la 4ta Generación. También posee el diseño de una red LTE sobre una zona céntrica de la Ciudad de Salta a través de un software de planificación y simulación. Posteriormente, la red fue mejorada en un sector determinado a LTE-Advanced. Para todo lo expuesto, el documento posee una gran cantidad de información teórica que sirve de guía en las etapas de planificación.

Se analizaron detalladamente los comportamientos de la red en las predicciones computacionales del software utilizado y, con objetivos de calidad y cobertura definidos, se realizaron optimizaciones para alcanzarlos.

Teniendo en cuenta la evolución continua de las tecnologías, se aprovechó un evento multitudinario real para simular sobre sus parámetros, la implementación de la nombrada red LTE-Advanced. Esta última etapa se realizó considerando que la red de 5ta Generación aprovechará la infraestructura disponible para desplegarse, por lo que una densificación de la población de sitios no se considera como un sobredimensionamiento, sino como una preparación e inversión a futuro.

1. Introducción

La comunicación móvil se ha vuelto parte del día a día de la sociedad. Los complejos sistemas omnipresentes del día de hoy son usados por casi la totalidad de la población mundial.

La evolución continua de las tecnologías de comunicación móvil es algo que toda persona en las últimas dos décadas ha percibido de forma intensa. El estilo de vida de todos cambió desde el momento en que podíamos comunicarnos con otra persona a distancia, sin necesidad de acercarnos a algún dispositivo por cable.

Estos pasos agigantados repercutieron en toda la industria tecnológica, acostumbrándonos a ver avances importantes por lo menos cada un año. A nivel de usuario lo vimos en los dispositivos móviles, que fueron mejorando su velocidad, tamaño, calidad de imagen, prestaciones, etc.

Pero detrás de todo lo que el usuario tenía al alcance de su mano, fue necesario que toda la infraestructura de los sistemas móviles siga una evolución tan vertiginosa como costosa.

1.1.1. La Evolución Tecnológica

Actualmente estamos completamente en la etapa de 4ta generación, los sistemas LTE. Pero dentro de esta tecnología también hubo cambios a lo largo de los años, pensados de manera que el desarrollo no se detenga ni signifique un obstáculo para las redes que se acababan de implementar.

Del mismo modo, es necesario que las tendencias de tecnologías que nos llevan indefectiblemente a la 5ta generación mantengan dicha continuidad con las redes de 4ta generación. Para ello es necesario conocer los aspectos más importantes de cada una, identificar los puntos que continuarán y los que serán reemplazados. De esta manera se reducirían los costos al no implementar módulos de cierta tecnología que sabemos que tomarán un camino totalmente distinto en poco tiempo.

Es en este sentido que se ha decidido realizar el presente proyecto abarcando dos grandes temáticas:

1.1.2. Apartado Teórico

La primera es describir de manera teórica la evolución de la tecnología móvil hacia el año 2020, sin detenernos en los aspectos más técnicos, haciendo hincapié en los paradigmas que motivaron y definieron a las tecnologías de la manera en que las conocemos. Sobre este aspecto abordaremos primero un repaso por las tecnologías de 1ra, 2da y 3ra generación, para luego detallar más lo que es LTE y su posterior consolidación como 4G. Se presentarán cronológicamente las mejoras introducidas en cada publicación de LTE y al final de dicho capítulo se hará un resumen con las características más destacadas de este proceso.

Por último, se presentarán los pilares que moldean el desarrollo de 5G, sus objetivos y limitaciones, así como se podrán observar las tecnologías de 4G que persistirán en el nuevo modelo.

1.1.3. Apartado Práctico

El otro aspecto de este proyecto será la implementación de una red LTE con sus posteriores mejoras de LTE-Advanced en un software de diseño y simulación, sobre algunos barrios centrales de la ciudad de Salta.

1.1.4. Alcance

Para dicha práctica se tendrán en cuenta aspectos geográficos, tecnológicos, legales, de población y culturales que tengan que ver de alguna forma con una red LTE actual. Nos veremos limitados por las opciones de simulación del software elegido, que sólo nos permitirán llegar hasta LTE-A y, con el fin de simplificar el diseño, no tendremos en cuenta los edificios, casas u otro tipo de construcciones al momento de seleccionar los sitios para radiobases. Dejaremos los cálculos de este tipo de atenuantes dentro del modelo de propagación elegido. Tampoco se considerará la presencia de otras redes fuera de LTE, por los que la interferencia provendrá de la misma tecnología.

1.1.5. Criterios de Éxito

Los objetivos de la red serán proveer cobertura con un nivel de señal mayor a -90 dBm y -110 dBm en los canales más importantes de LTE a por lo menos el 95% del terreno. Y también se buscará otorgar modulaciones QAM a por lo menos el 85% del mismo. En el primer caso, dicho valor tendrá que alcanzarse considerando el ruido y la interferencia de los otros sitios. En el caso de QAM, su presencia nos indicará implícitamente la calidad de la red.

1.1.6. Etapas

Se correrán predicciones de cobertura y calidad de señal sobre todo el terreno elegido. Una vez identificadas las posibilidades de mejora, se procederá a optimizar o rediseñar la red si fuera necesario. Luego se harán simulaciones estadísticas que permitan analizar la red bajo densidades de población predefinidas.

Por último, se realizará un proceso de implementación de sitios LTE-A sobre la red creada anteriormente. La zona elegida para este despliegue se basará en un evento multitudinario real de la ciudad de Salta, que permitirá exigir al sistema LTE, colapsándolo y haciendo así evidentemente necesaria la instalación de radiobases LTE-Advanced. Sobre esta extensión también se buscará cumplir con los objetivos propuestos anteriormente.

1.2. Las Generaciones de Comunicación Móvil

En este tiempo, se han distinguido cuatro generaciones de sistemas de comunicación móvil, estando asociada cada una con un grupo de tecnologías y usos específicos. A continuación, se describirán brevemente dichas generaciones.

1.2.1. 1G y 2G: Tecnologías orientadas a la Voz

Los sistemas de primera generación (1G), eran los de telefonía móvil analógica (sólo voz) de los años 80'. Dichos sistemas generalmente estaban disponibles dentro de un país con un *roaming* internacional limitado, o sin él. Algunos ejemplos de estos sistemas incluyen a NMT (*Nordisk MobileTelefoni*), AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) y TACS (*Total Access Communications System*). La comunicación móvil estaba disponible antes de los sistemas 1G, pero generalmente a pequeña escala y destinado a un grupo selecto de gente.

Los sistemas de segunda generación (2G) aparecieron a principios de los 90'. Algunos ejemplos incluyen a GSM (*Global System for Mobile Communications*) originado en Europa, IS-95/CDMA e IS-136/TDMA, ambas tecnologías americanas, y la japonesa PDC (*Personal Digital Cellular*). Los sistemas 2G todavía estaban orientados a la voz, pero gracias a ser completamente digitales pudieron proveer una capacidad significativamente mayor que los de 1G. Con el pasar de los años, algunas de estas primeras tecnologías evolucionaron para soportar servicios de paquetes de datos primitivos. Estas extensiones se suelen llamar 2.5G para indicar que tienen sus raíces en las tecnologías 2G pero que tienen un rango de capacidades mucho más amplio que las originales. EDGE es un ejemplo bastante conocido de estas tecnologías 2.5G. GSM/EDGE todavía tiene un amplio uso en los smartphones, pero también se usa con frecuencia en comunicaciones tipo máquina como alarmas, sistemas de pago electrónico y monitoreo de estado.

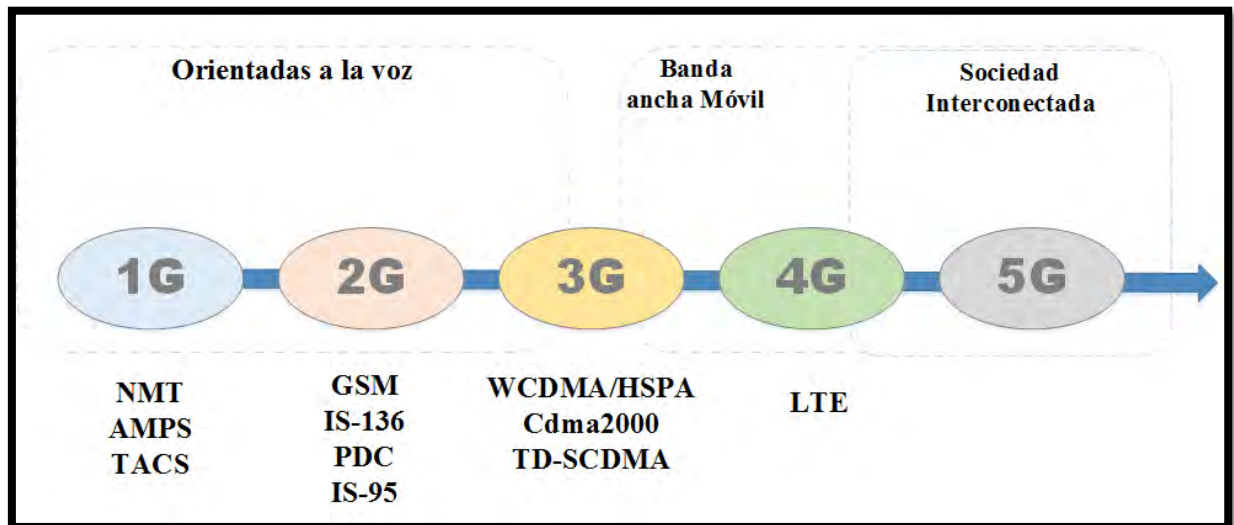


Imagen 1-1 Generaciones Móviles con sus Tecnologías (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

1.2.2. 3G y 4G: Ancha Banda Móvil

1.1.1. Durante los 90', la necesidad de dar soporte a servicios de datos además de los servicios de voz fue lo que demostró la importancia del planteamiento de una nueva generación de tecnologías celulares que vaya más allá. En este punto, a finales de los 90', a pesar de haber sido desarrollado en Europa, GSM se había vuelto un estándar global *de facto*. Para asegurar un alcance del mismo tipo para las

tecnologías 3G, se volvió evidente que el desarrollo de la tercera generación tenía que llevarse a cabo de manera global. Para lograr dicha tarea, se creó el *Third-Generation Partnership Project* (3GPP), quien desarrolló WCDMA y TD-SCDMA. Poco tiempo después, la organización paralela 3GPP2 se formó para crear la tecnología cdma2000, una evolución de la IS-95 de segunda generación.

La primera versión de WCDMA fue finalizada en 1999. Incluía voz y video a través de conmutación de circuitos, y servicios de datos tanto sobre conmutación de circuitos como sobre conmutación de paquetes.

La primera gran mejora de WCDMA vino con la introducción de *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) en la versión 5, seguida por *Enhanced Uplink* en la versión 6. Juntos se conocen como *High Speed Packet Access* (HSPA). A veces se refiere a estas tecnologías como 3.5G, ya que fueron las que permitieron al usuario experimentar una verdadera banda ancha móvil con *data rates* de varios Mbit/s, manteniendo la compatibilidad con las especificaciones originales de 3G. Con el soporte de banda ancha se gestaron las raíces para el rápido incremento de consumo de Smartphones, como el revolucionario iPhone y la amplia gama de dispositivos Android. Sin la disponibilidad de banda ancha para el mercado masivo, la recepción del uso del Smartphone hubiera sido significativamente más lenta y su usabilidad mucho más limitada. Al mismo tiempo, la gran cantidad de servicios basados en paquetes de datos como las redes sociales, juegos online, videos y compras a través de internet se tradujo en requerimientos de capacidades cada vez mayores y una eficiencia espectral considerable. A medida que los usuarios se acostumbraban a los servicios móviles, también elevaban sus expectativas en términos de *data rates* o velocidad y latencias menores. Estas necesidades se manejaron en parte por una continua evolución de HSPA que se extiende hasta el presente, pero también dispararon discusiones sobre una tecnología de cuarta generación a mediados de los años 2000.

La tecnología 4G LTE (*Long Term Evolution*) fue desarrollada desde un principio para el soporte de paquete de datos y no incluye soporte para voz a través de conmutación de circuitos, a diferencia de 3G, donde HSPA fue un “agregado” para poder proveer paquetes de datos de alta performance sobre una tecnología ya existente. El objetivo fueron los servicios de banda ancha móvil con estrictos requerimientos de alta velocidad, baja latencia y alta capacidad. Otros requerimientos fueron flexibilidad del espectro y una máxima homogeneidad entre las soluciones de FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*). Se desarrolló una nueva arquitectura de red Core, conocida como *Enhanced Packet Core* (EPC), para reemplazar la arquitectura utilizada por GSM y WCDMA/HSPA. La primera versión de LTE fue parte del *release 8* de especificaciones del 3GPP y su primera implementación comercial tuvo lugar a finales del 2009, seguida de una rápida puesta en funcionamiento mundial.

Un aspecto significativo de LTE es la aceptación universal de una única tecnología, a diferencia de las generaciones previas, para las cuales había varias tecnologías en competencia. El hecho de tener una sola tecnología aceptada mundialmente acelera el desarrollo de nuevos servicios y reduce el costo para los usuarios y operadores de red.

Desde su introducción comercial en 2009, LTE ha evolucionado considerablemente en términos de velocidad, capacidad, flexibilidad de espectro e implementación, y rango de

aplicación. Desde implementaciones macro-céntricas con velocidades pico de 300 Mbit/s en 20 MHz contiguos de espectro regulado, en la actualidad la evolución de LTE en su *release 13* soporta velocidades pico de varios Gbit/s a través de mejoras en las tecnologías de antenas, coordinación multi-sitio, explotación de espectro fragmentado, así como no regulado y despliegues de alta densidad, por mencionar algunas áreas. La evolución de LTE también ha ampliado considerablemente los casos de uso más allá de la banda ancha móvil, por ejemplo, permitiendo soporte para *Massive machine-type Communication*, comunicaciones de máquinas a gran escala, base de la *Internet of Things*, e introduciendo comunicación directa dispositivo-a-dispositivo.

1.2.3. 5G: La Sociedad Interconectada

Aunque LTE todavía está en una etapa de despliegue, la industria ya se encuentra en la ruta hacia la nueva generación de comunicación móvil, comúnmente llamada quinta generación o 5G.

La banda ancha móvil es, y seguirá siendo, una parte importante de las comunicaciones celulares, pero las redes inalámbricas futuras se encargarán de un vasto rango de casos de aplicación. En este sentido, 5G debería verse como una plataforma que permita conectividad inalámbrica a todo tipo de servicios, tanto existentes como los que aparezcan en un futuro, llevando así a las redes inalámbricas a mucho más que banda ancha móvil. La conectividad será provista en cualquier lugar, en cualquier momento, a quien sea o lo que sea. El término *networked society* o sociedad interconectada se usa para referirse a un escenario donde la conectividad vaya más allá de los smartphones, teniendo un impacto profundo en la sociedad.

La comunicación masiva de tipo-máquina, ejemplificada por sensores en agricultura, monitoreo del tráfico y gestión remota de equipamiento en edificios, es un tipo de aplicación que no pertenece a la banda ancha móvil. Estas aplicaciones tienen sus requerimientos puestos en un muy bajo consumo de energía por dispositivo, mientras que los *data rates* y cantidades de datos por dispositivo son bajos. Muchas de estas aplicaciones ya pueden ser soportadas por la evolución de LTE.

Otro ejemplo de aplicaciones no orientadas a la banda ancha son las *ultra-reliable and low-latency communications* (URLLC) ultra confiables y de baja latencia, también conocidas como comunicación crítica tipo-máquina. Algunos ejemplos se remiten a la automatización industrial, donde la latencia y la confiabilidad son muy estrictas. Otro ejemplo es la comunicación vehículo-a-vehículo para la seguridad vial.

Sin embargo, la banda ancha móvil seguirá siendo una parte importante y la cantidad de tráfico en redes inalámbricas se incrementa rápidamente, así como la expectativa del usuario con respecto a las velocidades, disponibilidad y latencia. Estos requerimientos también necesitan ser respondidos por las redes 5G.

Incrementar la capacidad se puede hacer de tres maneras: eficiencia espectral mejorada, despliegues de implementación densificados, y disponer de una mayor cantidad de espectro. La



eficiencia espectral de LTE ya es alta y aunque se pueden hacer mejoras, no es suficiente para corresponder al incremento de tráfico. Se espera densificar las redes, no solo desde el punto de vista de la capacidad, sino también para aumentar las velocidades, aún con el costo de encontrar sitios de antena adicionales. Incrementar la cantidad de espectro disponible ayudará, pero desgraciadamente, la cantidad de espectro no explotado alrededor de los 3 GHz es sumamente limitado. Por lo tanto, la atención se ha trasladado a bandas de frecuencia más altas, en los rangos de 3-6 GHz, 6-30 GHz y más, para los cuales LTE no ha sido diseñado. De todos modos, mientras que las condiciones de propagación en bandas de frecuencia más altas son menos favorables para una cobertura de zonas amplias y requieren de técnicas de antena más avanzadas como el *beamforming*, estas bandas pueden servir principalmente como un complemento para las existentes.

Como se ve, los requerimientos para las redes 5G son sumamente amplios, necesitando de una red con un alto nivel de flexibilidad. Además, como muchas aplicaciones futuras no pueden ser previstas ahora, es necesario que la tecnología contemple un margen para posibles eventos. Algunos de estos requerimientos pueden ser manejados por LTE y su evolución, pero no todos, siendo evidente la necesidad de una nueva tecnología de *radio-access* para complementar a LTE.

2. LTE

2.1.1. Acceso de Radio

El desarrollo de LTE comenzó a finales del año 2004 con el objetivo principal de proveer una nueva tecnología de acceso de radio orientada únicamente a paquetes de datos. La primera fase del trabajo de 3GPP sobre LTE fue definir un conjunto de objetivos de *performance* y capacidad. Esto incluyó tasas de transferencia de datos, rendimiento usuario/sistema, eficiencia espectral y latencia en los planos de control y de usuario. Así mismo, se definieron requerimientos sobre la flexibilidad del espectro y compatibilidad e interacción con otras tecnologías 3GPP (GSM, WCDMA/HSPA, y TD-SCDMA).

Una vez que los objetivos fueron definidos, los estudios de factibilidad de diferentes soluciones técnicas consideradas para LTE fueron seguidos por el desarrollo de especificaciones detalladas. La primera publicación de especificaciones de LTE, el *release 8*, fue completado en 2008 y la operación de la red comercial empezó a finales del 2009. La publicación 8 ha sido seguida por otras más sobre LTE, agregando funcionalidades y capacidades adicionales en diferentes áreas. En particular, el *release 10* fue el primero sobre LTE-Advanced, y el 13, finalizado en 2015, el primero sobre LTE-Advanced Pro. Actualmente 3GPP se encuentra en el desarrollo de las publicaciones 14 y 15.

Paralelamente al desarrollo de LTE, también ha habido una evolución de la arquitectura de red 3GPP, denominada *system architecture evolution* (SAE), que incluye tanto a la red de radio acceso como a la red core. También se definieron requerimientos sobre la evolución de la arquitectura, llevando a una nueva red plana de radio acceso con un solo tipo de nodo, el *eNodeB*, así como una nueva arquitectura de red core: *evolved packet core* (EPC).



Imagen 2-1 LTE y su Evolución (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

2.2. Tecnologías Básicas de LTE

2.2.1. Esquema de Transmisión

El Sistema de transmisión para downlink en LTE está basado en multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), un sistema atractivo por varios motivos. Debido al tiempo de símbolo relativamente largo de OFDM combinado con un prefijo cíclico, se provee un alto nivel de robustez contra la selectividad de frecuencia del canal (*channel-frequency*

selectivity). A pesar de que este problema puede ser manejado, en un principio, por ecualización del lado del receptor, la complejidad de dicha implementación en un dispositivo con un gran ancho de banda, vuelven a esta técnica poco viable, sobre todo en combinación con esquemas de transmisión avanzados multi-antena como la multiplexación espacial. Por lo tanto, OFDM se vuelve una opción atractiva para LTE, ya que un ancho de banda amplio y el uso de transmisión multi-antena formaron parte de los requerimientos clave desde un principio.

OFDM también ofrece algunos beneficios adicionales relevantes:

- Provee acceso al dominio de la frecuencia, permitiendo así al planificador dependiente del canal tener un grado más de libertad comparado con los sistemas 3G que sólo permiten planificación en el plano del tiempo.
- Un ancho de banda flexible para transmisión que permita operar en porciones de espectro de diferentes tamaños es fácil de implementar con OFDM, ya que se varía la cantidad de subportadoras usadas para transmisión. Sin embargo, esto también requiere un filtro flexible de RF. Aun así, mantener la misma estructura de procesamiento de banda base, sin importar el ancho de banda, facilita el desarrollo e implementación de los dispositivos.
- También se hace más simple la transmisión tipo *broadcast/multicast*, donde la misma información es transmitida desde múltiples estaciones base.

El uplink de LTE también está basado en OFDM. Sin embargo, para permitir una eficiencia mayor en el amplificador del lado del dispositivo, se usan diferentes medios para reducir la *cubic metric* de las transmisiones de subida. La métrica cúbica es una medida de la eficiencia de una forma de onda en comparación a otra de referencia. Una baja métrica cúbica se consigue colocando antes del modulador OFDM, un precodificador DFT, llevándonos a *DFT-spread OFDM* (DFTS-OFDM). Muchas veces, este término se usa para describir el esquema de transmisión de uplink de LTE en general. No obstante, se debe entender que esta técnica se usa solo para transmisión de subida de datos. En otros tipos de transmisión de subida se usan otros medios para alcanzar esa baja métrica cúbica. Por lo tanto, el esquema de transmisión de uplink de LTE debería ser descripto como OFDM con diferentes técnicas, incluyendo precodificación DFT para la transmisión de datos, usadas para reducir la métrica cúbica de la señal transmitida.

El uso de OFDM en el uplink permite también la separación ortogonal de las transmisiones en el dominio de la frecuencia. Este tipo de separación es beneficiosa en muchos casos ya que evita la interferencia entre transmisiones de subida provenientes de diferentes dispositivos dentro de la misma celda (*intra-cell interference*). Asignar un ancho de banda instantáneo bastante grande para la transmisión de un solo dispositivo no es una estrategia eficiente en situaciones en las que la tasa de transmisión de datos se encuentra limitada principalmente por la energía de transmisión del dispositivo, más que por el ancho de banda. En estas situaciones se puede asignar solo una parte del ancho de banda total a un dispositivo, mientras que a otros se les puede programar que transmitan en paralelo en la parte restante del espectro. En otras palabras, se permite tanto *time-division multiple access* (TDMA) como *frequency-division multiple access* (FDMA) a distintos usuarios.

2.2.2. Planificación Dependiente del Canal y Adaptación de la Tasa de Transmisión

Una característica clave de la comunicación móvil es la rápida y gran variación de las condiciones instantáneas del canal, derivadas de fading selectivo de frecuencia, path-loss dependiente de la distancia, e interferencias aleatorias debidas a transmisiones de otras celdas y de otros terminales. En vez de combatir estas variaciones a través de, por ejemplo, control de energía, LTE intenta aprovechar estas variaciones a través de *planificación dependiente del canal* donde los recursos de tiempo y frecuencia se comparten dinámicamente entre los usuarios. Esta repartición de recursos se encuentra bien emparejada a los requerimientos planteados por la comunicación de paquetes de datos que varían rápidamente.

El planificador controla en cada instante, a cuáles usuarios se les deberían asignar las diferentes partes del recurso compartido, y la tasa de transmisión de datos a ser usada por cada uno. Por lo tanto, la *adaptación de la tasa de transmisión* puede ser vista como parte de la funcionalidad de dicha planificación.

No obstante, incluso si la adaptación de tasa selecciona eficazmente una tasa de transmisión apropiada, hay una cierta probabilidad de que existan errores de transmisión. Para manejar estos errores de transmisión en LTE, se usa *fast hybrid-ARQ con soft combining* para permitir que el dispositivo solicite rápidamente la retransmisión de los bloques de datos recibidos erróneamente y provea una herramienta implícita para adaptación de tasa de transmisión.

El planificador es un elemento clave y en gran medida determina la performance de todo el sistema, especialmente en redes con mucha carga. Tanto el downlink como el uplink están sujetos a una estricta planificación en LTE. Se puede conseguir una ganancia sustancial en la capacidad del sistema si se toman en cuenta las condiciones del canal a la hora de planificar, donde se dirigen las transmisiones a los usuarios que tengan en dicho momento, las condiciones más favorables. Debido al uso de OFDM, el planificador tiene acceso a los dominios del tiempo y la frecuencia. En otras palabras, tiene la capacidad de seleccionar al usuario con las mejores condiciones de canal en cada instante y región de frecuencia.

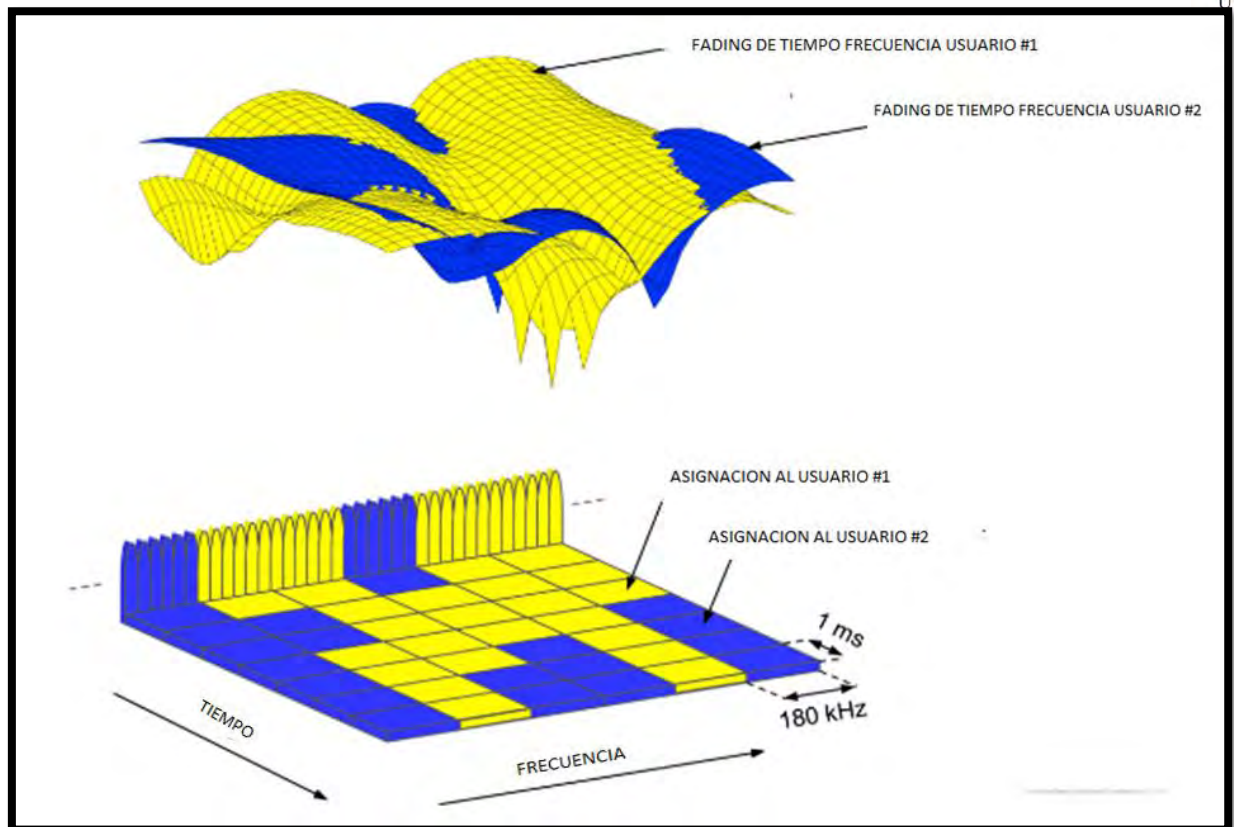


Imagen 2-2 Planificación Dependiente del Canal y Adaptación de la Tasa de Transmisión (Dahlman, Parkvall, Sköld, & Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, 2008)

La posibilidad de planificar dependiendo del canal en el dominio de la frecuencia es particularmente útil cuando la velocidad de desplazamiento del dispositivo es lenta, en otras palabras, cuando el canal varía lentamente en el tiempo. La planificación depende de las variaciones de la calidad del canal entre distintos usuarios para poder obtener una ganancia en la capacidad del sistema. Para servicios sensibles al retardo, un planificador que se base solo en el dominio del tiempo podría verse forzado a asignar recursos a un usuario en particular debido a las exigencias de retardo, aun cuando la calidad del canal no sea la óptima. En dichas situaciones, explotar las variaciones de la calidad del canal también en el dominio de la frecuencia, ayudará a mejorar el comportamiento general del sistema. Para LTE, las decisiones de planificación se pueden tomar cada 1ms, y la granularidad del espectro de frecuencia es 180kHz. Esto permite que se rastreen y utilicen los rápidos cambios en las condiciones del canal, tanto en frecuencia como en el tiempo.

Para soportar la planificación en el downlink, un dispositivo puede proveer a la red, reportes del estado del canal, indicando la calidad instantánea de dicho canal en frecuencia y tiempo. Generalmente, el estado del canal se obtiene midiendo señales de referencia transmitidas por el downlink. Basado en estos reportes, también llamados *channel-state information* (CSI), el planificador de downlink asigna los recursos a distintos dispositivos.

Como se mencionó antes, el uplink de LTE está basado en la separación ortogonal de diferentes transmisiones, y es la tarea del planificador de uplink asignar recursos en tiempo y frecuencia a distintos dispositivos. Estas decisiones controlan que grupo de dispositivos transmiten en una celda durante cierto intervalo y, para cada dispositivo, en qué recursos de

frecuencia la transmisión tendrá lugar y bajo qué parámetros, como la tasa de velocidad transmisión. Se pueden usar estrategias similares al downlink, aunque hay algunas diferencias entre ambos. Fundamentalmente, el recurso de energía para el uplink se encuentra distribuido entre los usuarios, mientras que en el downlink se encuentra centralizado en la estación base. Además, la energía máxima de transmisión de un solo terminal es significativamente más baja que la energía de salida de una estación base. Esto tiene un impacto considerable en la estrategia de planificación. A diferencia del downlink, donde a menudo se puede usar división del tiempo pura, en el uplink se tiene que compartir también en el dominio de la frecuencia dado que un terminal puede no tener la suficiente energía para utilizar eficientemente la capacidad del enlace.

Las condiciones también se pueden tomar en cuenta en el proceso de planificación del uplink, de manera similar al downlink. Una forma de adquirir CSI del uplink es a través del denominado *sounding*, donde el terminal transmite una señal de referencia conocida, a partir de la cual, la estación base puede evaluar la calidad del canal en diferentes partes del espectro. Sin embargo, obtener información sobre las condiciones del canal de uplink no es factible o deseable en todas las situaciones. Por lo tanto, cobran importancia diferentes métodos para conseguir *diversidad en el uplink* para complementar dichas situaciones donde la planificación dependiente del canal para uplink no es posible.

2.2.3. Coordinación de Interferencia Inter-Celda

LTE está diseñado para operar con un reuso de frecuencia de uno, implicando que la misma frecuencia de portadora puede ser usada en puntos de transmisión vecinos. En particular, los canales básicos de control de LTE están diseñados para operar adecuadamente con la baja relación señal-interferencia que se puede experimentar en un despliegue con este tipo de reuso.

Tener acceso a todos los recursos de frecuencia en cada punto de transmisión siempre es beneficioso. Sin embargo, la eficiencia del sistema y la calidad provista al usuario final mejoran más si las transmisiones de los puntos vecinos de transmisión se coordinan de tal manera que sea posible evitar las situaciones de interferencia más severas.

La primera publicación de LTE incluía explícitamente soporte para dicha coordinación, denominada *inter-cell interference coordination* (ICIC). Específicamente, la publicación definía un conjunto de mensajes que se pueden intercambiar entre los eNodeB usando la interfaz X2. Estos mensajes proveen información sobre la situación de interferencia experimentada por el eNodeB emisor del mensaje y puede ser utilizado por un eNodeB vecino que reciba el mensaje para su proceso de planificación, y de esta manera, exista un medio para coordinar las transmisiones y controlar la interferencia entre distintas celdas, al menos parcialmente. Se pueden dar situaciones de interferencia especialmente severas en los llamados *despliegues de red heterogénea*, que consisten en capas solapadas de estaciones base con amplias diferencias en energía de transmisión para downlink.

2.2.4. Transmisión Multi-Antena

Desde su primera publicación, LTE ha incluido soporte para diferentes técnicas multi-antena como una parte integral de las especificaciones de la interfaz de radio. Es el aspecto

clave en muchos aspectos para alcanzar los agresivos objetivos de performance. Algunos propósitos se enumeran a continuación:

- Múltiples antenas receptoras se pueden usar para diversidad en la recepción. Para transmisiones uplink, han sido usadas en muchos sistemas celulares por varios años. No obstante, como las antenas duales para recepción son la base para todos los dispositivos LTE, la performance del downlink también se ve mejorada. La manera más simple de uso de múltiples antenas en la recepción es la clásica diversidad de recepción para reunir energía adicional y suprimir el fading, pero se pueden conseguir beneficios adicionales en escenarios limitados por interferencia si, además de proveer diversidad, las antenas son usadas para suprimir la interferencia.
- En la estación base, el uso de múltiples antenas puede proveer diversidad en la transmisión y diferentes tipos de formación de haz (*beam-forming*). El objetivo principal del *beam-forming* es mejorar la relación señal-a-interferencia-y-ruido (SINR) y, eventualmente, mejorar la capacidad del sistema y su cobertura.
- Multiplexación espacial, a veces llamada *multiple input, multiple output* (MIMO) o más específicamente *single-user MIMO* (SU-MIMO) que usa múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor. La multiplexación espacial resulta en un incremento en la velocidad de datos, si las condiciones del canal lo permiten, en escenarios limitados por el ancho de banda mediante la creación de varios “canales” paralelos. Alternativamente, combinando las propiedades espaciales con un procesamiento supresor de interferencia en el receptor, muchos dispositivos pueden transmitir al mismo tiempo, sobre el mismo recurso de frecuencia, para aumentar la capacidad total de la celda. En 3GPP se le llama a esto *multiuser MIMO*.

En general, las diferentes técnicas multi-antena, son beneficiosas en diferentes escenarios. Por ejemplo, a una SINR relativamente baja, por ejemplo, con mucha carga o en el límite de la celda, la multiplexación espacial provee beneficios limitados. En cambio, en dichas situaciones, las antenas múltiples del lado del transmisor deberían usarse para elevar la SINR a través del *beam-forming*. Por otro lado, en escenarios donde ya haya una alta SINR, por ejemplo, en celdas pequeñas, elevar la calidad de la señal no produce alguna ganancia significativa ya que las velocidades de datos están principalmente limitadas por el ancho de banda más que por la SINR. En estas situaciones se debería usar multiplexación espacial para explotar completamente las buenas condiciones del canal. El esquema multi-antena utilizado es controlado por la estación base, la cual puede seleccionar un esquema adecuado para cada transmisión.

2.2.5. Flexibilidad del Espectro

Una de las características clave de LTE es el alto grado de flexibilidad de espectro. El objetivo de esto es permitir el despliegue de radio acceso LTE en diferentes bandas de frecuencia con variadas características, incluyendo diferentes disposiciones dúplex y tamaños de espectro disponibles.

En LTE es posible implementar su radio acceso en porciones de espectro apareado como no-apareado. De esta manera, LTE soporta arreglos dúplex basados en división de tiempo y división de frecuencia.

En *Frequency-division duplex* (FDD), las transmisiones de downlink y uplink tienen lugar en bandas de frecuencia distintas y bien separadas. En *Time-division duplex* (TDD) estas transmisiones ocurren en distintos *time-slots* que no se solapan. Así, TDD puede operar en espectro no apareado, mientras que FDD requiere espectro apareado.

El funcionamiento en espectro apareado y no apareado ha sido soportado por las tecnologías de radio acceso 3GPP desde antes de la introducción de LTE a través de WCDMA/HSPA basado en FDD, en combinación con TD-SCDMA basado en TDD. Sin embargo, esto se logró combinando diferentes tecnologías de radio acceso, lo que supuso una complejidad adicional al momento de desarrollar dispositivos de operación dual en FDD y TDD. Por otro lado, LTE lo hace con una sola tecnología de radio, logrando una desviación mínima entre FDD y TDD. También soporta *half-duplex* FDD en los dispositivos, en la cual, la transmisión y recepción en un dispositivo específico están separadas tanto en tiempo como en frecuencia. La estación base aún usa full-duplex FDD ya que puede planificar simultáneamente a diferentes dispositivos en uplink y downlink. El beneficio principal de *half-duplex* FDD es que se reduce la complejidad del dispositivo al no ser necesario un filtro dúplex. Esto es especialmente útil en el caso de dispositivos multibanda que de otro modo necesitarían varios grupos de filtros dúplex.

Una característica importante de LTE es que soporta rangos de diferentes anchos de banda para la transmisión. La razón principal de esto es que la cantidad de espectro disponible para la implementación de LTE puede variar significativamente entre diferentes bandas de frecuencia y también según la situación del operador. Además, la posibilidad de operar en distintas porciones de espectro da la posibilidad de una migración gradual desde otras tecnologías de radio acceso a LTE.

Las especificaciones de capa física de LTE son agnósticas al ancho de banda y no toman ningún supuesto sobre los mismos más allá de un valor mínimo. Se permite cualquier ancho de banda de transmisión desde alrededor de 1MHz hasta 20MHz. En la práctica, el radio acceso de LTE soporta una cantidad limitada de anchos de banda, pero se pueden agregar más actualizando únicamente las especificaciones de RF.

2.2.6. Soporte Multicast y Broadcast

En situaciones donde una gran cantidad de usuarios quieren recibir la misma información, por ejemplo, un clip de noticias de televisión, información de las condiciones climáticas locales, o información sobre la bolsa de valores, puede que una transmisión de información separada para cada usuario no sea el método más eficiente. En cambio, puede ser una mejor opción transmitir la misma información de una vez a todos los usuarios interesados. Esto se conoce como *broadcast* o *servicios broadcast-multicast multimedia* (MBMS) en 3GPP, implicando una transmisión de la misma información a múltiples receptores. En muchos casos la misma información es de interés sobre una amplia zona en la cual pueden transmitirse señales idénticas desde múltiples sitios de celda con idéntica codificación, modulación, frecuencia y

tiempo sincronizados a través de los sitios. Desde la perspectiva de un dispositivo, la señal aparecerá exactamente igual a una señal transmitida desde un sitio singular y sujeta a la propagación multicamino. Debido a la robustez de OFDM ante la propagación multicamino, estas transmisiones multicelda, llamadas en 3GPP transmisiones *multicast/broadcast single-frequency network* (MBSFN), no sólo mejorarán la fuerza de la señal recibida, sino que también eliminarán la interferencia inter-celda. Por lo tanto, con OFDM, el rendimiento de *broadcast/multicast* puede verse limitado eventualmente sólo por el ruido, y en el caso de pequeñas celdas puede alcanzar valores extremadamente altos.

Debería tomarse en cuenta que el uso de transmisiones MBSFN para *broadcast/multicast* multicelda asume el uso de una estricta sincronización y alineamiento en el tiempo de las señales transmitidas desde diferentes sitios de celda.

El soporte para MBSFN fue parte del trabajo de LTE desde el principio, pero debido a limitaciones temporales, no se completó hasta la segunda publicación de LTE, el *release 9*. También hay mejoras para soportar servicios *multicast/broadcast* en una sola celda en el *release 13*, conocidas como *single-cell point to multi-point* (SC-PTM).

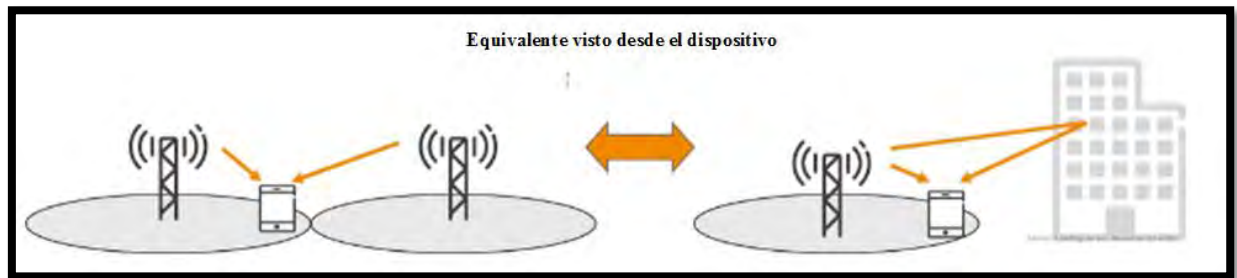


Imagen 2-3 Soporte Multicast y Broadcast (Ahmadi, 2014)

2.2.7. Posicionamiento

Como el nombre indica, se refiere a la funcionalidad en la red de radio acceso para determinar la ubicación de dispositivos individuales. Eso puede hacerse, en principio, incluyendo un receptor GPS en el dispositivo. Aunque es algo bastante común, no todos los dispositivos incluyen necesariamente un receptor GPS y puede haber casos en los que el servicio de GPS no esté disponible. La publicación 9 de LTE introdujo el soporte para posicionamiento inherente en la red de radio acceso. Permitiéndole al dispositivo medir y reportar a la red el tiempo relativo de llegada de señales especiales de referencia transmitidas regularmente desde distintos sitios de celda, la ubicación del dispositivo puede ser determinada por la red.

3. Evolución de LTE

Los *releases* 8 y 9 (3GPP, 2008) sentaron las bases de LTE, proveyendo un estándar móvil de banda ancha de alta capacidad. Sin embargo, para cumplir con los nuevos requerimientos y expectativas, las publicaciones siguientes agregaron mejoras y funcionalidades en diferentes áreas.

La publicación 10 (3GPP, 2009) marca el inicio de la evolución de LTE. Uno de los objetivos principales de éste fue asegurar que la tecnología de radio acceso de LTE sea completamente compatible con los requerimientos de IMT-Advanced, por ese motivo se usa el nombre *LTE-Advanced* para referirse a la publicación 10 y subsiguientes. No obstante, además de los requerimientos de ITU, 3GPP también definió sus propios objetivos y requerimientos para *LTE-Advanced*. Un requerimiento importante fue la compatibilidad hacia atrás. Esto significa que un dispositivo de una versión anterior de LTE debería poder acceder a una red que utilice funcionalidades de la publicación 10, a pesar de obviamente no poder utilizar todas sus características.

La publicación 10 se completó a finales del año 2010 e implicó mejoras en la flexibilidad del espectro a través de la agregación de portadoras, una transmisión multi antena extendida, introdujo el soporte para retransmisión y proveyó de mejoras en el área de coordinación de interferencia en despliegues de redes heterogéneas.

La publicación 11, finalizada en 2012, extendió aún más la performance y capacidades de LTE. Una de sus características más notables fue la funcionalidad de la interfaz de radio para transmisión y recepción *coordinada multi-punto* (CoMP). Otros ejemplos de mejoras fueron desarrollos en la agregación de portadoras, una nueva estructura del canal de control, y requerimientos de performance para receptores más avanzados.

La publicación 12 se completó en 2014 y se centró celdas pequeñas con características como conexión dual, celda pequeña activa/no-activa, y *enhanced Interference Mitigation and Traffic Adaptation* (eIMTA, o Mitigación mejorada de la interferencia y adaptación del tráfico), así como de nuevos escenarios con la introducción de comunicación directa dispositivo-a-dispositivo, y redujo la complejidad de la comunicación tipo máquina.

La publicación 13, finalizada sobre el final del 2015, marca el inicio de *LTE-Advanced Pro*. A veces en el mercado se le llama 4.5G y es vista como una tecnología intermedia entre 4G definido por las primeras publicaciones de LTE y la inminente llegada de la nueva interfaz de aire 5G. Se incluyó *License-assisted Access* (LAA) para que se pueda soportar espectro no licenciado como un complemento al espectro licenciado, se mejoró el soporte para la comunicación tipo máquina, y varias mejoras en *carrier aggregation*, transmisión multi antena y comunicación dispositivo-a-dispositivo.

3.1. Flexibilidad del Espectro

3.1.1. Agregación de Portadoras

Como se mencionó, la primera versión de LTE ya proveía de soporte para implementación en porciones de espectro de características variadas, con anchos de banda desde 1 MHz a 20 MHz en bandas apareadas y no apareadas. Con la publicación 10, el ancho de banda de transmisión puede extenderse más a través de la llamada *agregación de portadoras*, donde múltiples *portadoras componente* se agregan y son usadas conjuntamente para transmitir hacia y desde un mismo dispositivo. En dicha versión se pueden agregar hasta cinco portadoras componente, posiblemente cada una de distintos anchos de banda, permitiendo anchos de banda de transmisión de hasta 100 MHz. Todas las portadoras componente deben tener el mismo esquema dúplex y, en caso de TDD, la misma configuración de uplink y downlink. En las publicaciones siguientes, este requerimiento se desestimó y el número de portadoras componente que se pueden agregar se incrementó a 32, resultando en un ancho de banda total de 640 MHz. Se aseguró la compatibilidad hacia atrás al hacer que cada portadora componente use la estructura de la publicación 8. Por lo tanto, para un dispositivo perteneciente a la publicación 8/9, cada portadora se verá como una de LTE *release* 8, mientras que un dispositivo con capacidad de agregación de portadoras puede explotar el ancho de banda agregado total, mejorando así su velocidad de datos. En general, un número diferente de portadoras componente se pueden agregar para el downlink y uplink. Esta es una propiedad importante desde el punto de vista de la complejidad del dispositivo, donde la agregación puede ser soportada en el downlink, en el cual se necesitan velocidades muy altas, sin incrementar la complejidad del uplink.

La portadoras componente no necesitan ser contiguas en frecuencia, lo cual permite la explotación del *espectro fragmentado*. De esta manera, los operadores que tengan este tipo de espectro pueden proveer servicios de alta velocidad de datos basados en la disponibilidad de un amplio ancho de banda total aún si no poseen una sola porción ancha del mismo.

El *release* 11 trajo flexibilidad adicional para la agregación de portadoras TDD. Antes de esto, se requería de la misma locación de downlink y uplink para todas las portadoras agregadas. Esto puede ser innecesariamente restrictivo en el caso de agregación de diferentes bandas ya que la configuración en cada banda puede estar dada por la coexistencia con otras tecnologías de radio acceso en esa banda en particular. Un aspecto interesante de agregar diferentes porciones de downlink y uplink es que el dispositivo puede necesitar recibir y transmitir simultáneamente para poder utilizar completamente ambas portadoras. En consecuencia, a diferencia de las versiones previas, un dispositivo con capacidades TDD puede necesitar un filtro dúplex, de manera similar a uno FDD.

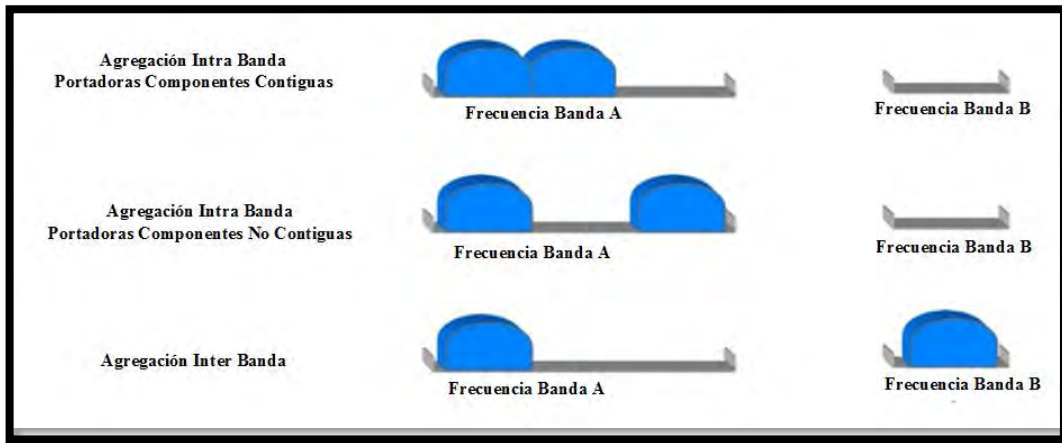


Imagen 3-1 Agregación de Portadoras (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

La publicación 12 definió las agregaciones entre portadoras TDD y FDD, a diferencia de sus versiones predecesoras que solo soportaban agregación con un tipo de dúplex. Esto permite una utilización más eficiente de los activos de espectro de un operador. También puede ser usado para mejorar la cobertura de uplink de TDD aprovechando la posibilidad de una transmisión continua de uplink en la portadora FDD.

En la publicación 13 se incrementó el número de portadoras que se pueden agregar de 5 a 32, resultando en un ancho de banda máximo de 640 MHz y velocidades de datos picos de, en teoría, alrededor de 25Gbit/s en downlink. El motivo principal para incrementar el número de subportadoras es permitir anchos de banda muy grandes en espectro no licenciado en conjunto con LAA.

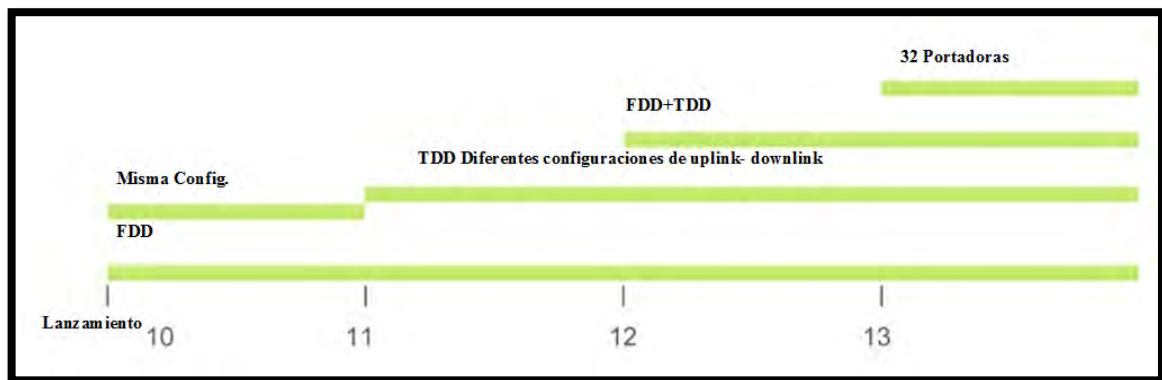


Imagen 3-2 Evolución de Portadoras (Chapman, y otros, 2015)

3.1.2. Acceso de Licencia Asistida (License-Assisted Access)

Originalmente, LTE fue diseñado para espectro licenciado, donde un operador tiene una licencia exclusiva para un cierto rango de frecuencia. El espectro licenciado ofrece muchos beneficios dado que el operador puede planificar la red y controlar las situaciones de interferencia, pero hay un costo asociado a la obtención de la licencia del espectro y la cantidad del mismo es limitado. Por lo tanto, usar espectro no licenciado como un complemento para ofrecer velocidades de datos más altas y más capacidad en áreas locales se vuelve interesante. Una posibilidad es complementar la red LTE con Wi-Fi, pero se puede alcanzar una

performance mayor con un emparejamiento entre espectro licenciado y no licenciado. De esta manera, LTE 13 introdujo el acceso de licencia asistida, donde la agregación de portadoras se usa para agregar downlink en bandas de frecuencia no licenciadas, primariamente en el rango de 5 GHz. La movilidad, señalización de control crítica y servicios que demanden una alta calidad de servicio dependen de portadoras en el espectro licenciado mientras que el tráfico menos demandante puede ser manejado por portadoras que usen espectro no licenciado. El objetivo son despliegues de celdas pequeñas controladas por operadores. Compartir de manera justa los recursos de espectro con otros sistemas, en particular Wi-Fi, es una característica importante de LAA que para ello incluye un mecanismo de *escuchar-antes-de-hablar*.

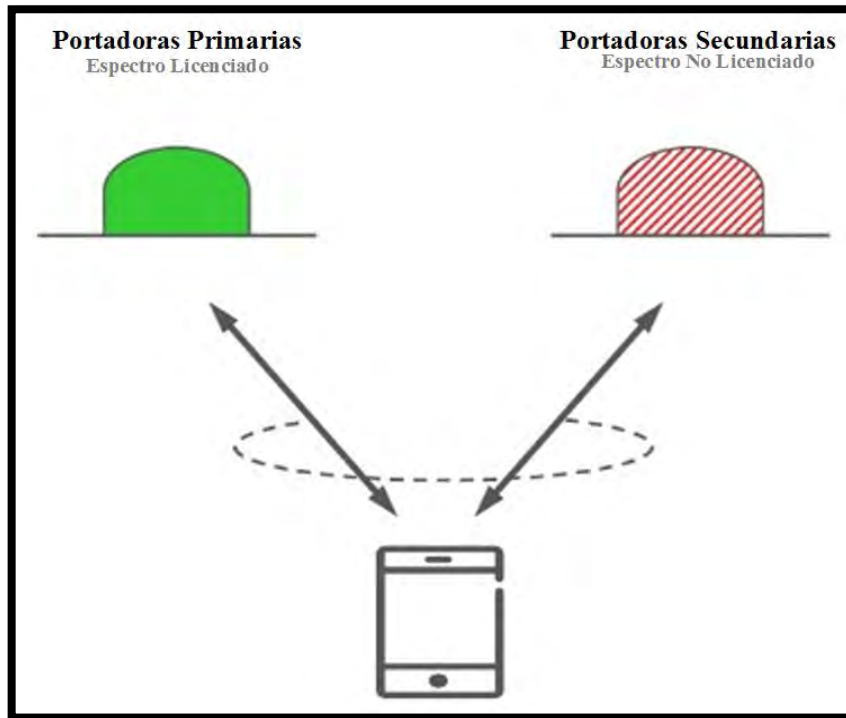


Imagen 3-3 Acceso de Licencia Asistida (License-Assisted Access) (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

3.2. Mejoras Multi Antena

El soporte multi antena se mejoró a lo largo de las distintas versiones, incrementando el número de capas de transmisión en el downlink a 8 e introduciendo la multiplexación espacial en el uplink. *Full-dimension MIMO* (FD-MIMO) y generación de haz de dos dimensiones son otras mejoras, junto con la introducción de la transmisión CoMP.

3.2.1. Transmisión Multi Antena Extendida

En la publicación 10, la multiplexación espacial de downlink se expandió para soportar hasta ocho capas de transmisión. Esto puede verse como una extensión de la generación de haz de doble capa de la versión 9 para soportar hasta ocho puertos de antena y ocho capas correspondientes. Junto con el soporte para CA esto permite velocidades de downlink de hasta

3 Gbit/s en 100 MHz de espectro en la publicación 10, incrementada a 25 Gbit/s en la publicación 13 usando 32 portadoras, 8 capas de multiplexación espacial y 256QAM.

La multiplexación espacial de uplink con hasta cuatro capas fue introducida también en LTE 10. Junto con la posibilidad de CA en uplink, esto permite velocidades de hasta 1.5 Gbit/s en 100 MHz de espectro. La multiplexación espacial de uplink consiste en un esquema de libro de códigos bajo el control de la estación base, lo que significa que la estructura también se puede usar para *beam-forming* de uplink del lado del transmisor.

Una consecuencia importante de las extensiones multi antena en LTE 10 fue la introducción de una *estructura de señal de referencia* mejorada en el downlink que separó de manera más extensa la función de estimación del canal y la función de adquirir CSI. El propósito de esto fue facilitar los arreglos o esquemas de antena y nuevas características como una coordinación/transmisión multi punto más elaborada en una manera flexible.

En la publicación 13, se mejoró el soporte para un gran número de antenas, en particular en términos de una mayor cantidad de feedback de CSI. Los mayores grados de libertad se pueden usar, por ejemplo, para beam-forming tanto en elevación como en azimuth y *massive multiuser MIMO* donde muchos dispositivos espacialmente separados son servidos simultáneamente usando el mismo recurso de tiempo y frecuencia. Estas mejoras se llaman a veces *full-dimension MIMO* y forman un paso importante hacia *massive MIMO* con un gran número de elementos de antena dirigibles.

3.2.2. Coordinación y Transmisión Multi Punto

La primera versión de LTE incluía soporte específico para coordinación entre puntos de transmisión, llamada ICIC, como un medio para controlar, al menos parcialmente, la interferencia entre las celdas. Sin embargo, el soporte para dicha coordinación se vio significativamente expandido como parte de LTE 11, incluyendo la posibilidad de una coordinación mucho más dinámica.

En contraste al ICIC de la publicación 8, el cual estaba limitado a la definición de ciertos mensajes X2 para asistir la coordinación entre celdas, las actividades de la versión 11 se centraron en características de interfaz de radio y funcionalidad de dispositivos para asistir diferentes medios de coordinación, incluyendo el soporte para feedback de estado-del-canal para múltiples puntos de transmisión. Estas características y funcionalidades conjuntamente se llaman *transmisión/recepción CoMP*. También fue importante un refinamiento a la estructura de la señal de referencia como parte del soporte CoMP, así como la estructura mejorada del canal de control.

El soporte para CoMP incluye *coordinación multi punto*, que es cuando la transmisión a un dispositivo es llevada a cabo desde un punto de transmisión específico, pero donde la planificación y adaptación del enlace es coordinada por varios puntos de transmisión. La *transmisión multi punto* es en la que la transmisión hacia un dispositivo puede ser llevada a cabo desde muchos puntos de transmisión, o de manera que la transmisión pueda cambiar dinámicamente entre diferentes puntos de transmisión (*Dynamic Point Selection*), o bien sea realizada conjuntamente desde múltiples puntos de transmisión (*Joint Transmission*).

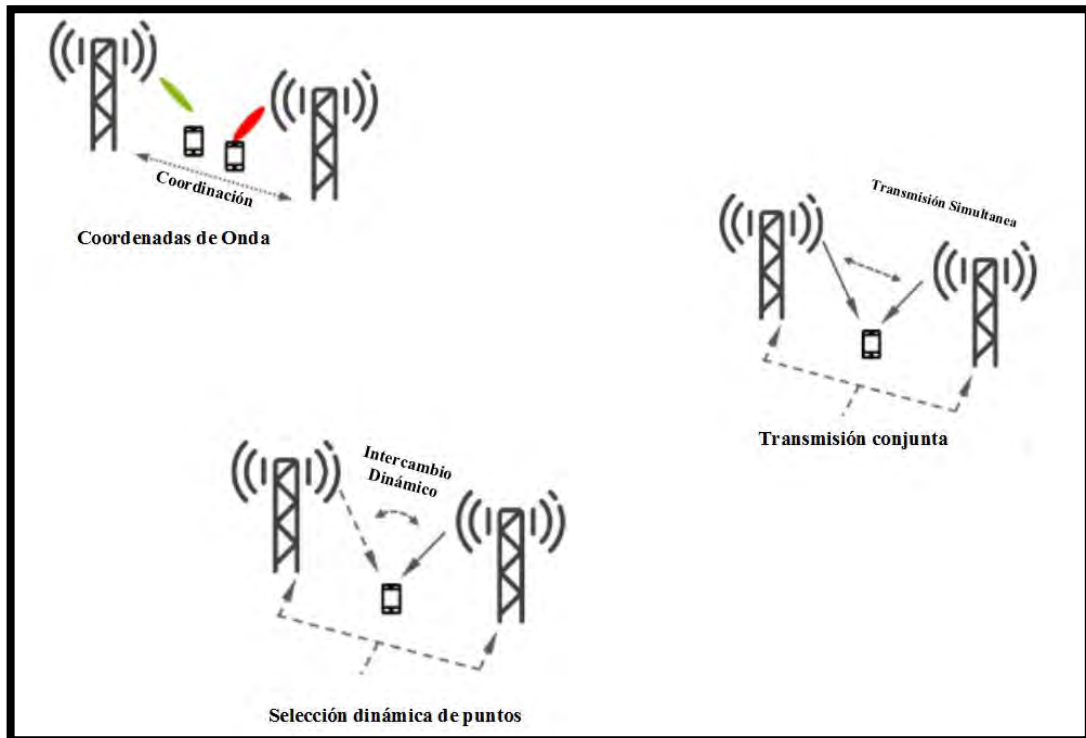


Imagen 3-4 Coordinación y Transmisión Multi Punto (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

El trabajo de CoMP en la publicación 11 asumía una red de retorno ideal, lo cual en la práctica implica un procesamiento de banda base centralizado, conectado a los sitios de antena usando conexiones de fibra de baja latencia. En la publicación 12 se extendió a escenarios de red de retorno más relajados sin las características recién mencionadas. Estas mejoras consistieron principalmente en definir nuevos mensajes X2 para intercambiar información sobre las llamadas *hipótesis CoMP*, esencialmente una asignación potencial de recursos, y el costo/ganancia asociados.

3.2.3. Estructura Mejorada del Canal de Control

En la publicación 11, una nueva estructura complementaria del canal de control se introdujo para soportar ICIC y explotar la flexibilidad adicional de la nueva estructura de señal de referencia no solo para transmisión de datos, lo cual ya se hacía en la versión 10, sino también para señalización de control. La nueva estructura del canal de control puede ser vista como un pre-requisito para muchos esquemas de CoMP, aunque también es beneficioso para *beam-forming* y coordinación de interferencia en el dominio de la frecuencia. También se utiliza para soportar operaciones de banda angosta en las mejoras de MTC en las publicaciones 12 y 13.

3.3. Densificación, Celdas Pequeñas y Despliegues Heterogéneos

Las celdas pequeñas y despliegues de alta densidad han estado en foco durante varias publicaciones como medio para proveer una capacidad y velocidades de datos muy altas. La

retransmisión, celda pequeña activa/no activa, TDD dinámico, y los despliegues heterogéneos son algunos ejemplos de las mejoras que se han implementado para dicho fin. LAA, discutido en el área de flexibilidad del espectro, también puede ser visto como una mejora primaria para celdas pequeñas.

3.3.1. Retransmisión

En el contexto de LTE, *retransmitir* implica que el dispositivo se comunica con la red a través de un *nodo de retransmisión* que está conectado inalámbricamente a una *celda donante* usando la tecnología de interfaz de radio de LTE.

Desde el punto de vista del dispositivo, el nodo de retransmisión aparecerá como una celda común. Esto tiene la importante ventaja de simplificar la implementación del dispositivo y hacer al nodo de retransmisión compatible hacia atrás. Esencialmente, es una estación base de baja potencia, conectada inalámbricamente a la parte restante de la red.

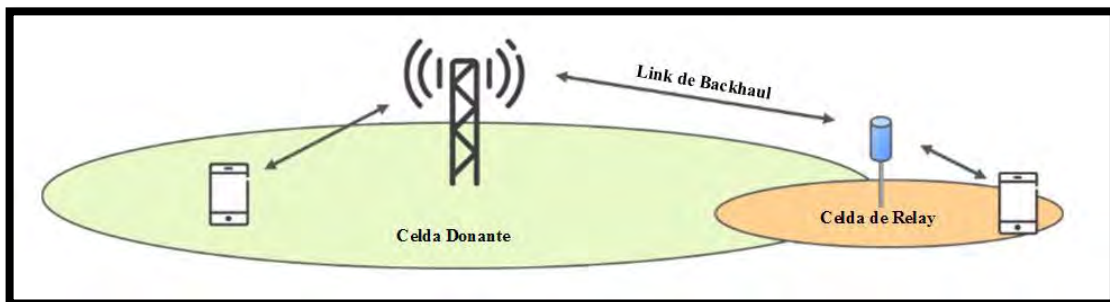


Imagen 3-5 Retransmisión (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

3.3.2. Despliegues Heterogéneos

Se refiere a despliegues con una mezcla de nodos de red con diferentes potencias de transmisión que se solapan en su cobertura geográfica. Un ejemplo típico es un pico-nodo localizado dentro del área de cobertura de una macrocelda. Aunque estos despliegues ya eran soportados en la publicación 8, la publicación 10 introdujo nuevos medios para manejar la interferencia inter-capa que podía ocurrir, por ejemplo, una pico-capa y la macro-capa superpuesta. Las técnicas de coordinación multipunto a partir de la publicación 11 aumentaron el grupo de herramientas para soportar despliegues heterogéneos. Se hicieron mejoras para facilitar la movilidad entre la pico-capa y la macro-capa en la publicación 12.

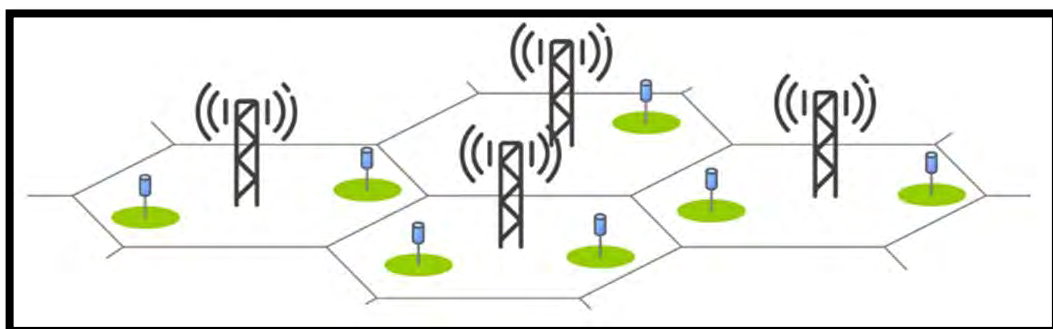


Imagen 3-6 Despliegues Heterogéneos (Ahmadi, 2014)

3.3.3. Celda Pequeña Activa/ No Activa

En LTE, las celdas se encuentran transmitiendo continuamente señales de referencia específicas de la celda y haciendo broadcast de la información del sistema, independientemente de la actividad de tráfico en la celda. Una razón para esto es permitir que los dispositivos sin actividad detecten la presencia de una celda; si no hubiera transmisiones de una celda, no hay nada para que el dispositivo mida, y, por lo tanto, no la detectaría. Además, en un despliegue de grandes macroceldas hay una probabilidad relativamente alta de que al menos un dispositivo esté activo, justificando la transmisión continua de señales de referencia.

No obstante, en un despliegue de alta densidad con un número grande de celdas relativamente pequeñas, la probabilidad de que no todas las celdas estén sirviendo a algún dispositivo al mismo tiempo puede ser alta. El escenario de interferencia de downlink experimentado por un dispositivo también puede ser más severo cuando haya una muy baja tasa de señal-a-interferencia debida a interferencias de celdas vecinas, potencialmente vacías, especialmente si hay una gran cantidad de propagación en línea de vista. Para solucionar esto, la publicación 12 introdujo mecanismos para activar o desactivar celdas individuales en función de la situación del tráfico para reducir la interferencia inter-celda promedio y también el consumo de energía.

3.3.4. Conectividad Dual

La conectividad dual implica que un dispositivo esté conectado simultáneamente a dos eNodeB. La agregación del plano de usuario, donde el dispositivo se encuentra recibiendo transmisiones de datos desde varios sitios, la separación del plano de control y de usuario y la separación del uplink – downlink donde las transmisiones de downlink se originan desde un nodo distinto al que recibe el uplink son algunos ejemplos de los beneficios con la conectividad dual. Hasta cierto punto puede verse como agregación de portadoras extendido al caso de una red de retorno no ideal. El sistema de conectividad dual también resultó ser muy útil para integrar otros esquemas de radio acceso como WLAN a las redes 3GPP. También tendrá un rol importante en la era de 5G para proveer un buen funcionamiento conjunto entre LTE y la nueva tecnología de radio acceso de 5G.

3.3.5. TDD Dinámico

En TDD, la misma frecuencia de portadora es compartida en el dominio del tiempo entre uplink y downlink. El acercamiento fundamental a esto en LTE, así como en muchos otros sistemas TDD, es dividir estáticamente los recursos entre uplink y downlink. Tener una división estática es una presunción razonable en grandes macroceldas ya que hay muchos usuarios y la carga agregada por celda en uplink y downlink es relativamente estable. Sin embargo, al incrementarse el interés por los despliegues de área local, se espera que TDD se vuelva más importante comparado a la situación actual de despliegues de área amplia. Una razón es que se vuelven más comunes las porciones de espectro no apareado en bandas de frecuencia más altas que no son adecuadas para cobertura de grandes áreas. Otro motivo es que muchos de los problemas de interferencia en redes amplias TDD no están presentes en los despliegues *bajo-nivel-de-techos* de pequeños nodos. Una red de área grande FDD podría ser complementada por una capa de área local usando TDD, generalmente con baja potencia de salida por nodo.

Para manejar mejor las grandes variaciones de tráfico en un escenario de área local, donde el número de dispositivos transmitiendo o recibiendo de un nodo local puede ser muy pequeño, TDD se vuelve muy beneficioso. En TDD dinámico, la red puede usar los recursos de transmisiones uplink o downlink dinámicamente para adecuarse a la situación de tráfico instantánea, lo cual lleva a una mejora a la performance del usuario final, comparada a la división estática convencional de recursos entre uplink y downlink. Para explotar estos beneficios, LTE 12 incluye soporte para TDD dinámico, o *eIMTA* como nombre oficial para esta característica en 3GPP.

3.3.6. Interfuncionamiento con WLAN

La arquitectura 3GPP permite integrar a su red accesos que no sean 3GPP, por ejemplo, WLAN y también cdma2000. Estas soluciones conectan los accesos no pertenecientes a 3GPP a la *Evolved Packet Core* y por lo tanto no son visibles en la red de radio acceso LTE. Una desventaja de esta manera de interfuncionamiento con WLAN es la carencia de control de red; el dispositivo puede seleccionar Wi-Fi aun cuando quedarse en LTE proveería una mejor experiencia de uso. Un ejemplo de dicha situación es cuando la red Wi-Fi se encuentra saturada mientras que la red LTE disfruta de una carga ligera. La publicación 12 introdujo por esto, medios para que la red asista al dispositivo en el procedimiento de selección. Básicamente, la red configura un límite de intensidad de señal, controlando cuando el dispositivo debería seleccionar LTE o Wi-Fi.

La publicación 13 fue aún más allá con las mejoras en el área de interfuncionamiento WLAN con un control más explícito desde la RAN LTE sobre cuando un dispositivo debería usar Wi-Fi y cuándo LTE. Además, la publicación 13 también incluye agregación LTE-WLAN donde LTE y WLAN son agregados a nivel de *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) usando un sistema muy similar a la conectividad dual. Actualmente solo se soporta agregación en downlink.

3.4. Mejoras de Dispositivos

Fundamentalmente, un fabricante de dispositivos es libre de diseñar el receptor de un dispositivo de cualquier manera mientras que soporte los requerimientos mínimos definidos en las especificaciones. Hay un incentivo para los fabricantes de proveer receptores significativamente mejores ya que esto se podría traducir directamente en velocidades de datos mejores para el usuario final. No obstante, es posible que la red no pueda explotar dichas mejoras de receptor a su máxima capacidad ya que puede no saber cuáles dispositivos tienen una performance significativamente mayor. Por lo tanto, los despliegues de red necesitan basarse en los requerimientos mínimos. Definir requerimientos de performance para tipos de receptores más avanzados alivia esta situación hasta cierto punto ya que la performance mínima de un dispositivo equipado con un receptor avanzado es conocida. Las publicaciones 11 y 12 hicieron mucho hincapié en las mejoras de receptor; con cancelación de algunas señales en la 11 y esquemas más genéricos en la 12, incluyendo cancelación y supresión de interferencia asistida por la red (NAICS), donde la red puede proveer a los dispositivos información para dicha tarea.

3.5. Nuevos Escenarios

LTE fue diseñado originalmente como un sistema de banda ancha móvil, apuntando a proveer altas velocidades de datos y capacidad sobre áreas amplias. La evolución de LTE añadió características que mejoran la capacidad y velocidad, pero también otras que vuelven a LTE muy relevante para nuevos casos de uso, por ejemplo, *massive machine-type communication*. La operación en áreas sin cobertura de red, por ejemplo, en un área de desastre, es otro ejemplo, resultando en soporte para comunicación dispositivo-a-dispositivo incluida en las especificaciones de LTE publicación 12.

3.5.1. Comunicación Dispositivo-a-Dispositivo

Los sistemas celulares como LTE se diseñan asumiendo que los dispositivos se conectan a una estación base para comunicarse. En la mayoría de los casos este es un acercamiento eficiente ya que el servidor con el contenido de interés generalmente no se encuentra en las cercanías del dispositivo. Sin embargo, si el dispositivo está interesado en comunicarse con un dispositivo vecino, o simplemente quiere detectar dónde hay un dispositivo vecino de interés, la comunicación de red centralizada deja de ser eficiente. De manera similar, para seguridad pública, como un primer oficial que responda buscando gente afectada en una situación de desastre, hay un requerimiento de que las comunicaciones deberían poder llevarse a cabo también en ausencia de cobertura de red.

Para responder a estas situaciones, la publicación 12 introdujo la comunicación dispositivo-a-dispositivo asistida por la red usando partes del espectro de uplink. Dos escenarios se consideraron al momento de desarrollar las mejoras dispositivo-a-dispositivo: comunicaciones bajo cobertura y sin cobertura, y descubrimiento de dispositivos vecinos bajo cobertura para uso comercial.

En la publicación 13, la comunicación dispositivo-a-dispositivo se mejoró con soluciones de retransmisión para una cobertura extendida.

3.5.2. Comunicación Tipo Máquina

La comunicación tipo máquina es un término muy amplio, que cubre básicamente todos los tipos de comunicaciones entre máquinas. Aunque tiene un alcance que cubre diferentes y variadas aplicaciones, muchas de las cuales todavía no son conocidas, las aplicaciones MTC se pueden dividir en dos categorías principales. MTC masiva y MTC crítica.

Algunos ejemplos de MTC masiva son diferentes tipos de sensores y dispositivos similares. Estos dispositivos generalmente tienen que ser de muy bajo costo y consumir muy poca energía para tener una larga duración de batería. Al mismo tiempo, la cantidad de datos generados por cada dispositivo tiende a ser muy pequeña y no se necesita una baja latencia. Por otro lado, MTC crítica corresponde a aplicaciones como seguridad y control de tráfico vehicular o conectividad inalámbrica para procesos industriales, y en general donde se requiera un alto grado de confiabilidad y disponibilidad.

Para soportar de mejor manera MTC masiva, se han hecho muchas mejoras a partir de la publicación 12 y con la introducción de una nueva categoría de dispositivos de gama baja, la categoría 0, que soporta velocidades de hasta 1 Mbit/s. También se definió un modo de ahorro de energía que reduce drásticamente el consumo. La publicación 13 definió la categoría M1 con una mayor cobertura y soporte para un ancho de banda de dispositivo de 1.4 MHz, sin considerar el ancho de banda del sistema, para reducir aún más el costo del dispositivo. Desde la perspectiva de la red, estos dispositivos son como cualquier otro LTE, aunque con capacidades limitadas, y puede ser mezclado libremente con otros dispositivos LTE más capaces en una portadora.

La *Internet-of-Things de Banda Angosta* (NB-IoT) se encuentra paralela al desarrollo de LTE, que se completa en la publicación 13. Sus objetivos son costos y velocidades más bajos que la categoría M1, 250 kbit/s o menos, en un ancho de banda de 180 kHz, e inclusive más cobertura. Gracias al uso de OFDM con espaciado de subportadoras de 15 kHz, puede ser implementado dentro de la banda de una portadora LTE, fuera de banda en una porción separada de espectro, o en las bandas de guarda de LTE, proveyendo un alto nivel de flexibilidad para el operador. En uplink, se soporta transmisiones en un solo tono para obtener cobertura muy amplia para velocidades más bajas. NB-IoT usa la misma familia de protocolos de capa alta (MAC, RLC, PDCP) que LTE, con extensiones para configuración más rápida de las conexiones, aplicables a ambos NB-IoT y a la categoría M1. Por lo tanto, puede ser integrado fácilmente a los despliegues existentes.

3.6. Evolución de la Tecnología LTE

A modo de resumen, se presentan las características principales de cada evolución de LTE:

Publicación		Características
LTE	R-8	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte de FDD y TDD • Espectro de frecuencia escalable en 6 anchos de banda: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz • OFDM • Multiplexación espacial de hasta cuatro capas con <i>Single-User</i> MIMO • 300 Mbps en DL y 75 Mbps en UL • Latencia del plano de usuario de menos de 20 ms
	R-9	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionalidad <i>Multicast</i> y <i>Broadcast</i>
LTE-A	R-10	<ul style="list-style-type: none"> • Agregación de portadoras para alcanzar un ancho de banda de 100 MHz • Multiplexación espacial de hasta 8 capas con SU-MIMO • Mejoras <i>Multi-user MIMO</i> • Señales de referencia extendidas y más flexibles • Funcionalidad de <i>relaying</i> • Velocidades pico de más de 1 Gbps en DL y 500 Mbps en UL • Latencia del plano de usuario de menos de 10 ms
	R-11	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisión y recepción coordinada multipunto (CoMP) • Mejoras en el soporte para redes heterogéneas (HetNet)
LTE-A Pro	R-12	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoras de área local (soft cell) • Mejoras en <i>Beamforming</i> • Comunicaciones tipo máquinas extendidas (MTC) • <i>3D-MIMO</i> • CoMP mejorada • <i>Self-Organizing Networks</i> Mejoradas (eSON)
	R-13	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoras en RAN compartida.

Tabla 3-1 Características de las Publicaciones de LTE.

4. Pilares de 5G

Se identifican 10 pilares claves para 5G, ilustradas en la siguiente figura:

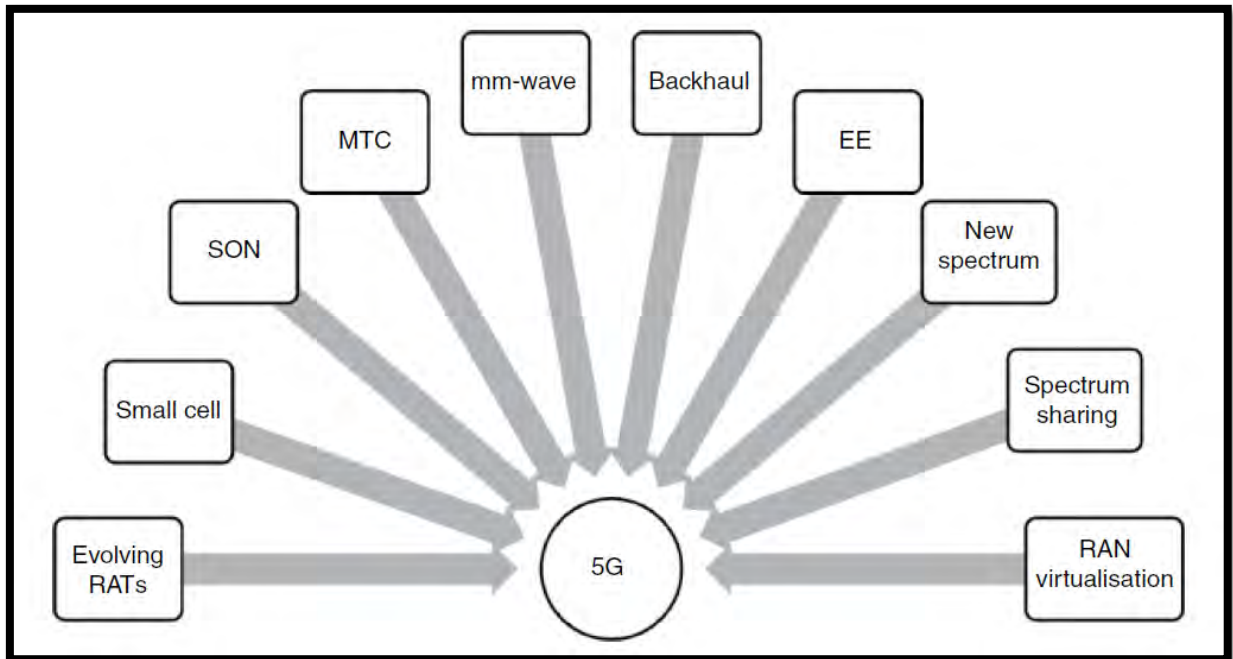


Imagen 4-1 Pilares de 5G (Rodríguez, 2015)

A continuación, se desarrollan cada uno de ellos y se señala su rol e importancia para alcanzar 5G. Se aclara que la información contenida en este capítulo fue recogida y sintetizada del libro *Fundamentals of 5G Mobile Networks (2015)* de Jonathan Rodríguez.

4.1.1. Evolución de las RATs existentes

5G tiende más a ser una colección de RATs, incluyendo la evolución de las existentes complementadas con diseños revolucionarios. De esta manera, la primera solución y la más económica para lograr el objetivo de una capacidad mil veces mayor, es la mejora de las RAT existentes en términos de eficiencia espectral (SE), eficiencia energética (EE) y latencia, así como el soporte de uso compartido flexible de la RAN entre distintos *vendors*. Específicamente, LTE necesita evolucionar para soportar *massive 3D MIMO* y explotar el grado de libertad espacial a través de *beamforming* multiusuario avanzado, mejorando más las capacidades de cancelación y coordinación de interferencia en un despliegue *hiperdenso* de *Small-cells*.

WiFi también necesita evolucionar para aprovechar el espectro no licenciado disponible. La última versión de WiFi utiliza un ancho de banda de hasta 160 MHz en la banda de 5 GHz, empleando hasta modulación 256 QAM, alcanzando así velocidades de varios Gbps. También soporta transmisiones simultáneas utilizando técnicas de *Multiuser MIMO*. La técnica de *beamforming* incorporada aumentó la cobertura en varios órdenes de magnitud en comparación a su predecesor.

Algunas compañías de telecomunicaciones estuvieron trabajando en el desarrollo de LTE en espectro no licenciado, así como también integrando los transceptores de 3G/4G/WiFi

en una única estación base multi-modo. En este contexto, se prevé que los UE futuros serán lo suficientemente inteligentes como para seleccionar la mejor interfaz para conectarse a la RAN basados en los requerimientos de QoS de la aplicación que corra en dicho momento.

4.1.2. Despliegue Hiperdenso de Small-Cells

El despliegue hiperdenso de *Small-Cells* es otra solución prometedora para alcanzar la meta de una capacidad 1000 veces mayor. Es a veces referido como *HetNet* y puede ayudar a mejorar significativamente la eficiencia espectral del área. En general, existen dos maneras de aplicar *HetNet*:

- Superponiendo un sistema celular con *small cells* de la misma tecnología, o sea, con micro-, pico-, o femtoceldas;
- Superponiendo con *small cells* de diferentes tecnologías.

La primera es llamada *HetNet Multi-tier*, y la segunda *HetNet Multi-RAT*.

Se ha comprobado que la adición de *small cells* puede aumentar la capacidad en una escala casi lineal como se ve en la imagen. Sin embargo, reducir el tamaño de la celda implica aumentar la interferencia inter-celda y la señalización de control requerida. Para superar esto se requieren técnicas de gestión de interferencia inter-celda al nivel del sistema junto con técnicas de cancelación de interferencia del lado del UE. El aprovechamiento de las *small cells* fue el punto focal de LTE R-12, donde el *New Carrier Type (NCT)*, o nuevo tipo de portadora fue presentada para asistir a estas celdas por la macro-celda. Esto permite un plano de control más eficiente (por ejemplo, para gestión de la movilidad, sincronización, asignación de recursos, etc.) a través de la macro-capa, al mismo tiempo otorgando un plano de datos de alta capacidad, espectralmente eficiente a través de las *celdas pequeñas*.

4.1.3. Self-Organizing Network (SON)

La capacidad de redes autoorganizadas es otro componente clave de 5G. Al aumentar la población de *small cells*, SON se vuelve muy importante. Casi el 80% del tráfico inalámbrico se genera en interiores. Para portar este tráfico enorme, necesitamos despliegues hiperdensos en los hogares, instalados y mantenidos por los usuarios, fuera del control de los operadores. Estas pequeñas celdas deben ser autoconfigurables e instalables de una manera *plug and play*. Además, deben poseer capacidades SON para adaptarse inteligentemente a sí mismas a las *small cells* vecinas y así minimizar la interferencia.

4.1.4. Comunicación Tipo Máquina

Ya hemos discutido esta tecnología dentro de LTE, pero se la nombra porque forma parte de los pilares de 5G también.

4.1.5. Desarrollo de RATs Millimeter-Wave

El espectro tradicional de menos de 3 GHz se ha congestionado cada vez más y las tecnologías de acceso de radio actuales se aproximan al límite de capacidad de Shannon. Por este motivo se están desarrollando las bandas de ondas en longitudes de cm y mm.

La principal ventaja de estas tecnologías es que existe una enorme cantidad de espectro disponible en el orden de ondas milimétricas. Por ejemplo, en los 60 GHz existen 9 GHz de espectro no licenciado disponible, que en comparación a los 780 MHz que ocupan las tecnologías celulares actuales, es gigante. Otras ventajas incluyen los pequeños tamaños de antena, que permiten empaquetar decenas de elementos de antena en un centímetro cuadrado. Esto permite alcanzar ganancias bastante altas de *beamforming* en áreas relativamente pequeñas, y se puede implementar tanto en la estación base como en el UE.

4.1.6. Rediseño de los Enlaces de Backhaul

En paralelo al desarrollo de la RAN, los enlaces de *backhaul* también necesitan ser rediseñados para transportar la tremenda cantidad de tráfico de usuario generado en las celdas. De otra manera, los enlaces pronto se convertirán en cuellos de botella, amenazando la correcta operación de todo el sistema. El problema se vuelve más evidente con el incremento de población de celdas pequeñas. Se pueden considerar diferentes medios de comunicación, incluyendo fibra óptica, microondas y *mmWave*. En particular, los enlaces punto a punto de *mmWave* explotan los *arrays* de antena con haces muy precisos, lo que las convierte en un buen candidato para no interferir con otras celdas.

4.1.7. Eficiencia Energética

Las TIC consumen hoy el 5% de la electricidad producida a nivel global y es responsable del 2% de las emisiones de gas. Para el año 2020 se prevé que este número aumente al doble, por lo tanto, es indispensable buscar diseños de RAN, *backhaul* y UE que sean eficientes energéticamente.

4.1.8. Asignación de Nuevo Espectro para 5G

Para cubrir la demanda prevista, grandes empresas de telecomunicaciones consideran que se necesitará 10 veces más espectro del actual. Aparte del espectro discutido en las comunicaciones *mmWave*, se espera aumentar 100 MHz en la banda de 700 MHz y otros 400 alrededor de los 3.6 GHz.

4.1.9. Espectro Compartido

Qualcomm propuso un modelo (*Authorised/Licensed Shared Access*) que permite explotar el espectro licenciado en celdas pequeñas, de forma que no interfiera con los usuarios predefinidos (por ejemplo, radares militares). Este tipo de modelo de asignación de espectro puede compensar el lento proceso de limpieza del recurso.

4.1.10. Virtualización de la RAN

El último pilar de 5G es la virtualización de la RAN, que permitirá que la infraestructura inalámbrica sea compartida entre varios operadores. Esto debe implementarse desde la red Core hacia la RAN. Para que sea posible, la inteligencia debe moverse del hardware de la RAN y controlarse de una manera centralizada usando un software principal, lo cual puede realizarse en diferentes capas de red. Entre las mejoras que traería se incluyen ahorros en Capex y Opex,



eficiencia energética, escalamiento *on-demand* de los recursos requeridos, así como fácil mantenimiento y rápida resolución de problemas a través de una mayor transparencia de la red.

Finalmente, el soporte multi-modo RAN hará que las tecnologías 3G, 4G o WiFi puedan ser encendidas o apagadas a través del software de unidad central de control para mejorar la calidad de la experiencia (QoE) para los usuarios finales. (Rodríguez, 2015)

5. Diseño

5.1. Metodología

5.1.1. El Proceso de Planeación

El proceso de planeamiento de una red de radio está diseñado para maximizar la cobertura de la red, y al mismo tiempo proveer la capacidad deseada. Para lograr esto, hay un número de etapas que generalmente se realizan, éstas incluyen:

- Planeamiento Inicial.
- Planificación Detallada.
- Optimización.

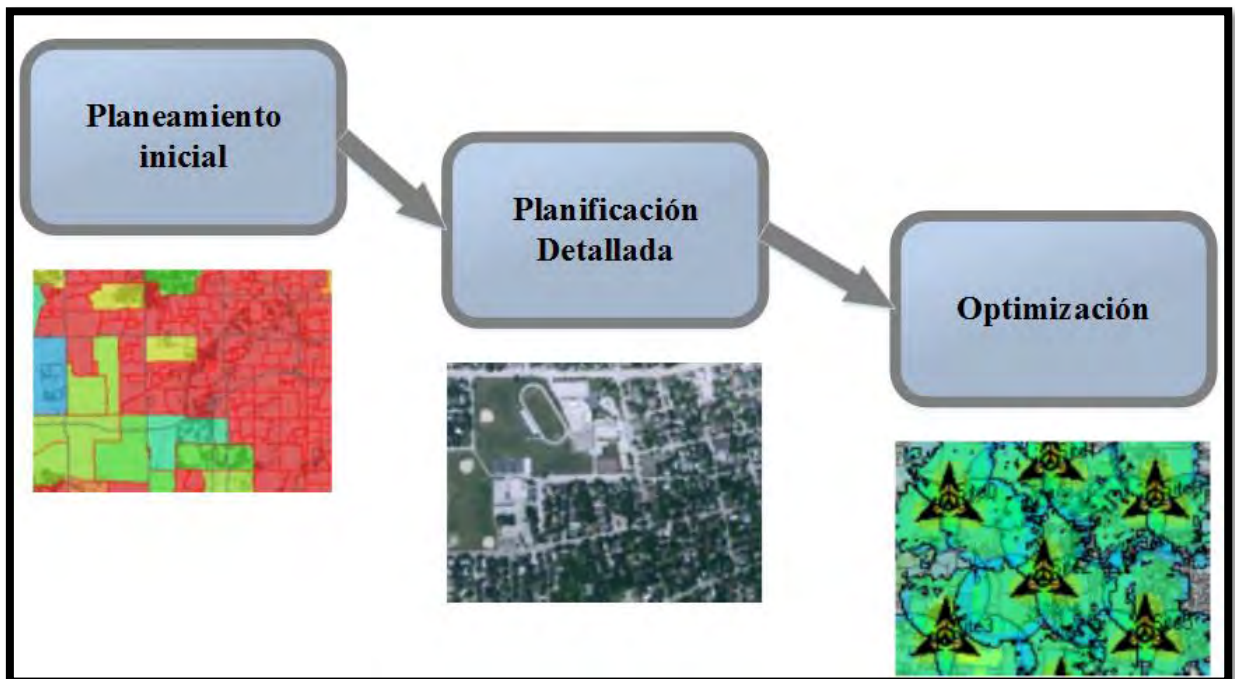


Imagen 5-1 El Proceso de Planeación (3GPP, 2013)

5.2. Planeamiento Inicial

La primera etapa del proceso de planeamiento inicial requiere la recolección de información; las características de la red a ser desplegada, la cobertura deseada, el QoS (*Quality of Service*), objetivos de capacidad y el rango de servicios a ser provistos, etc. La meta es evaluar la densidad mínima de sitios que se requerirían para cumplir estos objetivos, teniendo en cuenta que este texto apunta a una red con una alta cantidad de sitios a baja altura. También se le denomina a esta etapa inicial “Dimensionamiento” (3GPP, 2013).

Se definirá el alcance del diseño de una red LTE y sus posteriores mejoras, siguiendo una línea de planificación que permita llegar a 5G. Esto se realizará de forma que no exista necesidad de deshacer las redes creadas previamente, asegurando una coexistencia que haya aprovechado eficientemente los recursos desde un principio.

5.2.1. Elección del Software

Se consideraron 4 softwares para el diseño de la red, todos con características muy similares, siendo ellos Atoll, Asset, NetAct y RadioSoft.

Entre las características que comparten se encuentra el soporte para distintas redes, diferenciándose por ejemplo en la inclusión de redes de televisión analógicas y digitales en RadioSoft, o el de virtualización de los cálculos en el caso de NetAct a través un servicio de Cloud.

Para servirse de opiniones profesionales, se recurrió a los resultados de una encuesta online (Akram) realizada a profesionales de telecomunicaciones como se puede apreciar en la siguiente imagen.

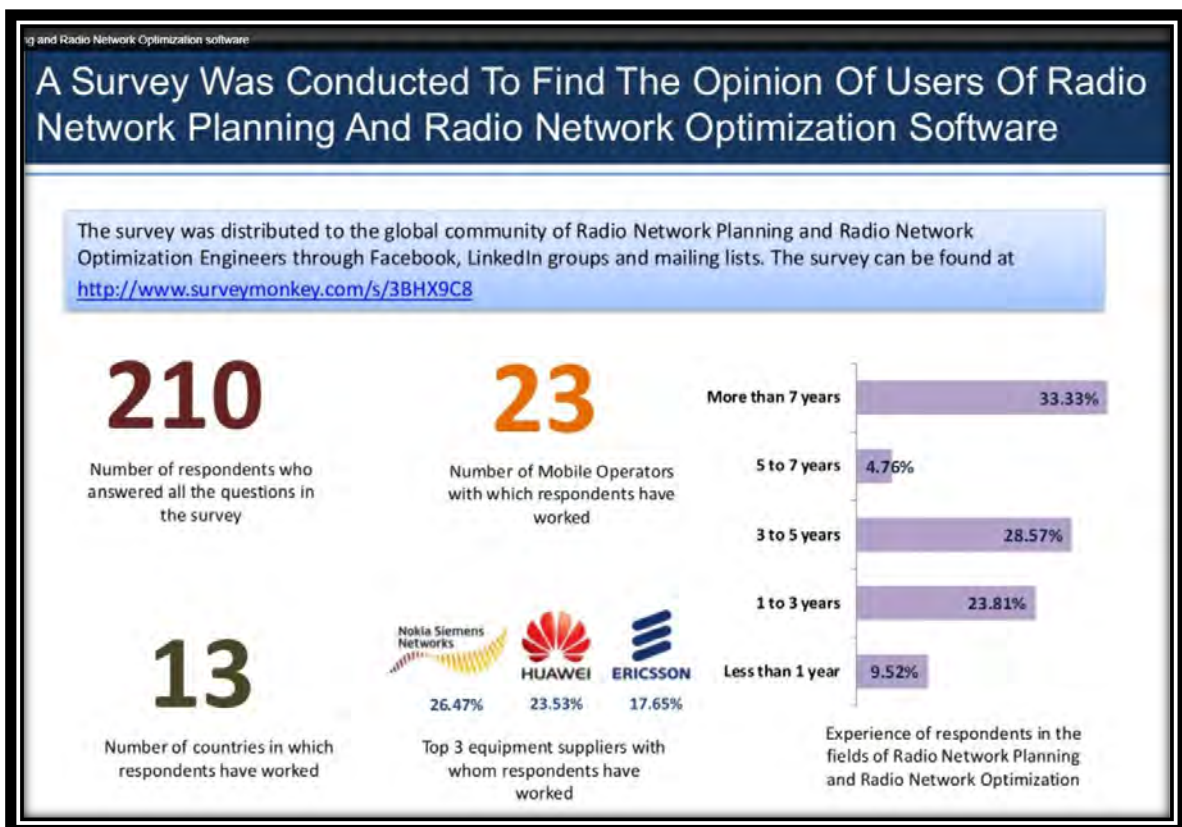


Imagen 5-2 Encuesta de Elección del Software (Akram)

Los resultados de la preferencia de dichos profesionales se presentan a continuación:

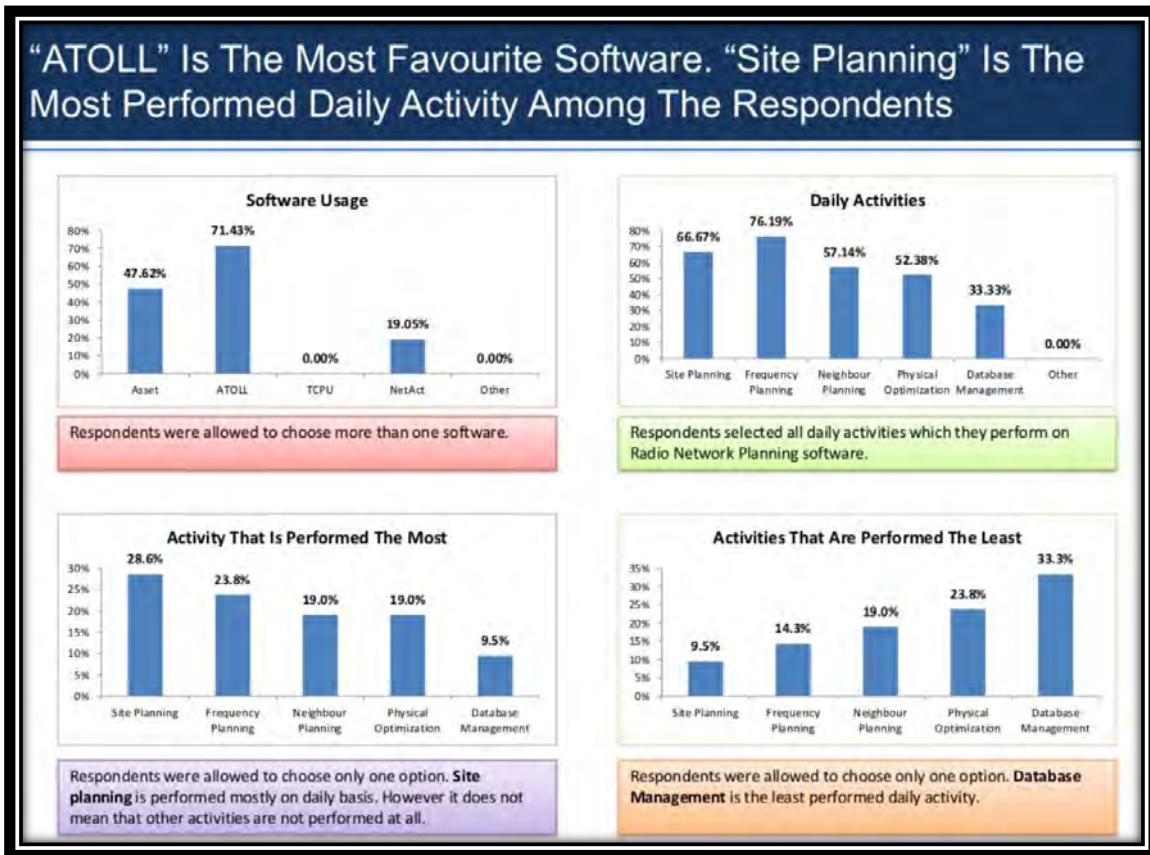


Imagen 5-3 Resultados de Preferencia de Encuestas (Akram)

Como se aprecia, el software preferido es Atoll de la empresa Forsk, seguido de Asset, destacando en el documento la facilidad de la planificación de frecuencias como su fuerte.

Luego de una investigación para conseguir algún software, sólo fue posible adquirir la herramienta de Forsk, cuya licencia académica fue utilizada en varios proyectos similares al presente en universidades de España y Colombia.

Por lo expuesto nuestra elección obligada fue Forsk Atoll, cuyas prestaciones alcanzan hasta LTE Advanced. Cabe destacar que no se considerarán emisiones de otras redes como GSM, UMTS o Wifi, ya que ello requeriría un diseño extra de dichas tecnologías.

5.2.2. Consideraciones Geográficas

Se trabajará sobre la ciudad de Salta, cubriendo específicamente la zona comprendida entre barrio Grand Bourg al Oeste, el río Arenales al Sur, las Avenidas Tavella, Hipólito Irigoyen y Del Bicentenario al Este, llegando hasta Barrio Miguel Ortíz al norte, luego cerrando la zona con Avenida Arenales.

Se tomará en cuenta el terreno, siendo posible disponer de este dato en forma de Digital Terrain Model, el cual se solapará con un mapa de calles de la ciudad. También se utilizará un mapa de zonas provisto por la municipalidad de la ciudad de Salta para indicar cuáles serían los

sitios que tendrían inconvenientes legales para ser desplegados, así como usar su referencia de densidad poblacional para definir las simulaciones de Monte Carlo en el programa.

A medida que se avance en las tecnologías utilizadas, se hará más pequeña también la zona de estudio, ya que las coberturas de las celdas serán más pequeñas y, por lo tanto, requerirán una mayor cantidad de sitios dentro de espacios más reducidos. Estos resultados serían extrapolables al resto de la red.

Para el despliegue inicial no se tendrán en cuenta densidades poblacionales ni restricciones legales o físicas. Por este motivo la red se distribuirá de forma casi ideal, con sitios equidistantes entre sí, y se analizarán los resultados obtenidos sobre el terreno para ajustar dicho parámetro. Las potencias máximas de las antenas serán tomadas de las normas dispuestas por la ENACOM actualmente.

Como última condición se requerirá que los resultados de las predicciones de la red aseguren una cobertura con niveles buenos (más de -90dBm), considerando ruido e interferencia, al 95% del terreno. Además, se buscará que sea posible otorgar modulaciones QAM a más del 85% del total.

5.3. Dimensionamiento

El dimensionamiento es una parte de la fase inicial del planeamiento. Su intención es proveer una rápida estimación del número de sitios requeridos en varios ambientes. Generalmente involucra un plan de red nominal o una simulación simplificada para conseguir los estimados de capacidad y cobertura, y que sea acorde al modelo de negocio.

Un modelo de negocio LTE generalmente incluye cumplir con los requerimientos de cobertura para clientes mientras se soporta servicios planificados y límites de capacidad de red, así como identificar los costos CAPEX y OPEX. Además, el sistema debe diseñarse para cumplir los requerimientos legales. (3GPP, 2013)

Basado en esta información y las opciones de configuración de red, el planificador de radio puede desarrollar un presupuesto de enlace para los diferentes tipos geográficos. Este identifica el tamaño máximo de celda y área potencial de cobertura del sitio. Luego se compara con los cálculos de capacidad y entonces se ajustan para ser alcanzados.

El Software de Forsk, Atoll, nos permite trabajar sobre un mapa, realizando predicciones basadas en los modelos nombrados anteriormente, sobre una red diseñada en el mismo programa. Entre las variadas opciones que ofrece, vamos a utilizar las simulaciones de LTE, colocando sitios de antenas sobre un terreno predefinido.

Como se explicó anteriormente, la zona a estudiar y computar será la siguiente:

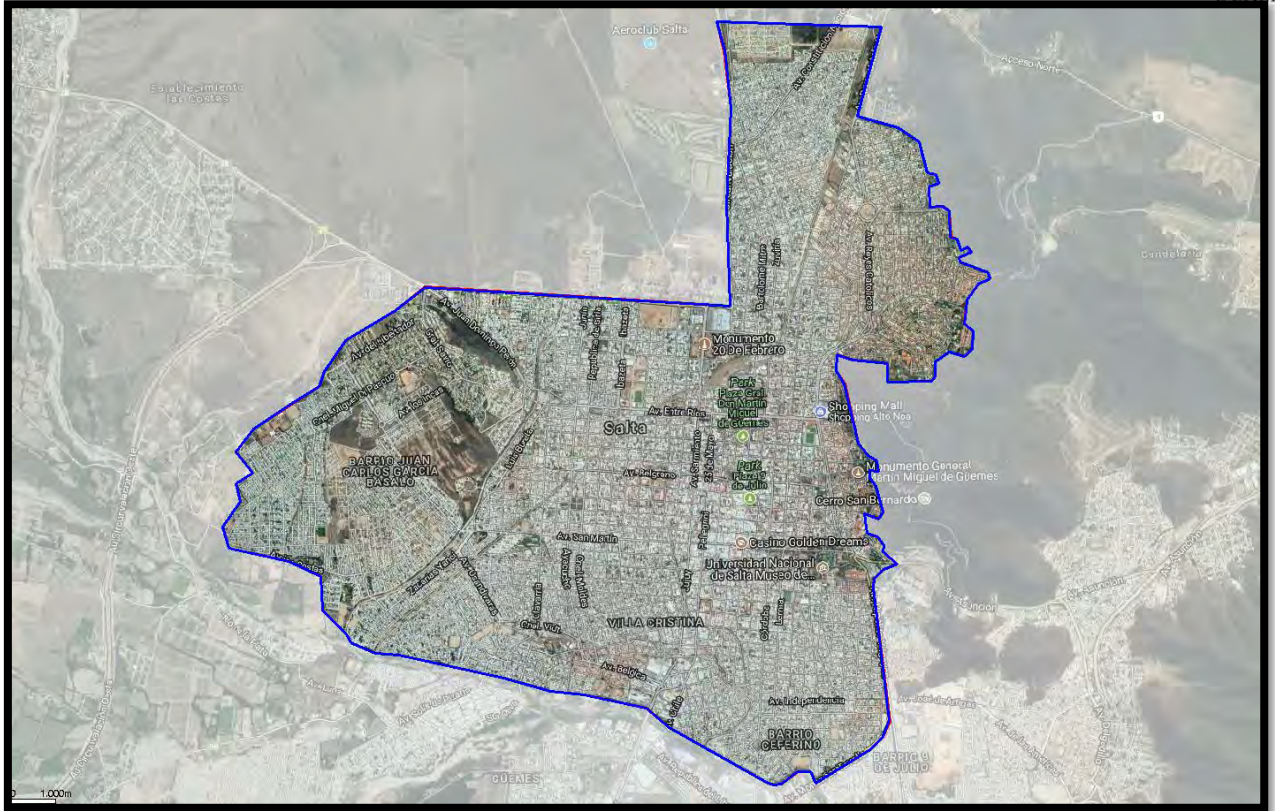


Imagen 5-4 Zona de Estudio

5.3.1. Datos Topográficos

Un DEM (*Digital Elevation Model*), a veces llamado DSM (*Digital Surface Model*), se refiere a una representación de la superficie de la tierra, que en la mayoría de los casos incluye características como la vegetación, edificios, puentes, etc. Un DEM puede adquirirse a través de técnicas como fotogrametría o agrimensura, etc.

Por otro lado, un DTM (*Digital Terrain Model*) generalmente es una versión filtrada de esta superficie, y por lo tanto puede ser una versión post procesada de lo que era originalmente un DEM. El DTM provee un llamado modelo de tierra desnuda, desprovisto de características de paisaje. Mientras que un DEM puede ser útil para un modelado detallado, de ciudad y visualización, un DTM a menudo es mucho más barato y por lo tanto utilizado en zonas más rurales y menos densas (3GPP, 2013). Éste será el modelo de mapa que usaremos para nuestro propósito.

Para conseguirlo utilizaremos los recursos del Earth Explorer (USGS) y el software Global Mapper para su conversión a un formato adecuado para Atoll.

En primera instancia se descarga el mapa, indicando la zona en Earth Explorer como se ve en la siguiente imagen:

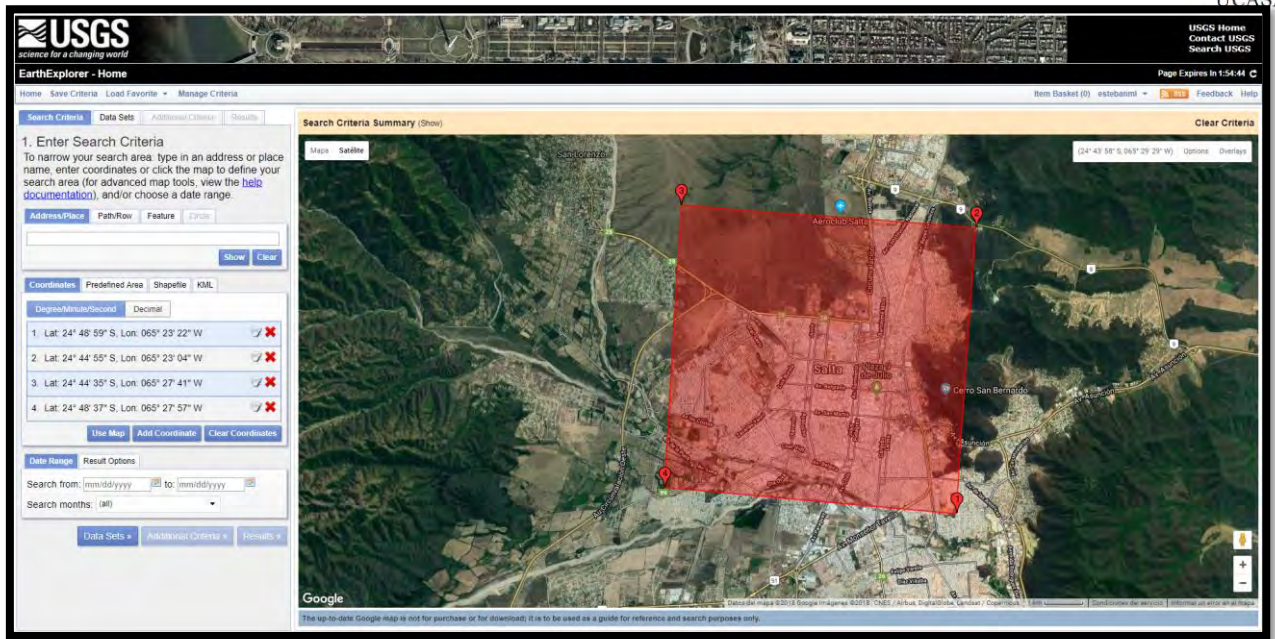


Imagen 5-5 Mapa de Earth Explorer (USGS)

A continuación, se selecciona el tipo de archivo a descargar:

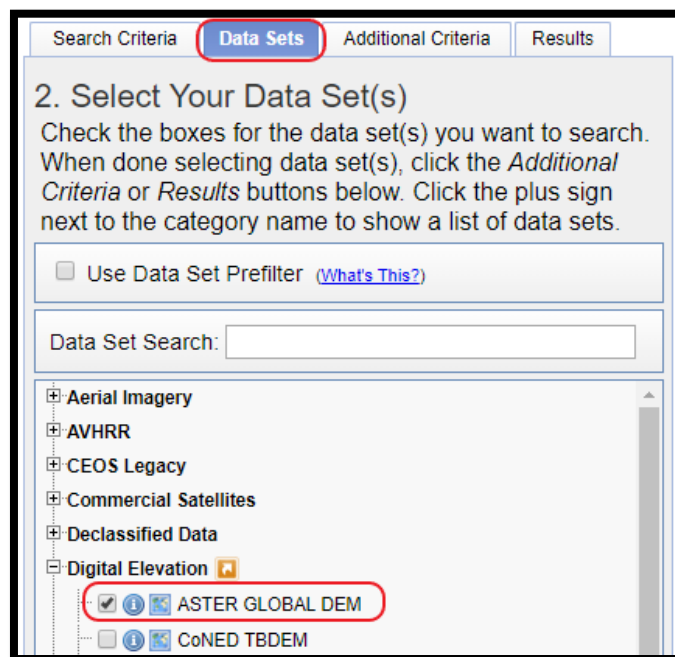


Imagen 5-6 Selección de DEM (USGS)

Aquí se puede ver que la información obtenida corresponde en realidad a un espacio mucho mayor que el delimitado en un principio (en rojo). Este mapa será el que importaremos con Global Mapper para su posterior conversión.

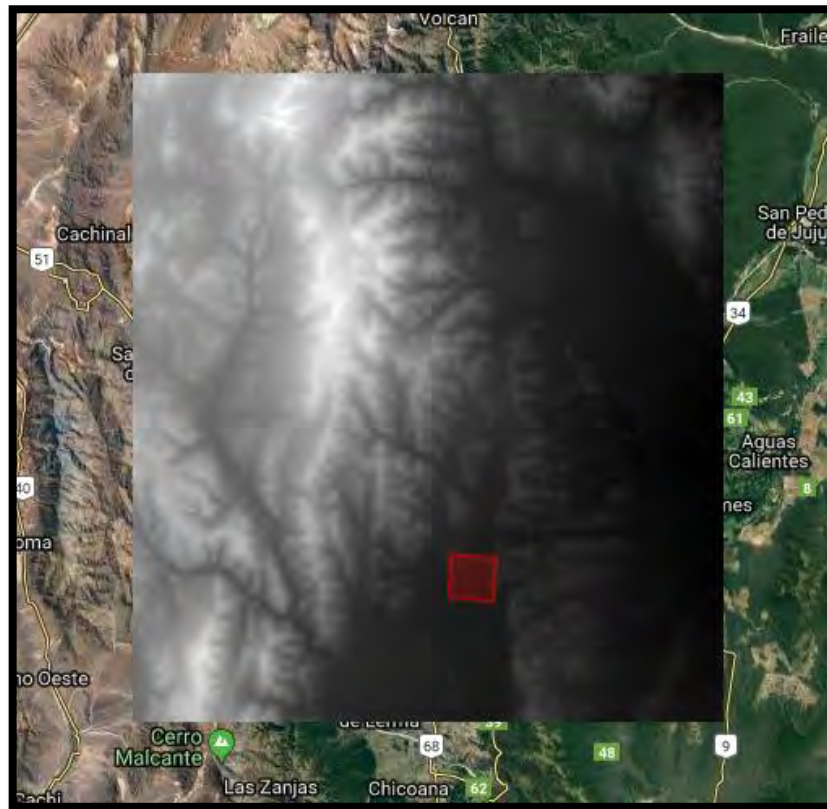


Imagen 5-7 Aster DEM Salta (USGS)

Luego del procesamiento como un mapa de alturas, el resultado es el siguiente:

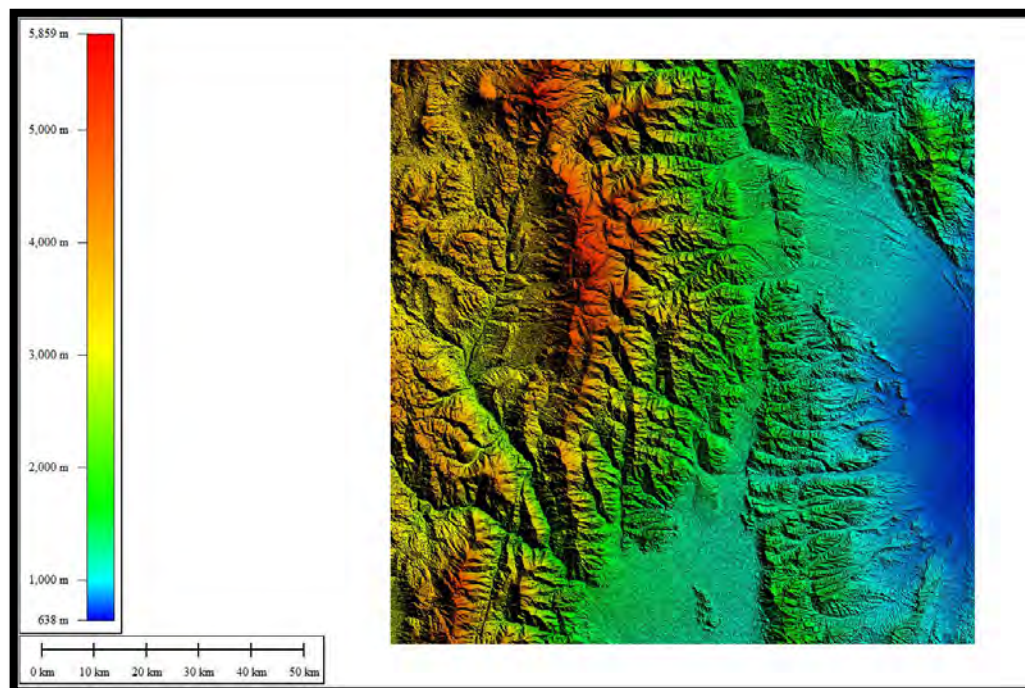


Imagen 5-8 Mapa de Alturas Salta – DTM

5.4. Estado Actual

5.4.1. Distribución de Sitios Reales de una empresa

Para tener un punto de referencia, se accedió al programa en el que se muestran los sitios actuales de la Empresa Telecom, Ingenier@. Al seleccionar la zona se puede ver que en la misma existen 40 sitios. Este número nos da una idea de una red factible desde un punto de vista económico y de densidad poblacional. Se aclara que no se define un objetivo en torno a esta información, ya que en la misma conviven diferentes tipos de celdas según la disponibilidad de sitios y tipos de clutter.

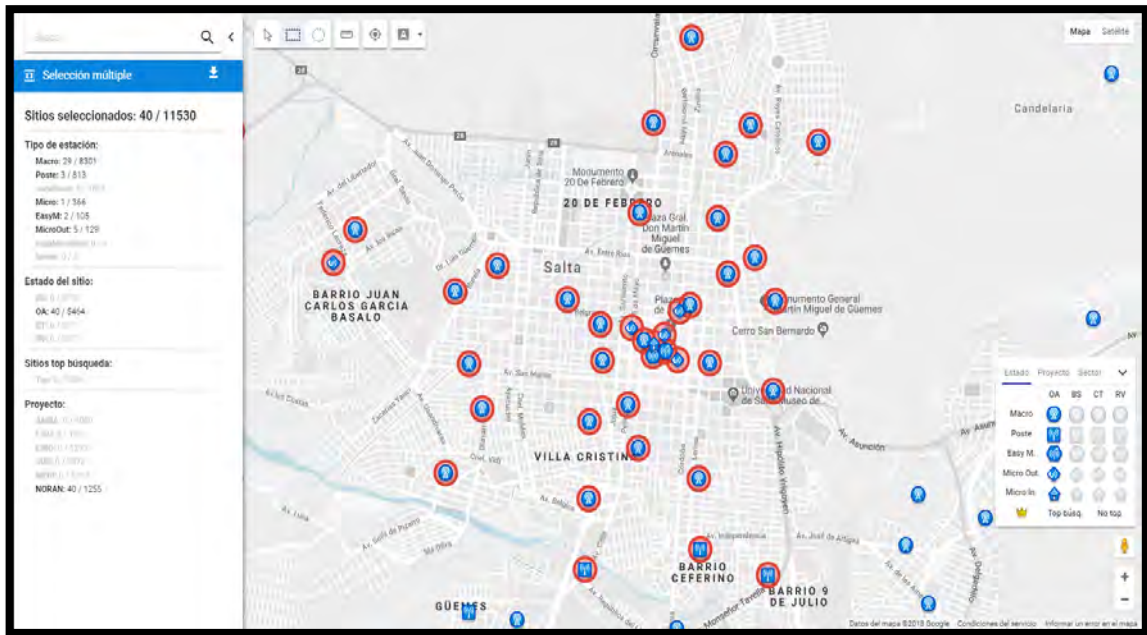


Imagen 5-9 Distribución de Sitios Telecom

5.5. Creación de Plantilla LTE en Atoll

En Atoll es necesario crear un proyecto nuevo bajo la plantilla LTE, al hacerlo se configuran nuevamente los datos geográficos. Como se ve en la siguiente imagen, la zona UTM del sistema WGS84 para Salta, corresponde a la 20S. Por último, se importan los mapas consolidados anteriormente.

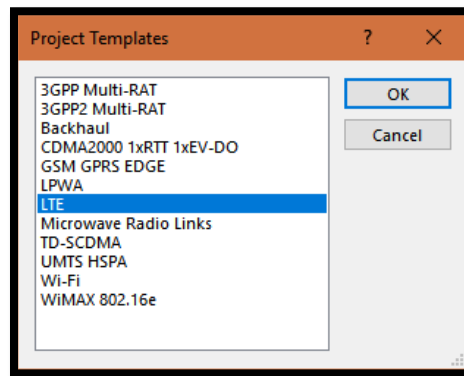


Imagen 5-10 Plantillas Atoll

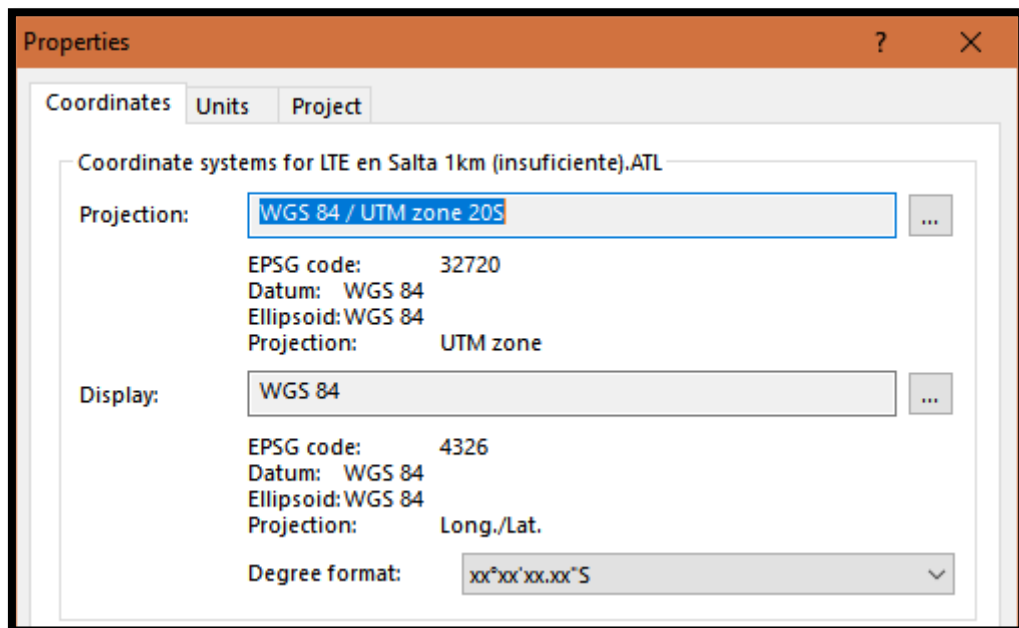


Imagen 5-11 Propiedades del Proyecto

Además, es posible agregar fuentes de mapas que luego se pueden ver como capas en el proyecto. Esto sirve principalmente para poder ver imágenes satelitales de la zona, o su diagrama de calles.

5.5.1. Zona de Computación

Luego de esta carga es necesario delimitar la zona de computación. Ésta será la zona donde se realizarán los cálculos de las predicciones y además nos servirá para ubicar sitios solamente en puntos de interés. Como se indicó anteriormente, esta es la zona comprendida entre barrio Grand Bourg al Oeste, el río Arenales al Sur, las Avenidas Tavella, Hipólito Irigoyen y Del Bicentenario al Este, llegando hasta Barrio Miguel Ortíz al norte, luego cerrando la zona con Avenida Arenales. La delimitación se hace manualmente. A continuación, se ven los distintos mapas disponibles, así como la zona de interés.

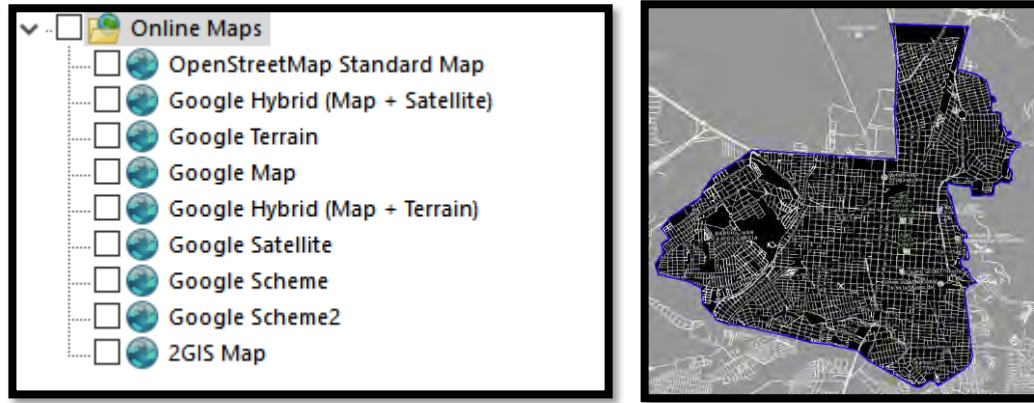


Imagen 5-12 Mapas Online Disponibles

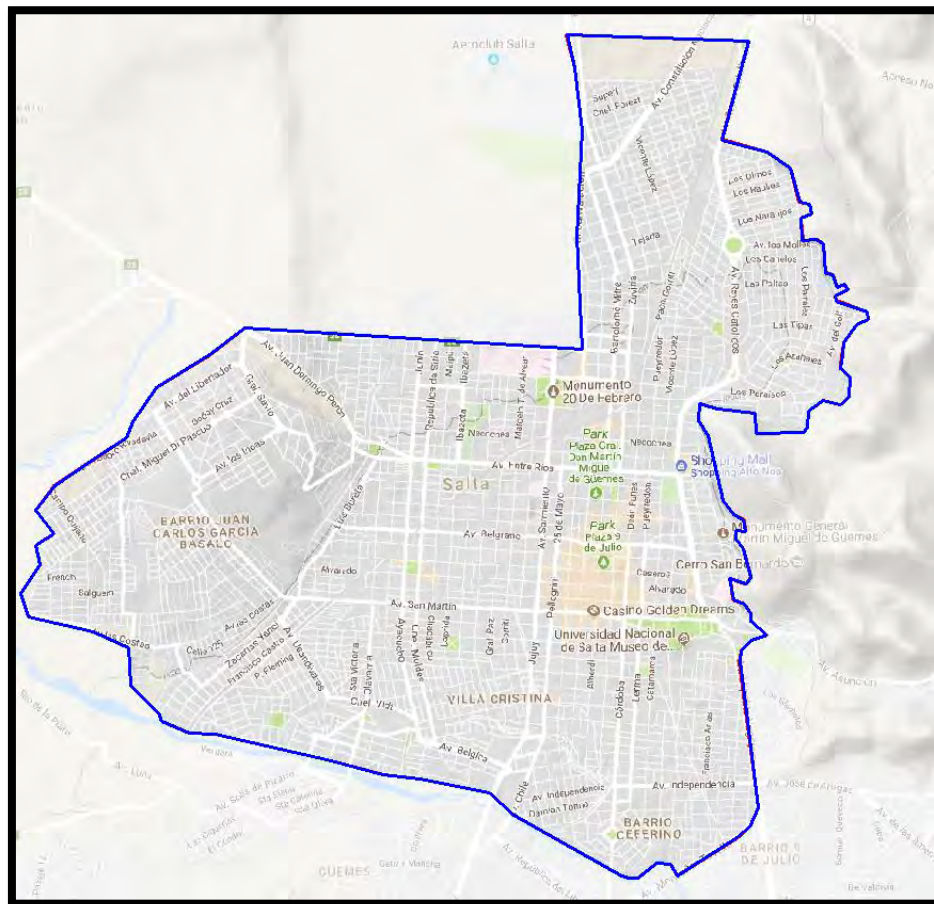
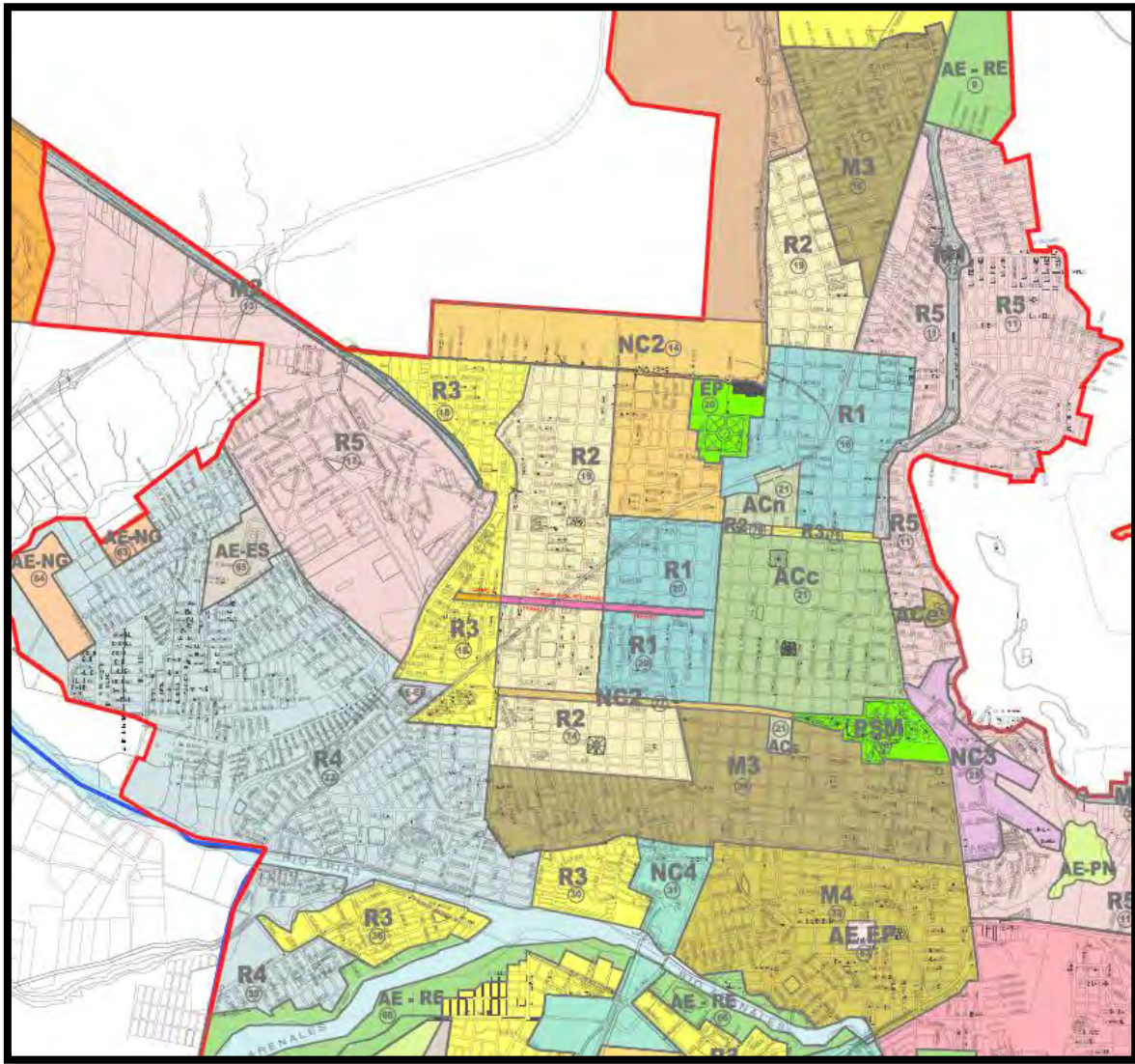


Imagen 5-13 Zona de Interés

5.5.2. Densidad Poblacional

Los datos de densidad poblacional conseguidos provienen de la municipalidad de Salta. Cabe aclarar que tal información será usada parcialmente para definir zonas de densidad con distintos perfiles de usuario, por lo tanto, las estimaciones resultantes pueden variar con respecto a la situación real.

A continuación, podemos ver como en el documento de Zonificación de Uso de Suelos (Municipalidad de la Ciudad de Salta, 2018) se categorizan las áreas en las que estamos interesados:



REFERENCIAS	
	R1 (Residencial Alta Densidad)
	R2 (Residencial Media Alta Densidad)
	R3 (Residencial Media Densidad)
	R4 (Residencial Media Baja Densidad)
	R5 (Residencial Baja Densidad)
	R6 (Residencial Muy Baja Densidad - Fuera del Perimetro Urbano Consolidado)
	M1 (Mixto Residencial, Comercial, Servicios)
	M2 (Comercial, Residencial, Recreativo, Turístico)
	M3 (Mixto Residencial, Comercial, Servicios)
	M4 (Mixto Comercial, Servicios, Residencial)
	M5 (Mixto Comercial, Servicios, Industrial de pequeña escala)
	M6 (Mixto Comercial, Industrial, Servicios, Residencial)
	AC1 (Distrito de alto interes patrimonial)
	AC2 (Distrito de alto interes patrimonial)
	AC3 (Distrito de alto interes patrimonial)

	AC4 (Distrito de alto interes patrimonial)
	AE-EP (Área Especial - Entorno Patrimonial)
	PI (Parque Industrial)
	NC 1 (Nodo de Centralidad: Institucional, Deportivo, Recreativo)
	NC 2 (Nodo de Centralidad Múltiple)
	NC 3 (Nodo de Centralidad: Comercial, Institucional, Servicios, Sanitario)
	NC 4 (Nodo de Centralidad Múltiple)
	AE-ES (Área Especial Interés Institucional - Equipamiento Estatal)
	AE-NG (Área Especial Interés Institucional - Equipamiento No Gubernamental)
	AE-PN (Área Especial Interés Ambiental - Parque Natural)
	AE-RE (Área Especial Interés Urbanístico - Revitalización o Renovación)
	AGR (Área de Explotación Agrícola, Agropecuaria o Agroindustrial)
	AE-RN (Área Especial - Reserva Natural)
	LÍMITE DEPARTAMENTO
	EJIDO MUNICIPAL
	PERIMETRO URBANO CONSOLIDADO PROPUESTO
	LÍMITE PARA R6 ZONA SERRANÍAS DEL ESTE
	LÍMITE DE DISTRITOS SEGUN CPUA - ANEXO 9.4

Imagen 5-14 Zonificación de Uso de Suelos (Municipalidad de la Ciudad de Salta, 2018)

Se aprecia que se eligieron principalmente las zonas con mayor densidad de la ciudad, lo que sirve para el diseño de una red actual, cuyas innovaciones se encuentran mayormente en los despliegues con alta concentración de sitios.

En la siguiente imagen vemos la correspondencia de habitantes por km² con las categorías de zonificación.

DENSIDADES INDICATIVAS		ANEXO 3.1.	
COD.	DISTRITO DE ZONIFICACIÓN	DENSIDAD NETA	
R1	Residencial Muy Alta Densidad.	Hasta 1.900	(*1)
R2	Residencial Alta Densidad.	Hasta 1.600	(*1)
R3	Residencial Media Densidad.	Hasta 1.000	(*2)
R4	Residencial Media-Baja Densidad	Hasta 600	(*3)
R5	Residencial Baja Densidad	Hasta 250	(*4)
R6	Barrios Cerrados o Countries-Residencial Muy Baja Densidad.	Hasta 200	(*5)
AC1	Área Centro con predominancia de inmuebles a preservar (Mixto: Residencial Media-Baja Densidad - Institucional - Comercial - Servicios).	Hasta 600	(*1)
AC2	Área Centro con tejido urbano de valor histórico (Mixto: Residencial Media Densidad - Institucional - Comercial - Servicios).	Hasta 1.000	(*1)
AC3	Área Centro (Mixto: Residencial Media-Alta Densidad - Institucional - Comercial - Servicios).	Hasta 1.200	(*1)
AC4	Área Centro (Residencial de Baja Densidad que por su conformación urbana tiene una calidad ambiental que debe ser preservada. Puede complementarse con servicios profesionales anexos a viviendas.	Hasta 250	(*4)
M1	Mixto (Residencial - Comercial). Media Densidad.	Hasta 1.000	(*2)
M2	Mixto (Residencial - Comercial-Recreativo-Turístico). Media-Baja Densidad.	Hasta 600	(*3)
M3	Mixto (Residencial - Comercial - Servicios). Media-Alta Densidad.	Hasta 1.200	(*1)

Imagen 5-15 Densidades Poblacionales por Zonas (Secretaría de Planeamiento Urbano, 2015)

5.5.3. Ambientes y Perfiles de Tráfico

Una vez que se haya creado el proyecto en Atoll, se configurarán con estos datos los ambientes para cálculo de tráfico. Se selecciona de la pestaña *Traffic Parameters* la carpeta *Environments* y al hacer click secundario se elige la opción *New* de la siguiente manera:

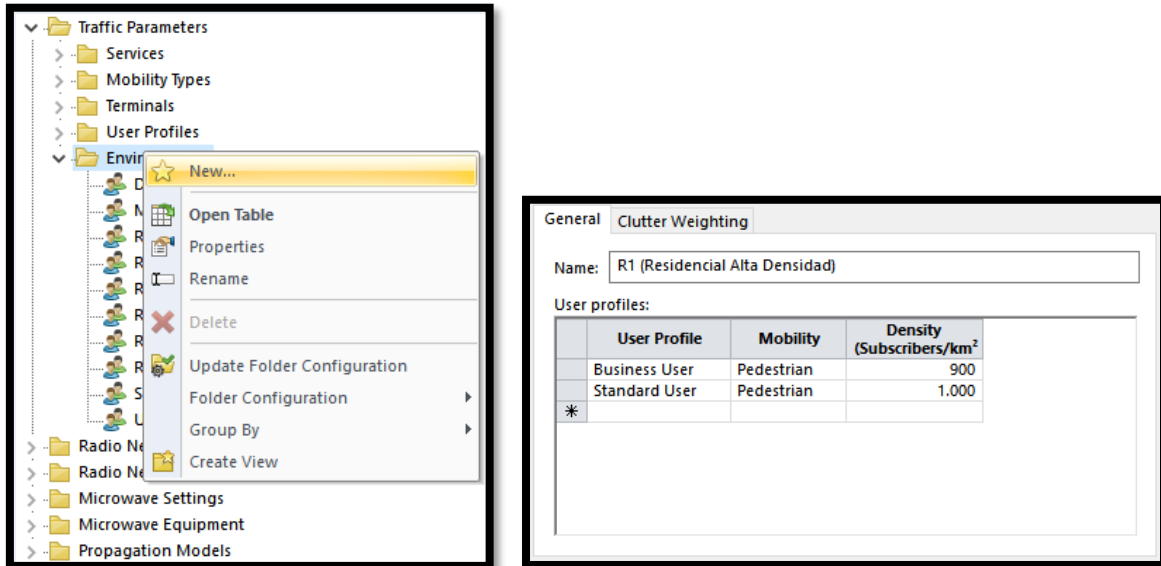


Imagen 5-16 Creación de Ambiente de Tráfico

Se puede ver como se crean los ambientes, configurando la cantidad de usuarios de cada perfil que nos ofrece Atoll por defecto. Estos son *Business User* y *Standard User*. Aquí se puede ver las configuraciones de ambos perfiles:

Name		Business User				
Service use:						
	Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
	High Speed Internet	MIMO Terminal	0,05		2.000	15.000
	Video Conferencing	MIMO Terminal	0,01	600		
	VoIP	Mobile Terminal	0,2	240		
	Mobile Internet Access	MIMO Terminal	0,1		700	4.500

Imagen 5-17 Perfil de Tráfico Business User

Name		Standard User				
Service use:						
	Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
	Mobile Internet Access	MIMO Terminal	0,1		700	4.500
	VoIP	Mobile Terminal	0,2	240		

Imagen 5-18 Perfil de Tráfico Standard User

5.5.4. Consideraciones Legales sobre Estructuras Soporte de Antenas

En Argentina el espectro electromagnético se encuentra regulado a nivel nacional en parte en los documentos de ENACOM, sin embargo, las estructuras soporte de antenas, al encontrarse sobre la tierra, son regulados a nivel municipal. Esto causa que se deba tener un estudio específico para cada municipio a la hora de instalar un sitio, ya que probablemente existan partes de una ciudad en las que esté prohibido edificar, o zonas rurales protegidas, etc.

Se puede consultar el código de edificación de Salta Capital, que indica todas las condiciones que debe cumplir un sitio para estar legalmente autorizado. (Municipalidad de la Ciudad de Salta, 2011)

Como se vio en el mapa de zonificación, nuestra red ocupa distintas zonas, siendo las más críticas aquellas que se encuentran en el microcentro y casco histórico de la ciudad. Si realmente tuviéramos que instalar los sitios en estos lugares, probablemente sería necesario cambiar el lugar específico, orientación, quizás no utilizar torres y usar algún método de camuflaje para las antenas.

Se hizo esta salvedad para aclarar que el proceso de diseño de la red se hace muchas veces de manera iterativa y a lo largo de mucho tiempo, ya que al fallar ciertos permisos legales se vuelve necesario retornar a la etapa de diseño, lo que afecta no sólo a un sitio en particular, sino a todos los cercanos. Se calculan nuevamente las interferencias, coberturas, se cambian antenas y se intenta conseguir que dichos cambios sean autorizados por los entes correspondientes.

Cómo este documento se hace con fines académicos, no se tienen en cuenta estas cuestiones legales municipales, que de haberse respetado hubieran requerido un trabajo mucho más extenso, lo cual excede al propósito del diseño homogéneo de una red de comunicación móvil de cuarta generación.

5.6. Planificación Detallada

La información recolectada de la etapa de dimensionamiento, es decir: tráfico estimado, densidad de usuarios, distribución, sitios de estaciones base existentes, predicciones de cobertura, objetivos de capacidad, etc.; se utilizan para proveer una planificación detallada efectiva. Es sumamente importante que el área planificada tenga datos de propagación actuales, así como los requerimientos de la red de radio.

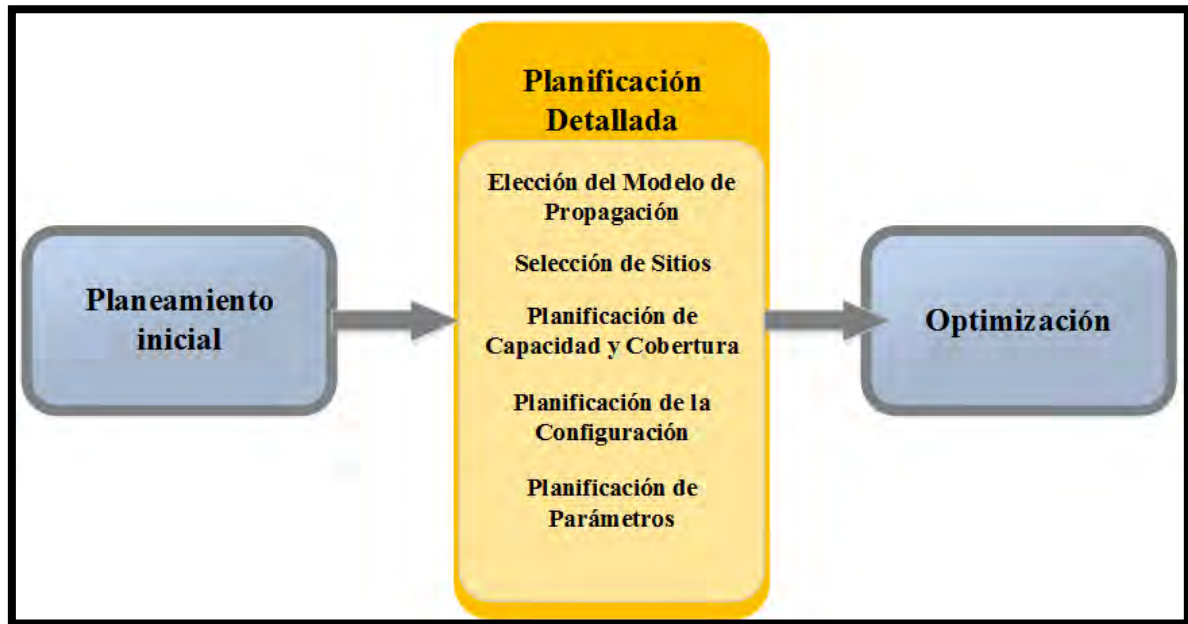


Imagen 5-19 Planificación Detallada (3GPP, 2013)

5.6.1. Elección del Modelo de Propagación

En la práctica, una herramienta de planificación de radio solo puede ser tan buena como la información que se le provee y la manera en que se interpreta. En la herramienta de planificación se incluyen diferentes modelos de propagación que tienen algoritmos extremadamente flexibles. El canal de propagación de radio es una parte clave, con el nivel de campo en un punto dado dependiendo de varios atributos:

- Distancia desde el transmisor.
- Frecuencia.
- Alturas de antena.
- Interferencia
- Topología.

Esto significa que podría haber una variación enorme en el nivel del campo. Además, los cálculos de la herramienta están basados en la resolución y precisión de los datos provistos, como DTM, DEM, datos de dispersión, etc. Por lo tanto, se pueden presentar variaciones adicionales, lo cual impactaría en los cálculos de cobertura y capacidad. (3GPP, 2013)

Una forma de minimizar estas diferencias es realizar un ajuste del modelo. Esto generalmente implica introducir mediciones de portadora de un recorrido de prueba que se utiliza para aplicar correcciones a los cálculos de la herramienta de planificación. Sin embargo, por los fines académicos del presente documento, no se realizará dicho ajuste.

Los modelos se pueden clasificar en:

- Empíricos: estos modelos están basados en estudios previos en ambientes similares. Generalmente se pueden adaptar para identificar cambios en frecuencia, altura de antenas, ambientes e imprevistos.

- Determinísticos: los modelos completamente determinísticos, a veces llamados modelos “Ray Tracing”, apuntan a simular las propiedades de las ondas de radio, como las reflexiones, refracciones de edificios, así como la atenuación a través de ellos. Para ello requieren datos precisos, como modelos 3D de alta resolución.
- Semi-determinísticos: la mayoría de las herramientas de planificación soportan modelos semi-determinísticos. Como su nombre lo indica, utilizan una mezcla de conocimiento determinístico, así como otras variables, como datos empíricos.

Modelo Okumura-Hata

El modelo Okumura-Hata es un modelo empírico de propagación bien conocido que puede ser aplicado a un ambiente de macro celda para predecir la atenuación de señal. Teniendo un componente, el modelo utiliza pérdida de espacio libre. Al ser un modelo empírico, está basado en mediciones de campo. Okumura realizó sus mediciones en Tokio y publicó sus resultados en formato gráfico. Hata convirtió los resultados en ecuaciones. El modelo puede ser aplicado sin ningún factor de corrección en terrenos homogéneos de un área urbana, pero en otros tipos de terreno sí se requerirá de algunas correcciones. La desventaja del modelo Okumura-Hata es que no considera las reflexiones ni el shadowing.

Este modelo está diseñado para celdas grandes en los cuales la estación base se encuentra más alto que los techos que la rodeen. Ambos modelos se diseñaron para frecuencias de 150 a 1500 MHz. Por lo tanto, es posible que no funcionen bien para los sistemas LTE con tamaños de celda más pequeños y frecuencias más altas.

Extensión COST 321 al Modelo Hata

El COST Europeo (*Cooperative for Scientific and Technical*) extendió el modelo de Hata hasta los 2GHz haciendo algunas correcciones según el tamaño de ciudades o zonas suburbanas.

En este modelo la frecuencia de portadora va desde 1.5GHz a 2GHz, la altura de la base de la antena es de 30m a 300m, la altura de la antena propiamente dicha va desde 1m a 10m y la distancia de 1Km hasta 20Km.

Erceg-Greenstein

Con la introducción de LTE se descubrió que el modelo de Erceg-Greenstein era relativamente preciso y adecuado para esta tecnología. Está diseñado para cálculos de pérdida de propagación entre 1.9GHz y 6GHz, y puede ser utilizado para celdas de 100m a 8Km. Este modelo está adaptado mayormente para ambientes suburbanos, usando el perfil del terreno y atributos de difracción y reflexión para calcular la propagación.

Como la mayoría de los modelos de propagación, el Erceg-Greenstein puede ajustarse con factores de corrección para diferentes tipos de ambientes.

Modelo de Propagación CrossWave

El CrossWave es un modelo universal de alta performance desarrollado por Orange Labs. Soporta todas las tecnologías inalámbricas y todos los tipos de ambientes, de rurales hasta densas áreas urbanas.

CrossWave puede ser usado como un modelo pre calibrado de propagación, pero también puede utilizarse con funciones de calibración.

Especificaciones:

- Se soportan todas las tecnologías (GSM, CDMA, LTE, etc.)
- Rango de frecuencias de 200 MHz hasta 5 GHz.
- Reflexiones en montañas.
- Todos tipos de situaciones: macro, mini y micro celdas.
- Todos los ambientes: rural, suburbano, urbano, urbano denso.
- Soporte de datos 3D de edificios.

Standard Propagation Model

Este modelo está basado en la fórmula de Hata. Indicado especialmente para las predicciones en frecuencias comprendidas entre 150 MHz y 3500 MHz, este modelo puede tratar variadas distancias, particularmente las que se encuentran entre 1 km y 20 (Forsk, 2015). Además, diversos estudios corroboran que es un modelo muy adecuado para GSM900/1800, UMTS, CDMA2000, WiMAX y LTE (Quiñones, 2016). Se añade que este modelo utiliza el perfil del terreno, los mecanismos de difracción (calculados de varias maneras), 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).

Al consultar los modelos de propagación disponibles en Atoll, bajo la pestaña *Parameters* encontramos los siguientes:

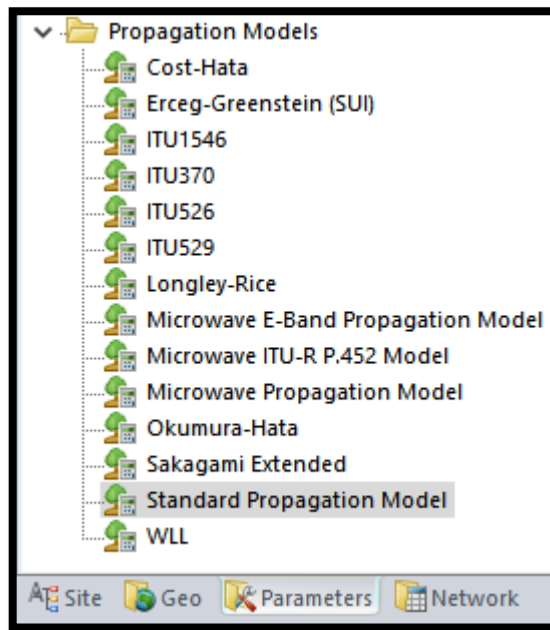


Imagen 5-20 Modelos de Propagación Disponibles

De todas las opciones disponibles, se decide optar por el Standard Propagation Model (SPM). Dicho modelo es deducido a partir del Okumura-Hata, lo que nos facilitará el cálculo del Link Budget.

5.6.2. Planificación de la Configuración

El objetivo del proceso de planificación de la configuración es permitir a la herramienta de planificación identificar la configuración de la E-UTRAN, la cual incluye identificar la configuración de celdas, eNB y características posibles.

5.6.3. Parámetros de Radio

Para definir los parámetros de radio, nos basaremos en la Norma Técnica de ENACOM-Q2-61.04 V17.1-Radiobases.

“Se definen distintos conjuntos de radiobases de acuerdo a la siguiente clasificación:

- Cobertura Amplia (Wide Area Base Station), comúnmente denominadas macro celdas. Se utilizan para cubrir grandes áreas, de baja y media densidad poblacional. Están caracterizadas por una pérdida de acoplamiento mínima de 70 dB. No está especificado un límite particular de potencia máxima para esta clase de radiobases.

- Rango Medio (Medium Range Base Station), comúnmente denominadas micro celdas. Instalaciones típicas de las mismas se dan en zonas urbanas de alta densidad poblacional. Están caracterizadas por una pérdida de acoplamiento mínima de 53 dB. La potencia máxima admitida para esta clase de radiobases es de 38 dBm.

- Área Local (Local Area Base Station), comúnmente denominadas pico celdas. Se utilizan típicamente para dar cobertura a grandes oficinas bajo techo o como puntos de acceso

en recintos al aire libre. Están caracterizadas por una pérdida de acoplamiento mínima de 45 dB. La potencia máxima admitida para esta clase de radiobases es de 24 dBm.

- Hogareñas (Home Base Station), comúnmente denominadas femto celdas. No están particularmente caracterizadas por una determinada pérdida de acoplamiento; su definición surge del ámbito de aplicación: pequeñas oficinas u hogares. La potencia máxima admitida para esta clase de radiobases es de 20 dBm para 1 TX, 17 dBm para 2 TX, 14 dBm para 4 TX y 11 dBm para 8 TX.” (ENACOM, Norma Técnica ENACOM-Q2-61.04 V17.1, 2017)

Bandas de Frecuencias de LTE:

1.7.1. Banda 28 (LTE)

Banda de Operación	Enlace Ascendente Uplink (UL) Radio Base Recibe Terminal Transmite	Enlace Descendente Downlink (DL) Radio Base Transmite Terminal Recibe	Separación Duplex (MHz)
	$F_{UL_baja} - F_{UL_alta}$	$F_{DL_baja} - F_{DL_alta}$	
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	55

1.7.3. Banda 8 (LTE)

Banda de Operación	Enlace Ascendente Uplink (UL) Radio Base Recibe Terminal Transmite	Enlace Descendente Downlink (DL) Radio Base Transmite Terminal Recibe	Separación Duplex (MHz)
	$F_{UL_baja} - F_{UL_alta}$	$F_{DL_baja} - F_{DL_alta}$	
8	905 MHz – 915 MHz	950 MHz – 960 MHz	45

1.7.4. Banda 4 y Banda 10 (LTE)

Banda de Operación	Enlace Ascendente Uplink (UL) Radio Base Recibe Terminal Transmite	Enlace Descendente Downlink (DL) Radio Base Transmite Terminal Recibe	Separación Duplex (MHz)
	$F_{UL_baja} - F_{UL_alta}$	$F_{DL_baja} - F_{DL_alta}$	
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	400
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	400

1.7.6. Banda 7 y Banda 38 (LTE)

Banda de Operación	Enlace Ascendente Uplink (UL) Radio Base Recibe Terminal Transmite	Enlace Descendente Downlink (DL) Radio Base Transmite Terminal Recibe	Separación Duplex (MHz)
	F _{UL_baja} – F _{UL_alta}	F _{DL_baja} – F _{DL_alta}	
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	120
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	0

NOTA: La Banda 38 corresponde a modalidad TDD.

Tabla 5-1 Bandas de LTE en Argentina (ENACOM, Norma Técnica ENACOM-Q2-61.04 V17.1, 2017)

De estas bandas de frecuencia elegiremos en primera instancia la 4 con un ancho de banda de 20 MHz en FDD, una elección que como se verá más adelante, no será la más adecuada para nuestras necesidades.

Además, como se vio en el documento, las potencias máximas para las macro celdas no se encuentran definidas. Para tener una mejor idea de las potencias utilizadas en ellas, se consultó a profesionales del área de comunicaciones móviles de prestadoras en la provincia, quienes coincidieron que la potencia de salida en la ciudad se configuraba en 40W. Haciendo los cálculos correspondientes podemos ver que esto equivale aproximadamente a 46 dBm, así que configuramos dicho parámetro en una plantilla de antena nueva, como se muestra a continuación.

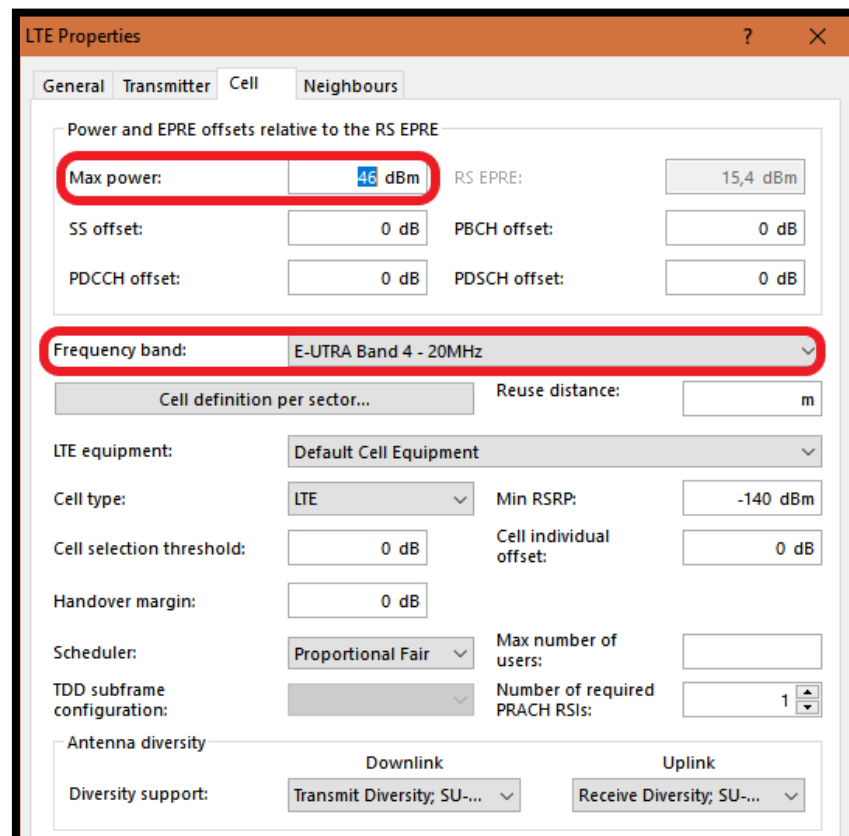


Imagen 5-21 Configuración de Celda LTE

5.6.4. Antenas

También se eligen modelos de antenas con su respectiva ganancia, diagrama de propagación y tilt eléctrico.

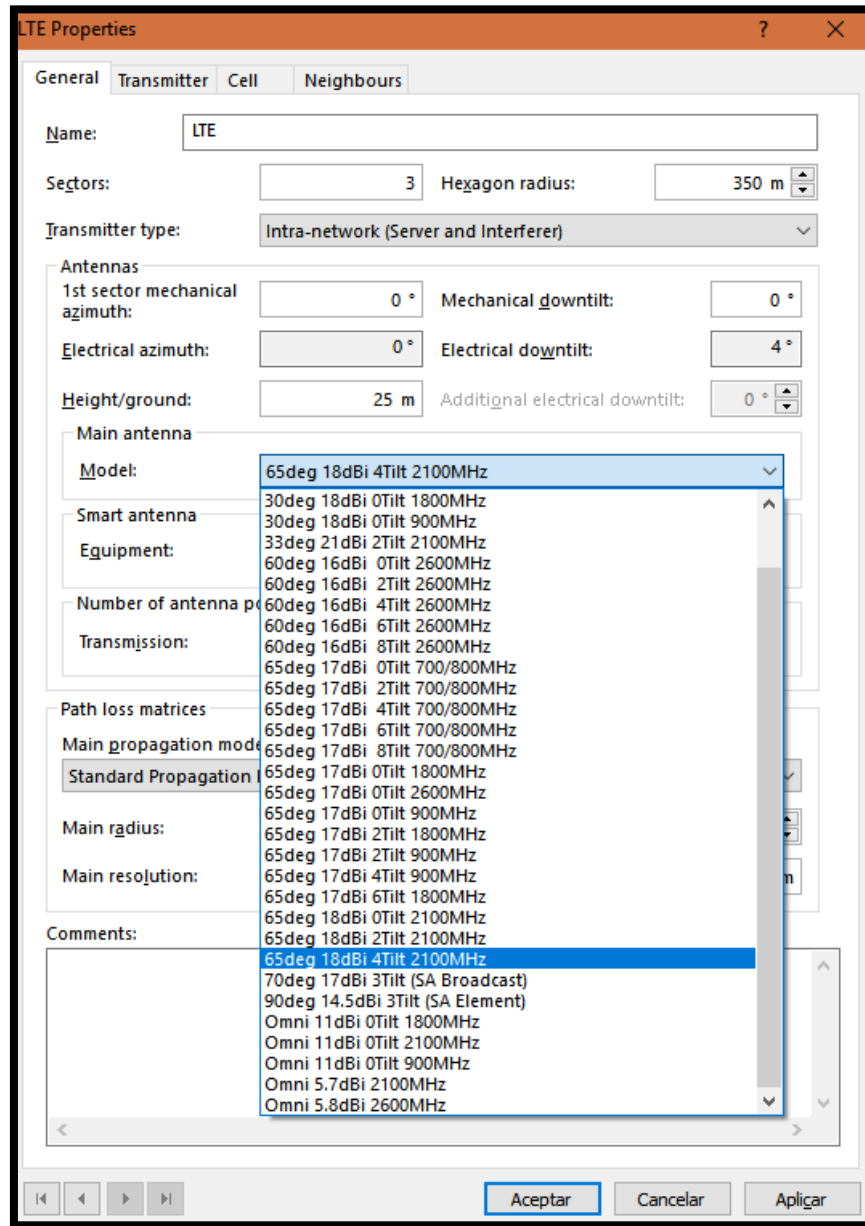


Imagen 5-22 Antenas Disponibles

Se opta por la antena señalada en la imagen. Para poder ver sus características accedemos a la pestaña *Parameters* y luego a las carpetas de *Antennas*. Dichas características incluyen el importante patrón de irradiación tanto horizontal como vertical y el tilt eléctrico. Las mismas se observan a continuación:

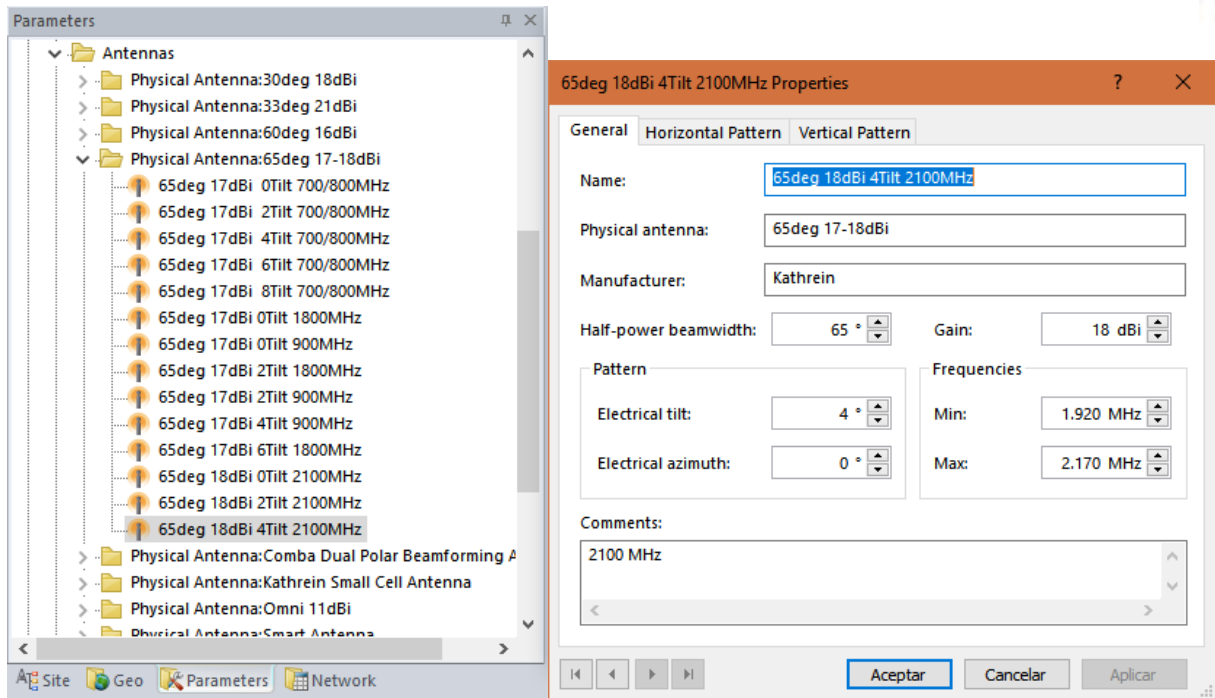


Imagen 5-23 Propiedades de Antena Elegida

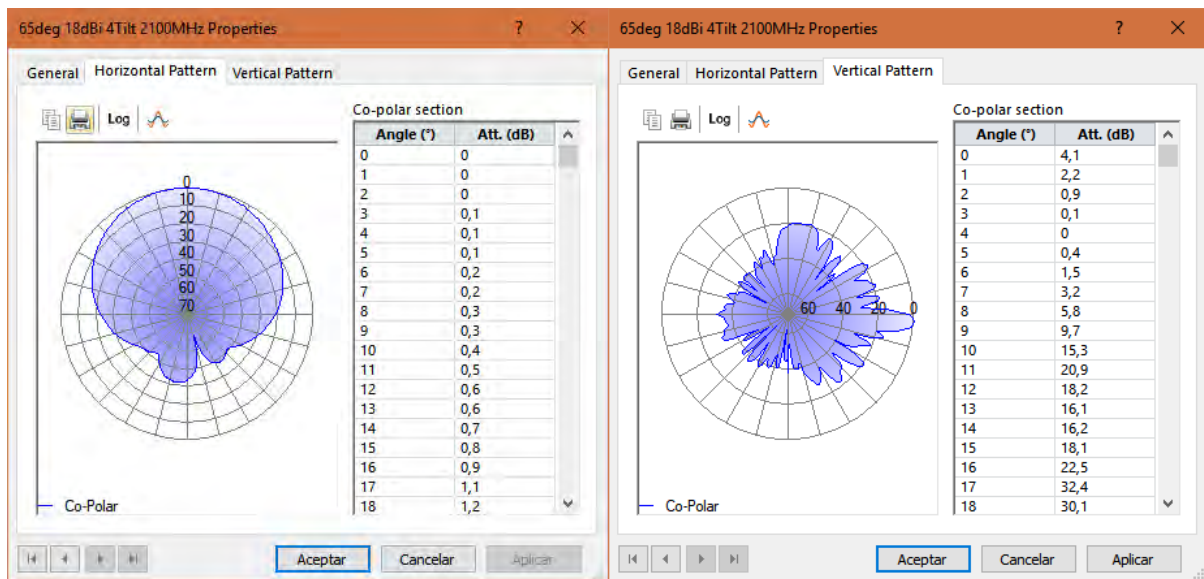


Imagen 5-24 Patrones de Radiación

5.6.5. Planificación de Capacidad y Cobertura

La planificación de LTE para áreas de bajo tráfico es similar a GSM y UMTS. Esto es porque la carga relativamente baja tiene poco impacto en la cobertura y performance de una celda. A pesar de ser sistemas muy diferentes, los principios básicos pueden aplicarse a todos. En contraste, al planificar áreas con un alto tráfico no hay una división clara entre planificación de cobertura, interferencia y capacidad. En nuestro caso, tendremos principalmente áreas de la segunda opción.

Al incrementarse el número de usuarios activos en una celda, la carga total y la interferencia percibida por el receptor se incrementan. Esto se traduce en que la etapa de planificación detallada debe incorporar predicciones de cobertura y capacidad, así como

requerimientos de red por servicios. Esto permitirá que la herramienta de planificación identifique el rango de cobertura máximo de cada celda. Una vez hecho esto, se puede combinar con la distribución del tipo de servicio, distribución detallada de tráfico, performance de QoS, y otros datos más, que permitan una planificación correcta de la capacidad.

Es importante destacar que los niveles de interferencia deben formar parte del proceso completo. Es una tarea iterativa que deberá llevarse a cabo hasta que los requerimientos de capacidad, QoS y servicios se hayan cumplido. Además de todo esto, los costos deben mantenerse dentro del presupuesto.

5.7. Capacidad de Sitios

5.7.1. Dimensionamiento de Capacidad

El objetivo de este proceso es identificar el número de sitios requeridos y si el sistema se encuentra limitado por cobertura o capacidad. En nuestro proyecto no limitaremos el dimensionamiento por capacidad, ya que planeamos utilizar distintas tecnologías a lo largo del mismo. En cambio, descubriremos la capacidad durante las simulaciones. Aun así, se describirán los parámetros a tener en cuenta al analizar dicho dimensionamiento.

La siguiente figura ilustra el proceso genérico de evaluación del número de sitios requeridos para cobertura (basados en un *Link Budget*) y capacidad (basados en modelado de tráfico). Por lo general, las herramientas y hojas de cálculo realizan este procedimiento para diferentes tipos geográficos como: urbano denso, suburbano, urbano y rural. Cada uno de ellos tiene sus propias opciones de configuración. La capacidad también se puede clasificar en interior y exterior.

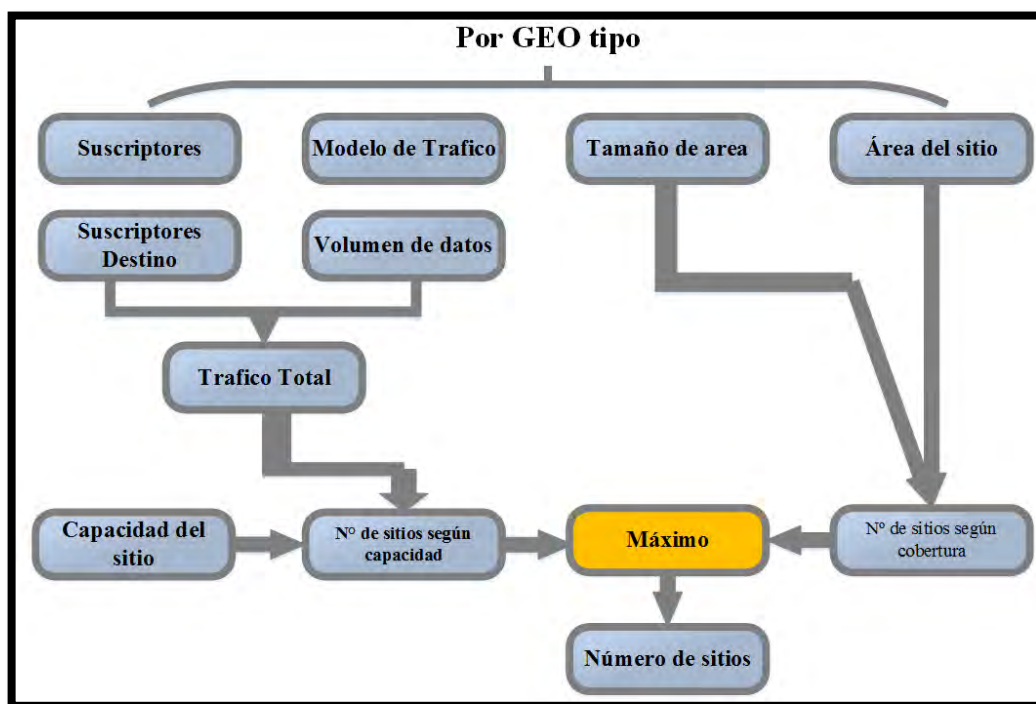


Imagen 5-25 Dimensionamiento de Capacidad (3GPP, 2013)

5.7.2. Capacidad del Sitio

La capacidad del sitio se calcula multiplicando la capacidad de celda por el número de celdas en el sitio. Se debe tener en cuenta que esto se basa en la suposición de que se ha tenido en cuenta la interferencia inter-celda en la capacidad de la celda.

Capacidad del sitio = Capacidad de la celda * Número de celdas por sitio

La capacidad de la celda es un promedio, generalmente calculado en base a simulaciones.

5.7.3. Número de Sitios Debido a la Capacidad

Generalmente se redondea hacia arriba, y debe notarse que los proveedores de servicio generalmente utilizan herramientas propias o software comercial de planeamiento para ayudarse.

No. De Sitios debido a la capacidad = Tráfico ofrecido total / Capacidad del Sitio

5.7.4. Número de Sitios Debido a la Cobertura

Una vez que se estimaron los sitios debido a la capacidad, se puede comparar con el número requerido de sitios según la cobertura. Dicha estimación se basa en el área total a ser planificada y el área del sitio.

El sitio se calcula basado en link budgets y modelos de propagación acordes. Además, el área del sitio también depende del número de sectores y de la pisada de la antena.

No. de sitios debido a la cobertura = Tamaño del área / Área del sitio

5.7.5. Limitación en Cobertura o Capacidad

Basado en el número total de sitios según cobertura y capacidad calculados, el sistema se define como limitado en capacidad (necesita más sitios de capacidad) o limitado en cobertura (necesita más sitios para cobertura).

5.7.6. Factores que Afectan la Capacidad de la Celda

El indicador principal de capacidad en LTE es la distribución de SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*) en la celda, dado que éste en cualquier punto se encuentra directamente relacionado a la modulación y codificación efectiva que puede llevarse a cabo.

Además de los factores obvios de implementación como el ancho de banda del sistema, MIMO y configuraciones del canal físico, hay un número de otros factores que impactan en la capacidad de la celda LTE. Estos incluyen:

- Interferencia. Puede provenir de varias fuentes, como equipos de usuario en uplink, celdas vecinas en downlink, etc.

- Implementación del planificador de paquetes. La mayoría de los proveedores ofrecen diferentes opciones de planificación que impactan en como los usuarios y sus servicios son manejados.
- Utilización de modulación y esquemas de codificación. Dependiendo de dónde se encuentre el equipo de usuario, así como de la interferencia en el sistema, se puede utilizar un esquema de modulación y codificación. Además, la ubicación del terminal puede impactar en la operación de MIMO.
- Despliegue del sitio y método de reutilización de frecuencias. Impacta en el sistema en términos de cobertura y capacidad, así como interferencia. (3GPP, 2013)

5.7.7. Planificación de la Capacidad con Sistemas MIMO

Existen dos métodos MIMO principales, llamados Diversidad de Transmisión y Multiplexación Espacial. La Diversidad de Transmisión está diseñada para proveer una mejora en cobertura y por lo tanto es más adecuada en el borde de la celda. En contraste, la multiplexación espacial está diseñada para multiplicar la tasa de datos de usuario. Desafortunadamente esto solo se utiliza cuando hay un buen SINR y, por lo tanto, cercano al eNB. (3GPP, 2013)

La mayoría de los proveedores soportan MIMO adaptativo, donde el sistema cambia entre diversidad de transmisión y multiplexación espacial basado en la información que provee el terminal.

La capacidad promedio de una celda para un sistema MIMO depende de la tasa de usuarios que utilicen cada método de MIMO en la misma. La siguiente figura ilustra los incrementos de porcentajes en eficiencia espectral al utilizar MIMO a cuatro distancias.

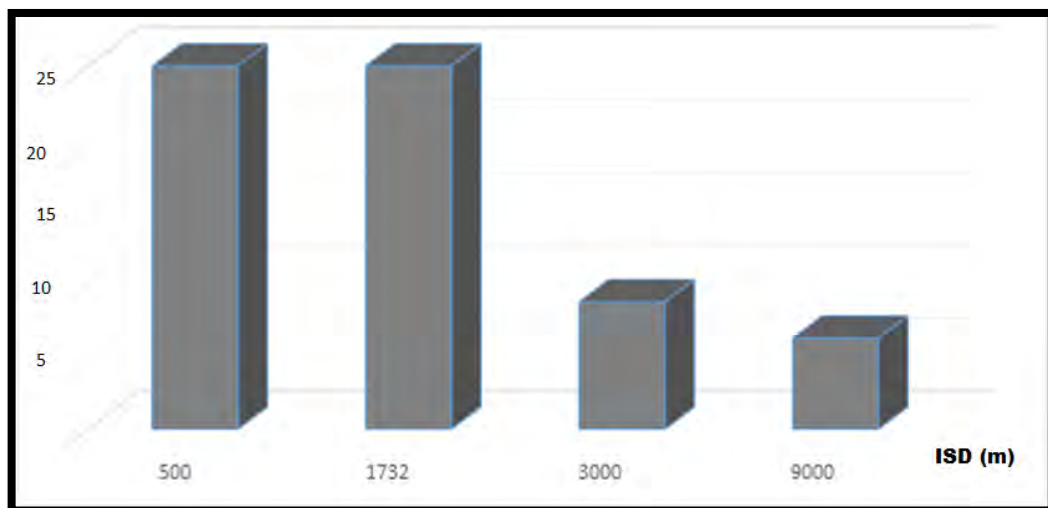


Imagen 5-26 Porcentaje de Aumento en la Eficiencia Espectral con MIMO (3GPP, 2013)

El motivo principal para la diferencia entre las distancias es el porcentaje de área acorde para multiplexación espacial.

Se puede configurar este tipo de parámetros en Atoll, dentro de las propiedades de celdas. Nuestra configuración elegida incluye SU-MIMO, *Transmit Diversity* y *Receive Diversity*:

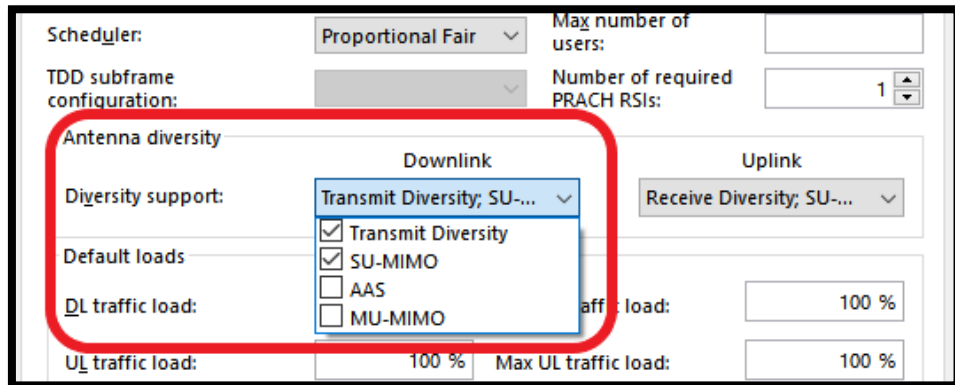


Imagen 5-27 Patrones Multi Antena en Configuración de Celda

5.8. Dimensionamiento de la Cobertura

El objetivo del dimensionamiento de la cobertura es estimar el número de sitios para un área dada. Para lograr esto, se necesitan varios datos:

- Tipo de servicio.
- Probabilidad de servicio.
- Configuración base del sitio.
- Capacidades del equipamiento y su performance.
- Ambiente de propagación.

Basado en algunos de estos datos se puede calcular el link Budget. Este provee el MPL (*Maximum Path Loss*), a través del cual se puede identificar el rango de la celda y por lo tanto la cobertura del sitio.

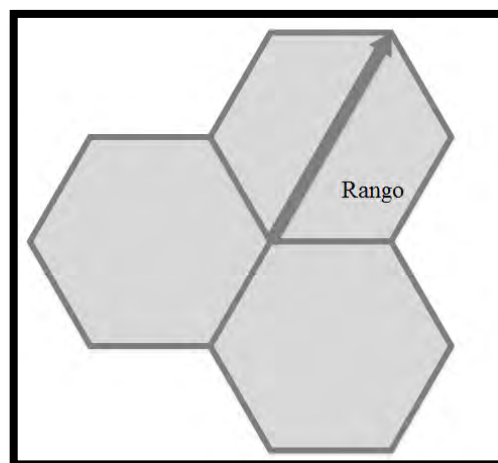


Imagen 5-28 Modelo Hexagonal de Cobertura (3GPP, 2013)

5.8.1. Link Budget de LTE

El concepto de Link Budget es común a todos los sistemas de radio, incluyendo a LTE. Se usa como parte del diseño del sistema y resulta en variados supuestos para ganancias y pérdidas a lo largo del camino de radiofrecuencia entre el eNB y el dispositivo móvil. El objetivo principal del link budget es estimar la pérdida de camino máxima permitida. Esto, en conjunto con un modelo de propagación acorde, permite estimar el tamaño de la celda, lo que habilita al planificador a identificar el número de sitios requeridos.

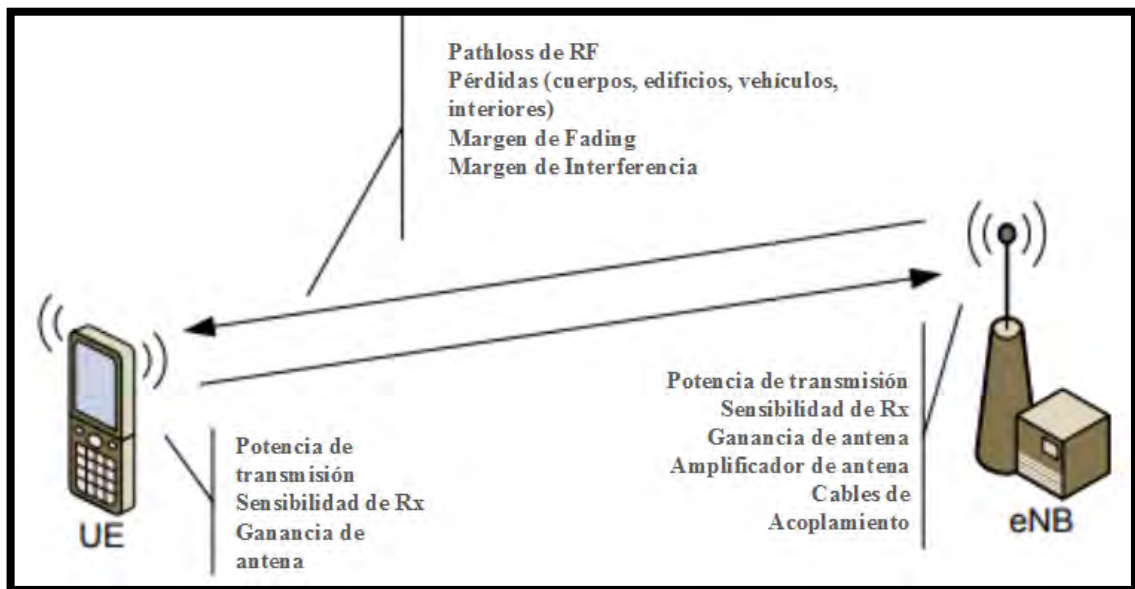


Imagen 5-29 Modelo de Link Budget de LTE (3GPP, 2013)

A continuación, calcularemos el *Link Budget* para nuestra red. Al haber elegido el *Standard Propagation Model*, basado en Okumura-Hata, podemos usar su modelo de cálculo para áreas urbanas:

$$Lu = 69.55 + 26.16 \cdot \log(f) - 13.82 \cdot \log(h_B) - C_H + [44.9 - 6.55 \cdot \log(h_B)] \cdot \log(d)$$

h_B : Altura de Antena de Estación Base (m)

f : Frecuencia (MHz)

C_H : Factor de corrección de la antena (dB)

D : Distancia entre la estación base y el móvil (km)

Si aplicamos nuestros valores elegidos ($f = 2100\text{MHz}$, $h_B = 30\text{m}$ y $d = 2\text{Km}$) nos queda lo siguiente:

$$Lu = 69.55 + 26.16 \cdot \log(2100\text{MHz}) - 13.82 \cdot \log(30\text{m}) - 0\text{dB} + [44.9 - 6.55 \cdot \log(30\text{m})] \cdot \log(2\text{Km})$$

$$Lu = 146,65 \text{ dB}$$

Transmitter Power Output:	46	dBm
Transmitter Antenna Gain (dBi):	17	
Transmitter Loss (dB):	0	
Free Space Path Loss (dB):	146.65	
Miscellaneous Loss (dB):	0	
Receiver Antenna Gain (dBi):	0	
Receiver Loss (dB):	4	

Result:

Received Power: -87.65 dBm

Imagen 5-30 Resultado de Link Budget (LTE Encyclopedia)

Este valor recibido es mayor a los -90 dBm que definimos necesarios para el correcto funcionamiento de la red LTE, lo que nos indica que podemos poner las antenas cada 2Km entre sí (la cobertura teórica nos permitiría ponerlas a 4 Km, pero como tenemos un tilt eléctrico y sabemos que el programa de simulación toma más factores en cuenta, reducimos dicho radio a la mitad).

5.9. Selección del Sitio

Los criterios para identificar sitios a partir de una lista de candidatos incluyen:

- Número de sitios.
- KPI (*Key Performance Indicator*) para cobertura y capacidad.
- Cercanía al tráfico.
- Altura y espaciamiento.

El proceso de selección de sitios puede hacerse manualmente, o bien usando un algoritmo de selección automática. Sin embargo, la confiabilidad de estos sistemas automáticos depende de la precisión del modelo de propagación.

Existen varios métodos para la selección manual, no obstante, el planificador necesita chequear constantemente que los grupos de eNB se encuentren a una altura uniforme y separados igualmente. Al mismo tiempo, se deben monitorear los niveles de bloqueo de la señal. (3GPP, 2013)

Una vez definidos los parámetros de red, plantilla de antenas y zona de interés, procederemos a colocar sitios en la misma.

Anteriormente, basados en el *Link Budget*, definimos una distancia entre sitios de 2 Km. Para ubicarlos nos ayudaremos colocando la opción de grillas que nos permitan ver estas distancias (también habrá un radio a 1 Km de cada sitio para poder ver la cobertura teórica), así como los ángulos de las celdas. El resultado es el siguiente:

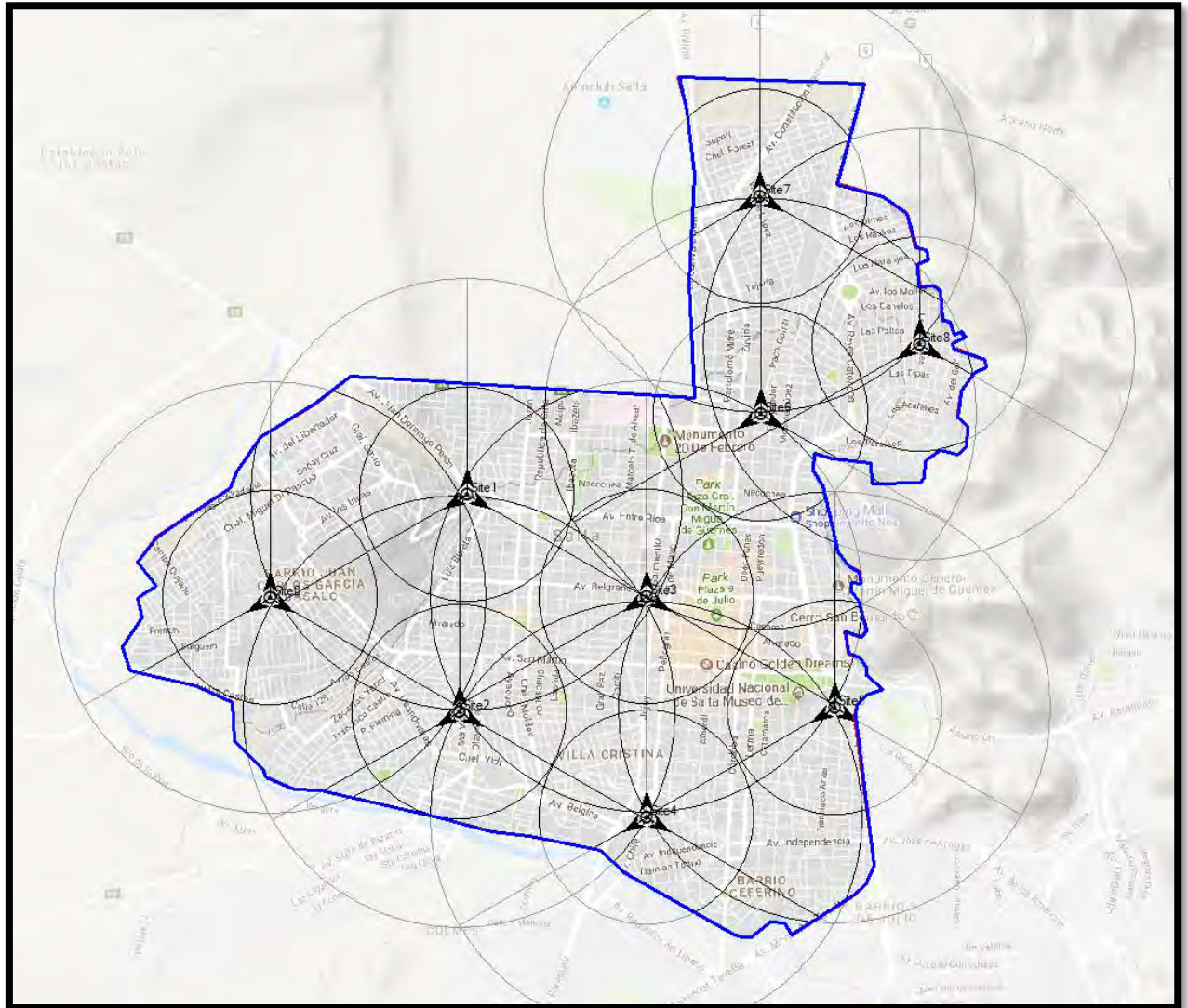


Imagen 5-31 Radiobases - Banda 4 - 30 m

Como se puede ver, colocamos 9 sitios con la intención de cubrir toda la zona. A continuación, se utilizaron herramientas de automatización para identificar las celdas vecinas, frecuencias y Physical Cell IDs. Esta etapa es la que en sus distintas iteraciones y con el feedback apropiado se convierte en la etapa de optimización, cuyos procesos serán discutidos en el capítulo 7.

5.9.1. Asignación Automática de Celdas Vecinas

Atoll nos permite realizar la identificación automática de celdas vecinas entre sí, discriminando co-sitio y adyacentes en el proceso. Para realizarlo se recurre a la pestaña *Parameters*, luego a la carpeta *Transmitters*, donde se selecciona *Neighbours/Intra-technology/Automatic Allocation*, como se ve en la siguiente imagen:

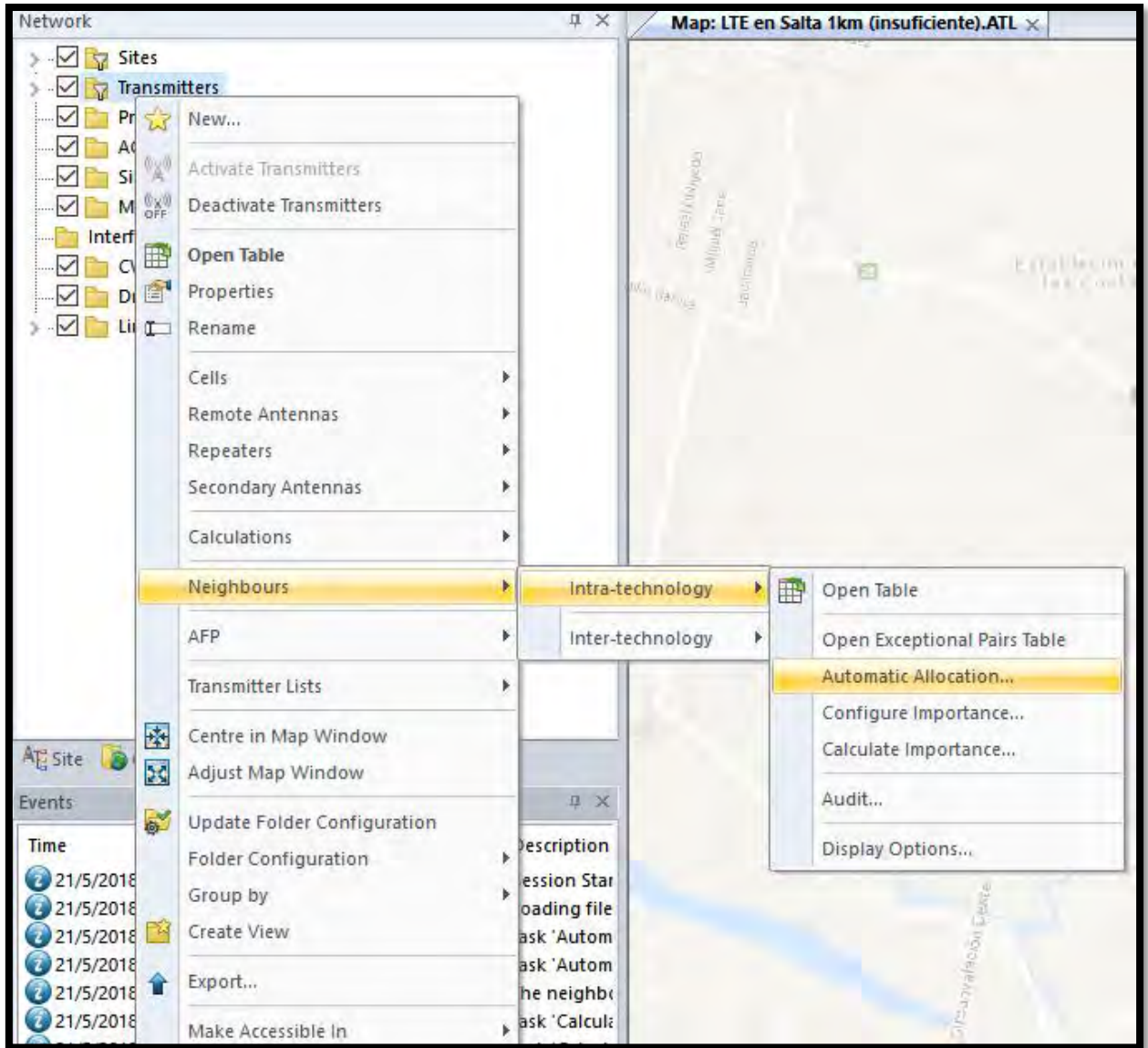


Imagen 5-32 Asignación Automática de Celdas Vecinas

Luego se realiza la opción de calcular las celdas vecinas. Su puede comparar el resultado con estados anteriores y finalmente cuando se está listo, se presiona *Commit* para aceptar los parámetros calculados.

Automatic Neighbour Allocation

Intra-technology Neighbours

Max inter-site distance: 10.000 m

Max no. of neighbours: 16

Use coverage conditions

Min RSRP: by Cell
Handover start: 0 dB
Handover end: 5 dB

Define...

% min covered area: 10 %

Force

Co-site cells as neighbours

Adjacent cells as neighbours

Adjacent layers as neighbours

Symmetric relations

Exceptional pairs

Delete existing neighbours

Results:

Cell	Number	Maximum number	Neighbour	Importance (%)	Cause	Relation type	Coverage (%)	Coverage (km ²)	Adjacency (%)	Adjacency (km ²)	Commit
Site0_1(0)	8	16	Site0_3(0)	78,24	Co-Site	Inter-carrier	39,64	0,1023	39,52	0,1019	<input type="checkbox"/>
			Site0_2(0)	75,65	Co-Site	Intra-carrier	34,4	0,0887	31,33	0,0808	<input type="checkbox"/>
			Site1_3(0)	35,22	Adjacent	Intra-carrier	12,38	0,0319	9,58	0,0247	<input type="checkbox"/>
			Site2_1(0)	34,21	Adjacent	Inter-carrier	9,39	0,0242	5,43	0,014	<input type="checkbox"/>
			Site3_3(0)	31,99	Adjacent	Intra-carrier	0,2	0,0005	0,1	0,0002	<input type="checkbox"/>
			Site4_1(0)	31,89	Adjacent	Intra-carrier	0,58	0,0015	0,27	0,0007	<input type="checkbox"/>
			Site6_3(0)	31,73	Adjacent	Intra-carrier	1,85	0,0048	0,12	0,0003	<input type="checkbox"/>
			Site7_3(0)	31,63	Adjacent	Intra-carrier	1,55	0,004	1,4	0,0036	<input type="checkbox"/>
Site0_2(0)	10	16	Site0_3(0)	70,97	Co-Site	Inter-carrier	20,19	0,1479	18,92	0,1386	<input type="checkbox"/>
			Site0_1(0)	69	Co-Site	Intra-carrier	14,25	0,1043	13,72	0,1005	<input type="checkbox"/>
			Site2_3(0)	43,54	Adjacent	Intra-carrier	43,37	0,3175	40,26	0,2948	<input type="checkbox"/>
			Site2_1(0)	35,5	Adjacent	Inter-carrier	13,63	0,0998	10,47	0,0767	<input type="checkbox"/>
			Site1_3(0)	33,28	Adjacent	Inter-carrier	3,88	0,0284	3,04	0,0222	<input type="checkbox"/>
			Site1_2(0)	32,62	Adjacent	Inter-carrier	1,47	0,0108	0,58	0,0043	<input type="checkbox"/>
			Site2_2(0)	32,55	Adjacent	Intra-carrier	1,11	0,0081	0,35	0,0026	<input type="checkbox"/>
			Site4_3(0)	32,07	Adjacent	Inter-carrier	1,4	0,0102	0,87	0,0063	<input type="checkbox"/>
			Site3_3(0)	32,05	Adjacent	Intra-carrier	0,59	0,0043	0,25	0,0018	<input type="checkbox"/>
			Site4_1(0)	31,8	Adjacent	Intra-carrier	0,1	0,0007	0,01	0,0001	<input type="checkbox"/>
Site0_3(0)	3	16	Site0_2(0)	81,26	Co-Site	Inter-carrier	53,55	0,1563	45,13	0,1317	<input type="checkbox"/>
			Site0_1(0)	75,79	Co-Site	Inter-carrier	32,75	0,0956	32,74	0,0955	<input type="checkbox"/>
			Site2_3(0)	34,81	Adjacent	Inter-carrier	13,71	0,04	6,61	0,0193	<input type="checkbox"/>
Site1_1(0)	6	16	Site1_2(0)	77,78	Co-Site	Inter-carrier	44,05	0,1158	35,38	0,093	<input type="checkbox"/>
			Site1_3(0)	72,32	Co-Site	Inter-carrier	25,32	0,0666	22,01	0,0579	<input type="checkbox"/>
			Site6_3(0)	35,37	Adjacent	Inter-carrier	21,42	0,0563	7,16	0,0188	<input type="checkbox"/>
			Site3_1(0)	33,59	Adjacent	Intra-carrier	6,47	0,017	3,21	0,0084	<input type="checkbox"/>
			Site7_3(0)	32,19	Adjacent	Intra-carrier	2,6	0,0069	0,63	0,0016	<input type="checkbox"/>
			Site8_3(0)	31,68	Adjacent	Inter-carrier	0,02	0	0,02	0	<input type="checkbox"/>
Site1_2(0)	14	16	Site1_1(0)	69,45	Co-Site	Inter-carrier	16,64	0,1052	14,41	0,0911	<input type="checkbox"/>
			Site1_3(0)	65,95	Co-Site	Intra-carrier	6,23	0,0394	5,03	0,0318	<input type="checkbox"/>
			Site3_1(0)	39,9	Adjacent	Inter-carrier	31,38	0,1984	25,83	0,1633	<input type="checkbox"/>
			Site3_3(0)	36,23	Adjacent	Inter-carrier	16,32	0,1031	12,96	0,0819	<input type="checkbox"/>
			Site2_1(0)	35,82	Adjacent	Intra-carrier	15,3	0,0967	11,38	0,0719	<input type="checkbox"/>

Calculate Compare Commit

Close

Imagen 5-33 Resultado de Asignación Automática de Celdas Vecinas

5.9.2. Asignación Automática de Frecuencias

Para las frecuencias se trabaja de manera similar, el software es capaz de calcular su asignación de manera que se logre la mayor cobertura, reduciendo la interferencia entre sitios. Esto sería evitando, por ejemplo, que dos celdas que se encuentran cercanas emitan en la misma dirección con un determinado canal de frecuencia.

Para acceder al menú de asignación automática de frecuencias o *AFP (Automatic Frequency Planning)*, se debe dirigir a la carpeta *Transmitters* y haciendo click secundario sobre ella, elegir *AFP/Automatic Allocation*.

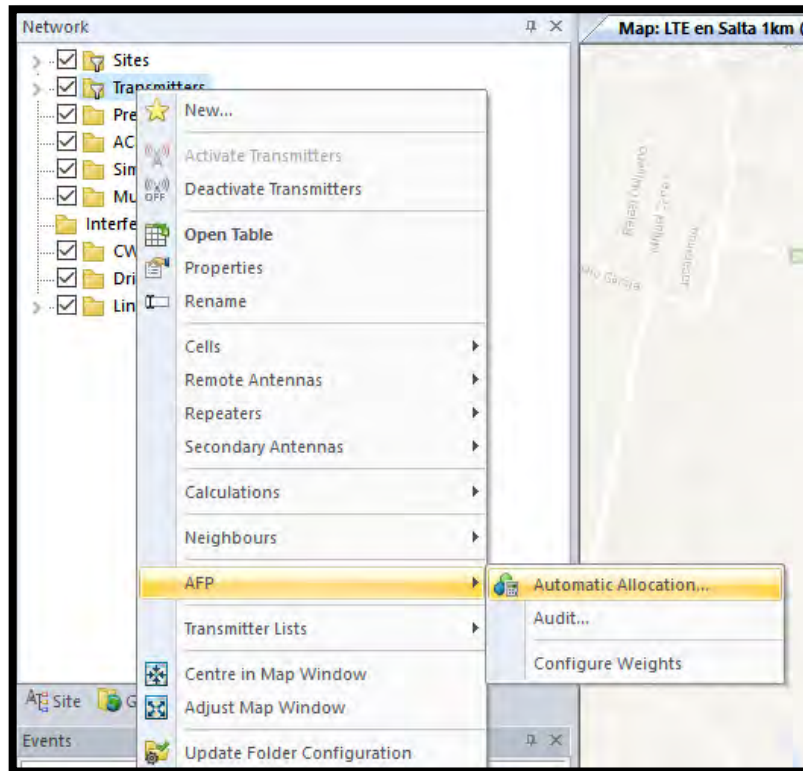


Imagen 5-34 Asignación Automática de Frecuencias

Luego se selecciona el parámetro a asignar, en este caso Frecuencias, y se le da click a Iniciar. Al momento de finalizar el proceso tendremos una imagen como la siguiente, en la que se ve la asignación de canales a cada celda. Se puede apreciar que solo se dispone de dos bandas de frecuencias (2050 y 2250). Finalmente se aprieta *Commit* para aceptar estos cambios y asignarlos en el proyecto.

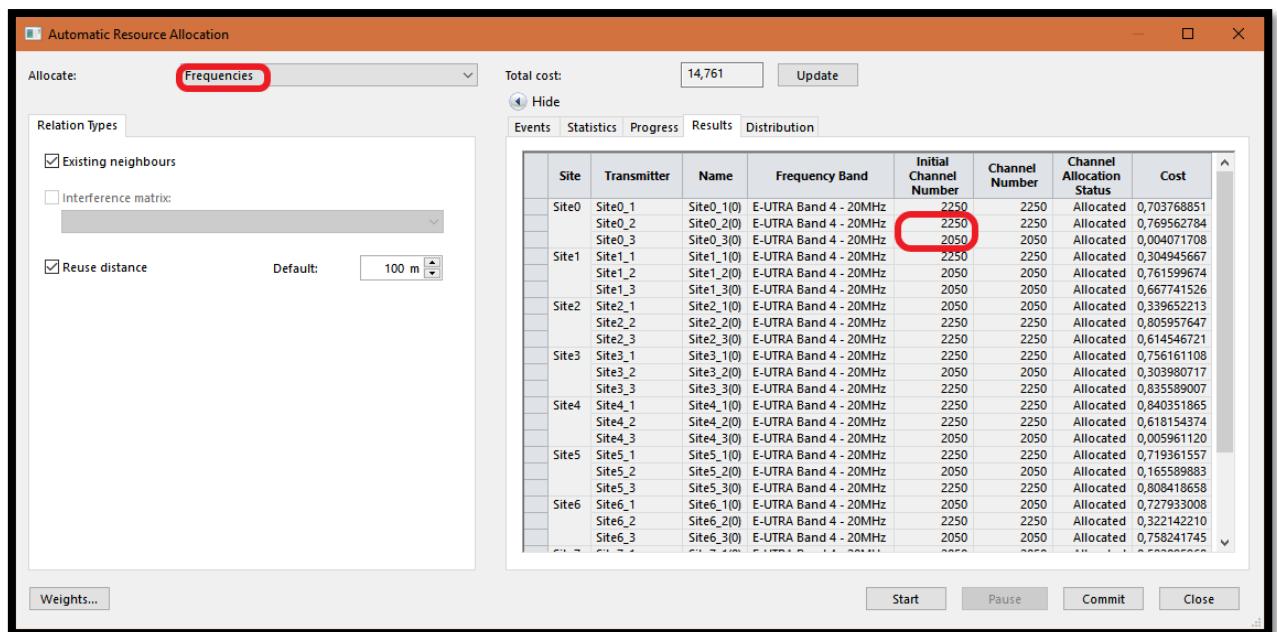


Imagen 5-35 Resultado de Asignación Automática de Frecuencias

5.9.3. Asignación Automática de Physical Cell IDs

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.

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. (Dahlman, Parkvall, & Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011)

Para realizar esta asignación se accede nuevamente a AFP sólo que esta vez en el campo donde indica Allocate se elige Physical Cell IDs. Luego del proceso se puede comprobar también sus resultados donde se ve el número adquirido por cada celda. Al hacer click en Commit aplicamos estos resultados.

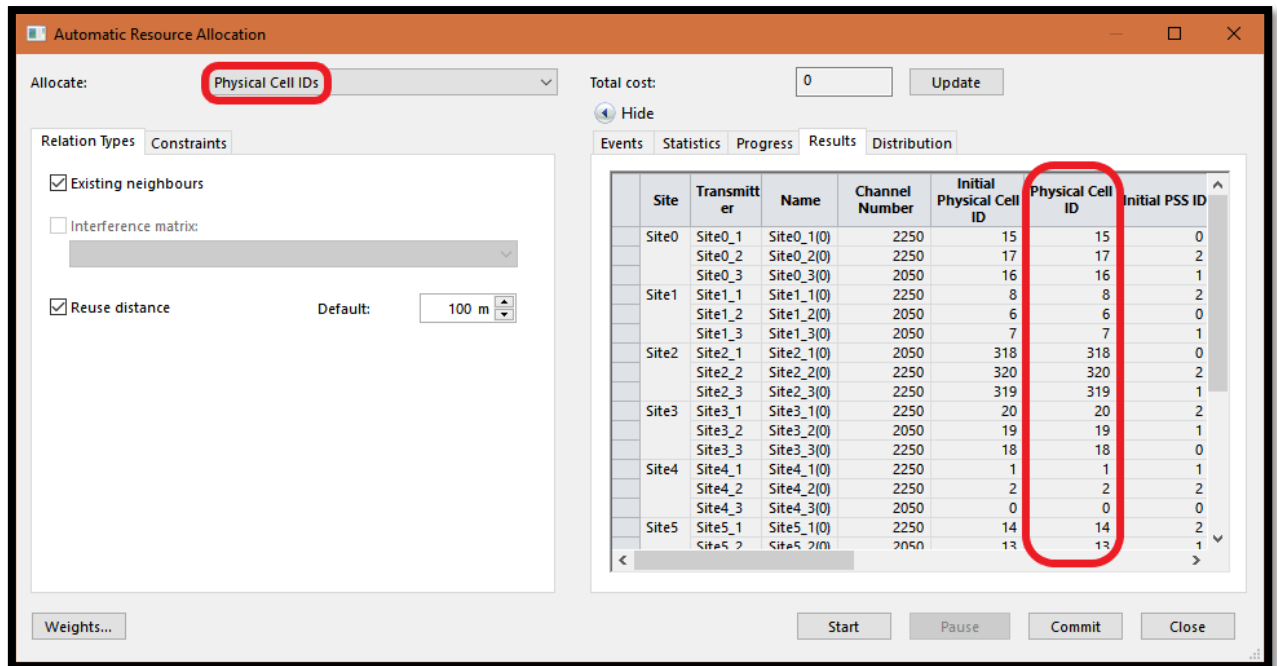


Imagen 5-36 Resultados de Asignación Automática de Physical Cell IDs

6. Predicciones

Ahora es necesario realizar una serie de cálculos para determinar la cobertura y calidad de la señal transmitida en el terreno. Para poder tener un punto de comparación con las sucesivas mejoras que se implementarán, se definen las siguientes predicciones:

Tipo	Nombre	Dependencia del Tráfico	Descripción
Por Nivel de Señal	Coverage by Signal Level	No	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa.
	Coverage by Transmitter	No	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor.
	Overlapping Zones	No	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.
	Effective Signal Analysis	No	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH).
	Coverage by C/(I+N) Level	Si	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido C/(I+N) para cada píxel del mapa.

Tabla 6-1 Clasificación de Predicciones por Nivel de Señal. (Quiñones, 2016)



Tipo	Nombre	Dependencia del Tráfico	Descripción
Por Calidad de Señal	Service Area Analysis	Si	Permite calcular y mostrar los mejores Radio Bearers disponibles para cada píxel del mapa basados en las C/(I+N) de los mismos.
	Effective Service Area Analysis	Si	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible, tanto en el DL como en el UL.
	Coverage by Throughput	Si	Permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa los Channel Throughputs y Cell Capacities basados en los niveles de C/(I+N) y en los Radio Bearers disponibles. Además, permite mostrar el Aggregate Cell Throughput para resultados de simulaciones.
	Coverage by Quality Indicator	Si	Permite Calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, BER, entre otros) basados en los Radio bearers y en los niveles de C/(I+N) de cada píxel.

Tabla 6-2 Clasificación de Predicciones por Calidad de Señal. (Quiñones, 2016)

Se eligen las opciones resaltadas en la tabla anterior para ejecutar en todas las pruebas. Como se puede ver, algunas de ellas dependen del tráfico, que incorporaremos con simulaciones de Monte Carlo en las pruebas que lo requieran.

Para acceder al menú de predicciones se va a la pestaña *Network* y sobre la carpeta *Predictions* se hace click secundario, eligiendo *New Prediction*. Se nos despliega un panel como el que se ve en la imagen, en el cual podemos elegir todas las predicciones descritas anteriormente. Si se le da click a calcular, lo hace con las configuraciones por defecto. Si se apreta OK, en cambio, se puede configurar el *Shading* de colores de la referencia, la resolución en metros de cada punto de cálculo y el canal específico sobre el que se basará dicha predicción.

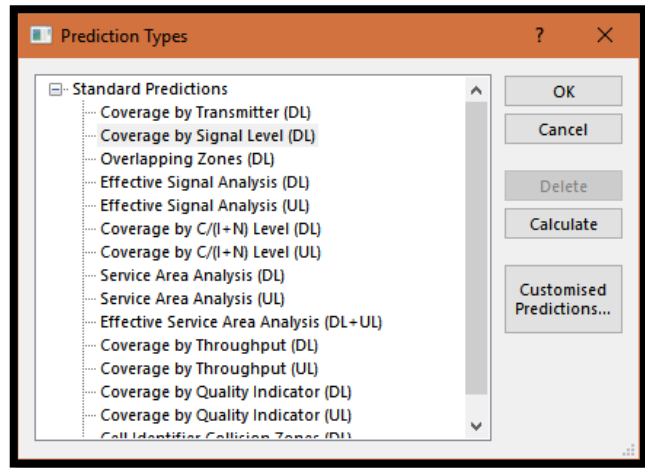
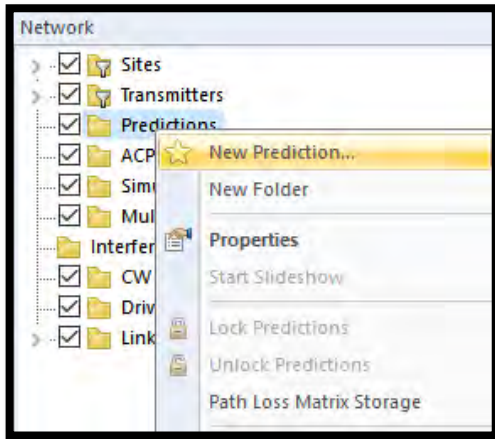


Imagen 6-1 Creación de Nueva Predicción

Imagen 6-2 Tipos de Predicción

6.1. Predicciones en Banda 4

6.1.1. Cobertura por Nivel de Señal (DL)

En primera instancia corrimos esta predicción para poder analizar las zonas con cobertura adecuada.

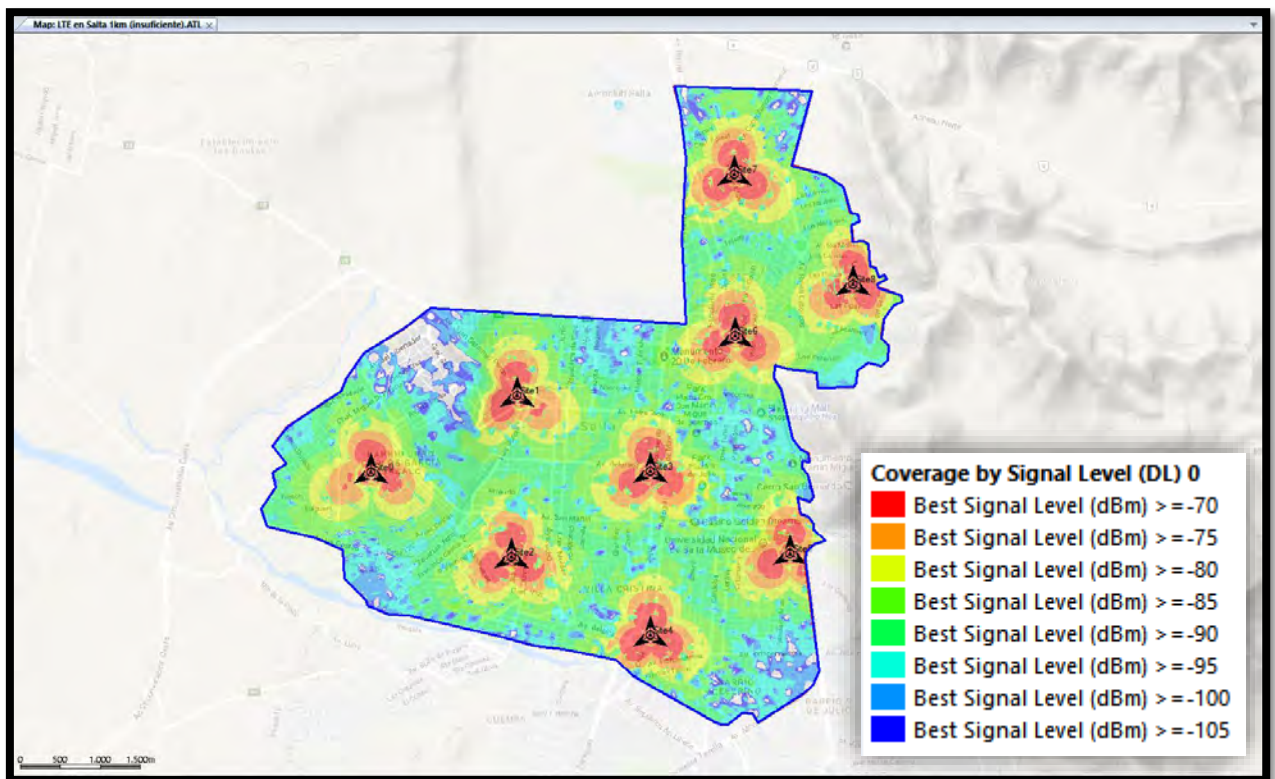


Imagen 6-3 Cobertura por Nivel de Señal (DL)

Como se aprecia, la mayor parte del mapa se encuentra con cobertura. Era esperable que los mejores niveles de señal (tonos más cálidos) se encuentren cerca de los sitios de antena. Sin

embargo, hay algunos lugares que tienen menos de -100 dBm (en azul) y otras zonas directamente no tienen color, lo que implica valores menores a -105 dBm.

A continuación, se ve el histograma, donde a simple vista se aprecia que la mayoría de los datos se encuentran entre -90 y -80 dBm, pero al sumar los porcentajes nos encontramos con que la cobertura con nivel mayor a -90 dBm es del 77,76%, un valor que nos gustaría mejorar, ya que para entregar modulaciones QAM a más del 95% del territorio como definimos, necesitamos valores altos de señal.

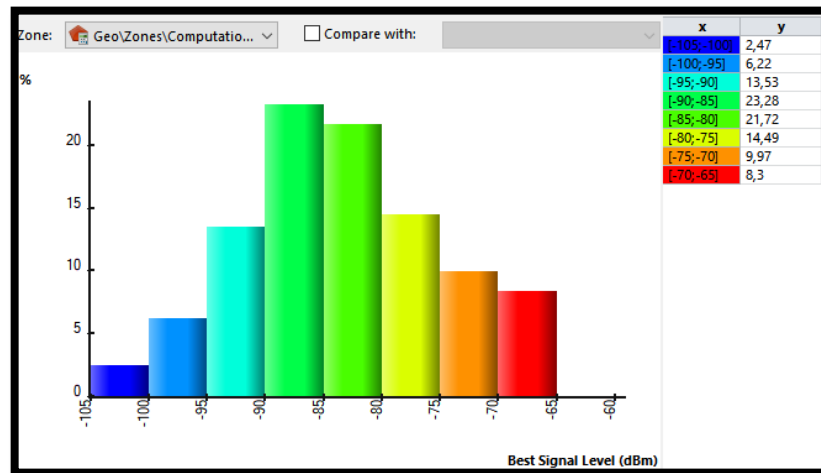


Imagen 6-4 Histograma de Cobertura por Nivel de Señal (DL)

6.1.2. Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)

Es necesario especificar los canales que se tienen en cuenta en nuestras predicciones. 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.

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.

Imagen 6-5 Principales Canales Físicos del Downlink (Quiñones, 2016)

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..

Imagen 6-6 Principales Canales Físicos del Uplink (Quiñones, 2016)

Se optó por medir el canal compartido del Downlink, el canal PDSCH ya que es el que lleva información muy relevante de usuario y control. A continuación, se ve el resultado de dicha predicción.

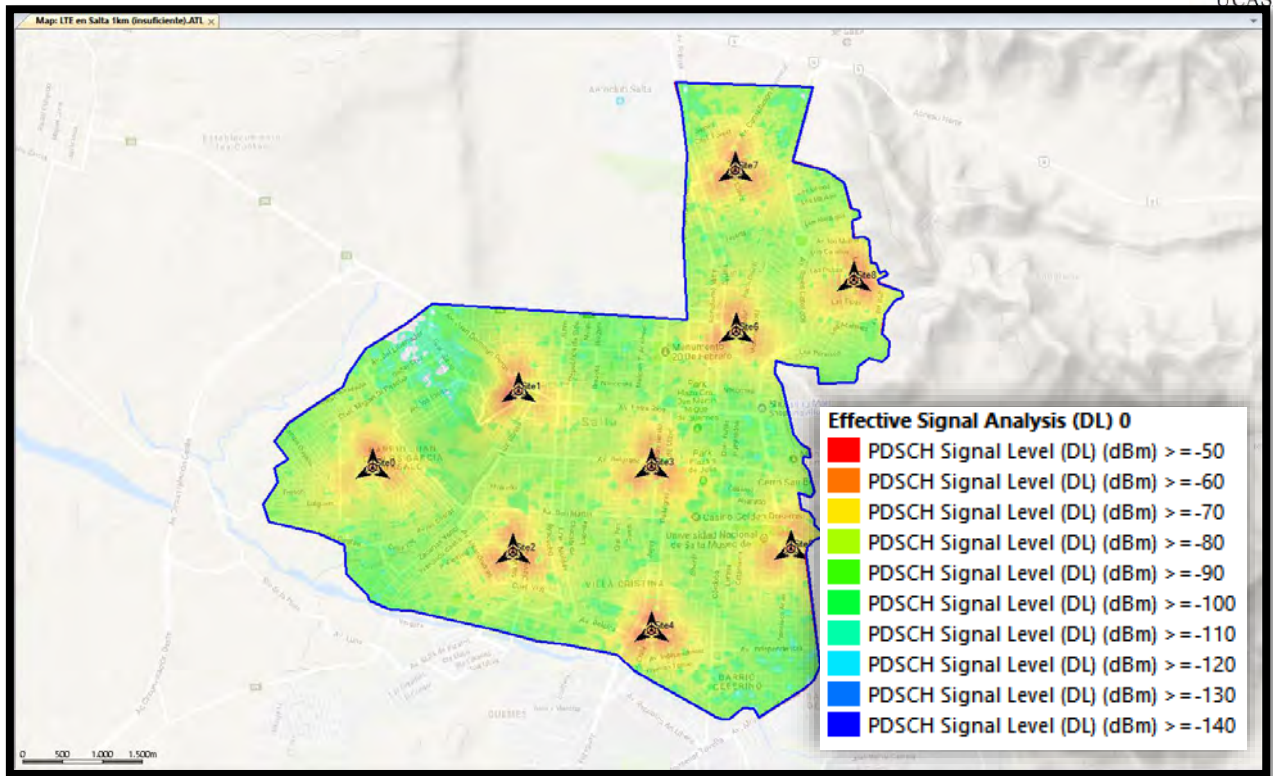


Imagen 6-7 Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)

Haciendo los cálculos, se observa un nivel de señal del PDSCH muy buena, encontrándose el 92,4% del terreno total con más de -90 dBm.

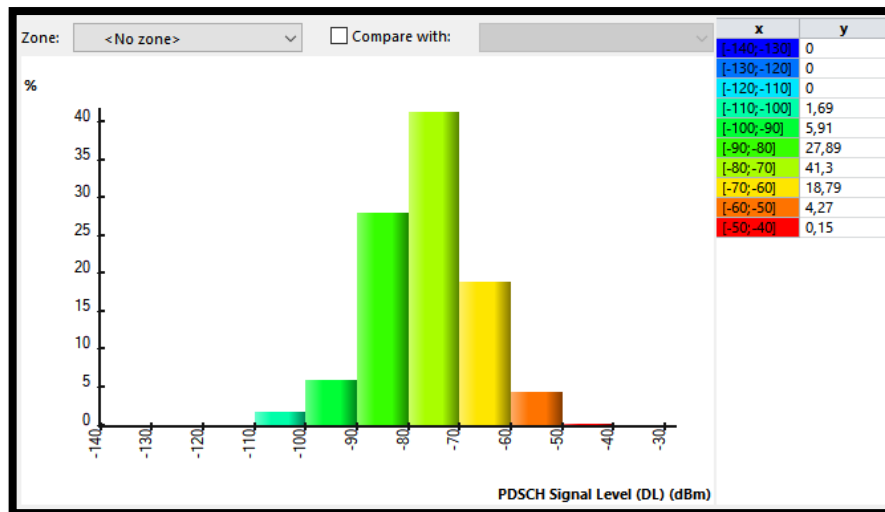


Imagen 6-8 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)

6.1.3. Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)

Se realiza el mismo cálculo sobre los canales PUSCH y PUCCH del Uplink, obteniendo resultados similares. Se aclara que, si bien los colores nos indican un menor nivel de señal, los valores necesarios en el Uplink son de al menos -110 dBm.

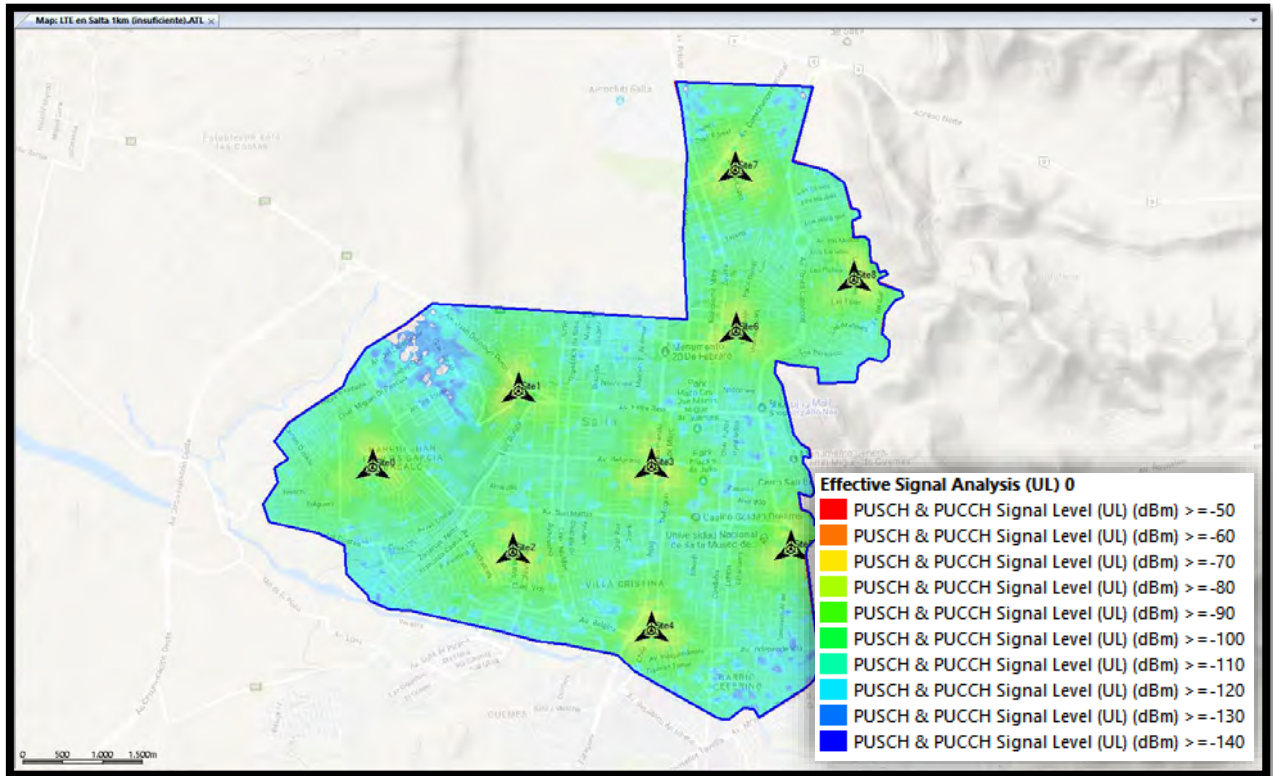


Imagen 6-9. Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)

En nuestro histograma vemos que la cantidad de terreno que cumple con la condición de recibir señal de PUSCH y PUCCH mayor a -110 dBm equivale al 87.75% del mismo. Considerando las altas exigencias que pusimos a nuestra red como objetivo, éste resultado es mejorable.

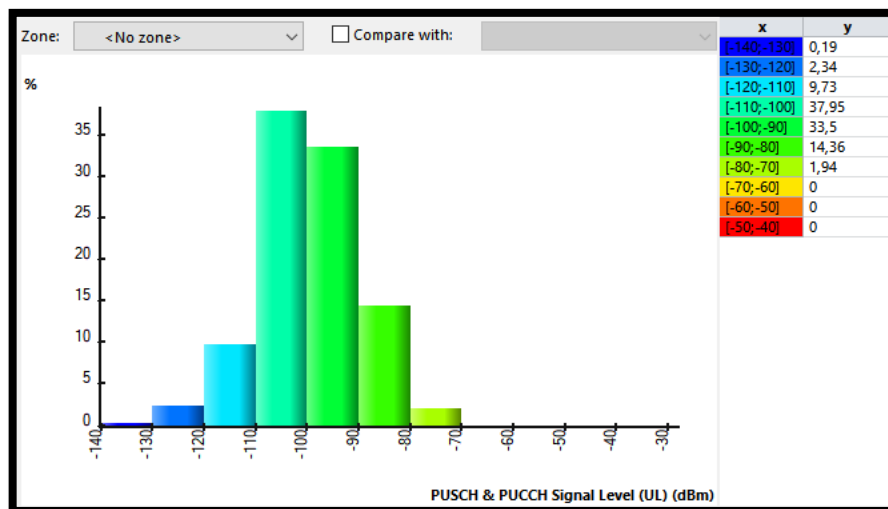


Imagen 6-10 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)

6.1.4. Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)

Procedemos a realizar cálculos teniendo en cuenta el ruido y la interferencia en la red. Es así que corremos la predicción sobre el canal PDSCH visto recientemente (que tenía muy buenos valores de señal), pero teniendo en cuenta la relación señal a ruido e interferencia.

Es en este punto donde vemos un problema importante para nuestra red LTE. Como se observa en el gráfico, existen muchas zonas donde la relación C/(I+N) es tan mala, que ni siquiera entra en la escala, quedando dichos espacios sin pintar.

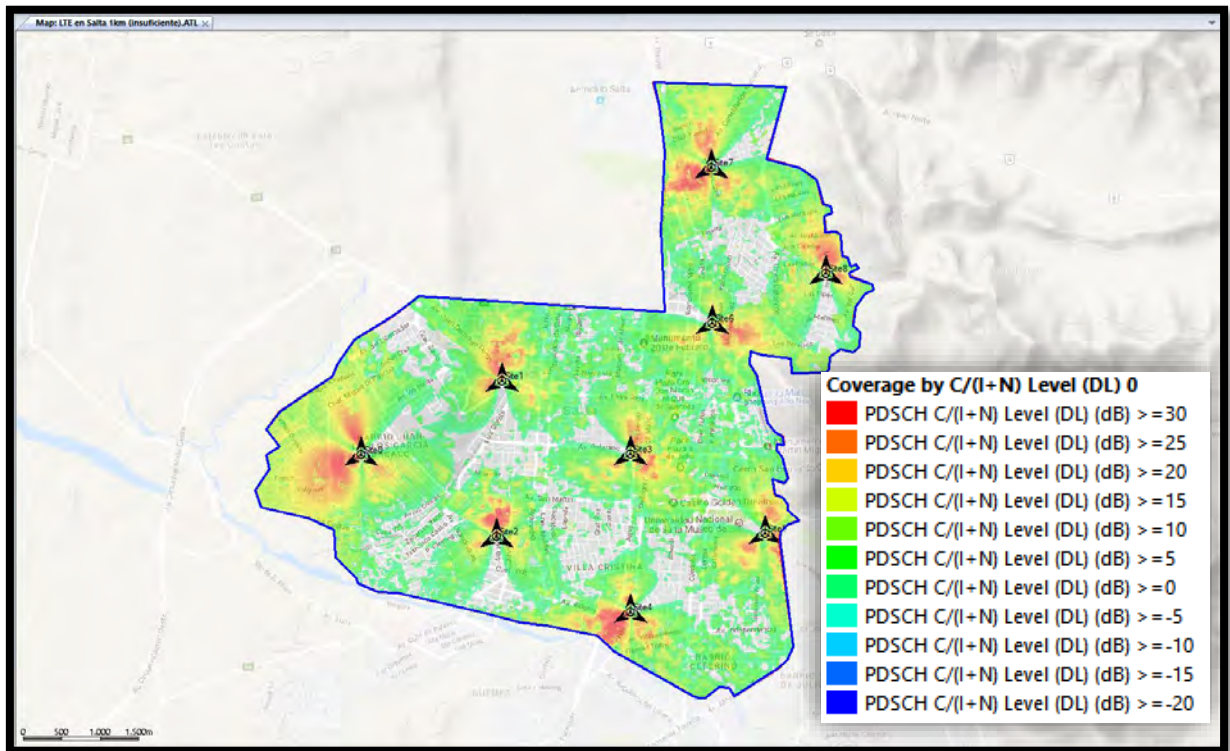


Imagen 6-11 Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)

Al sumar las distribuciones, encontramos que sólo el 42.46% del terreno accede a valores de C/(I+N) mayores a 10 dB, condición necesaria para el buen funcionamiento del sistema LTE.

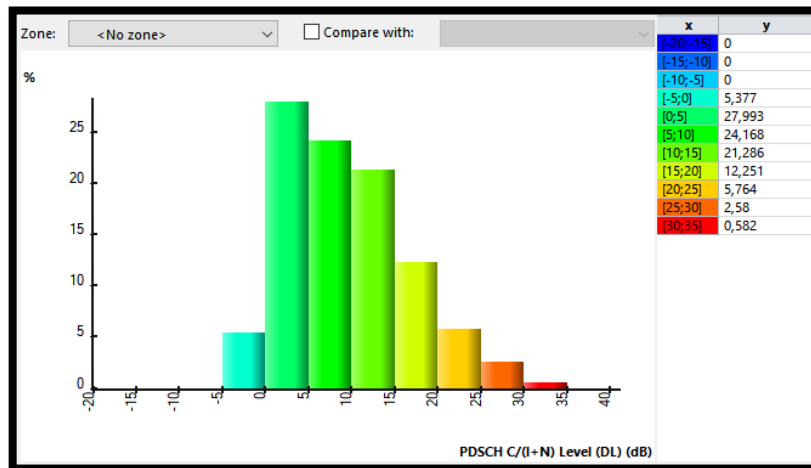


Imagen 6-12 Histograma de Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)

6.1.5. Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)

Al realizar la misma predicción del lado del Uplink, se consiguen valores mejores:

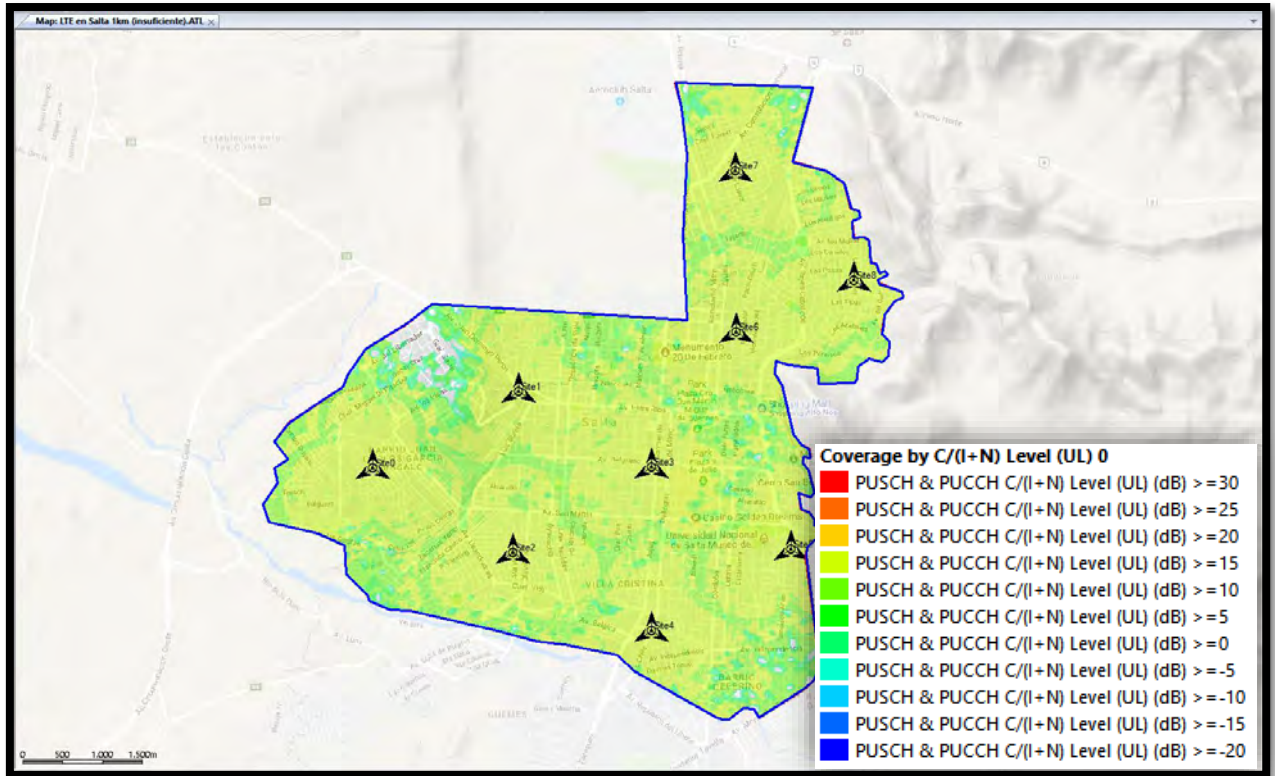


Imagen 6-13 Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)

En este caso el 94.37% del terreno tiene dichos valores condicionantes para LTE. Además, se aprecia una dispersión menor, causada por la menor potencia de los UE.

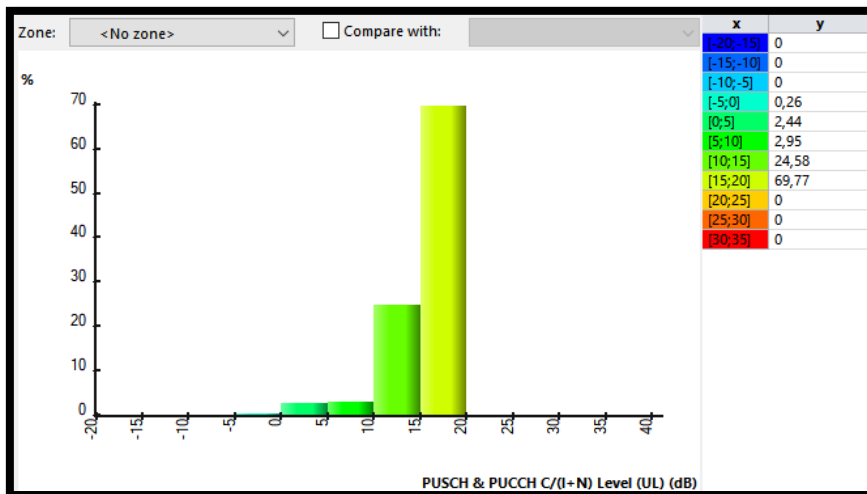


Imagen 6-14 Histograma de Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)

6.1.6. Análisis del Área de Servicio (DL)

Esta predicción es clave ya que forma parte de los objetivos definidos para nuestra red LTE. Las modulaciones QAM que buscamos tienen una alta eficiencia espectral, a costa de la robustez de la señal. Por ese motivo, de acuerdo a las predicciones realizadas sobre los otros parámetros (una cobertura con niveles de señal requeridos sólo al 77% del terreno y una C/(I+N) de más de 10 dB en menos de la mitad del mismo), podemos adelantar que no estaremos cerca de poder cumplirlo. Como se ve en la imagen, existen demasiados huecos donde ni siquiera se consiguen buenas modulaciones con QPSK.

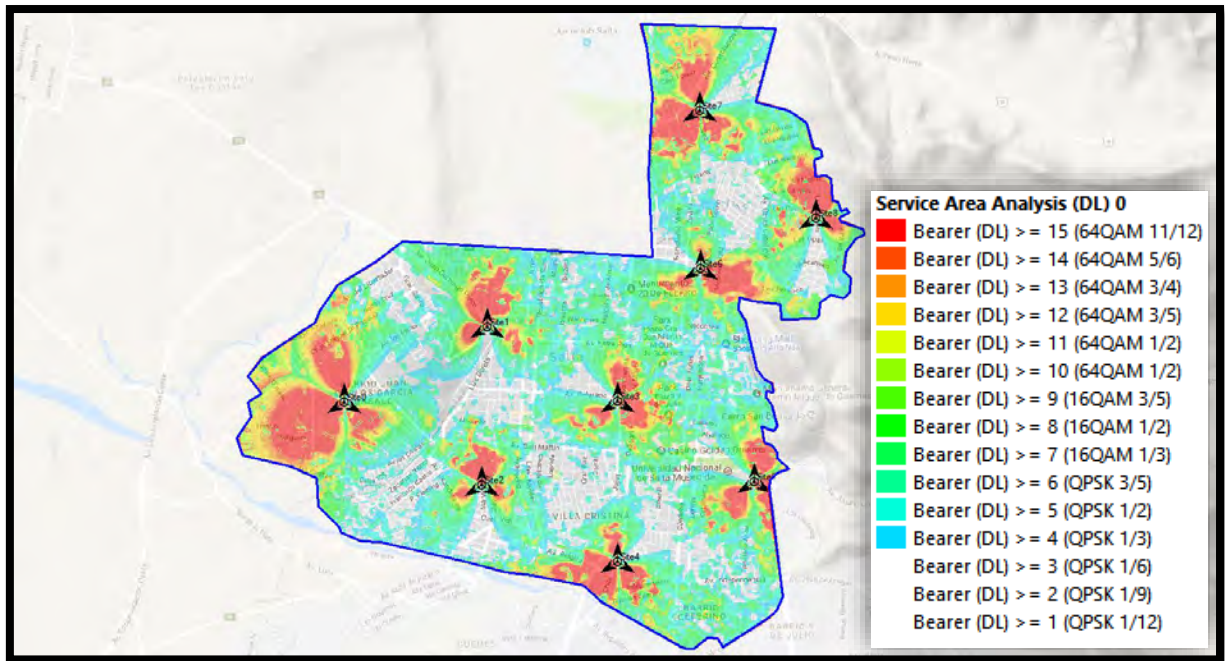


Imagen 6-15 Análisis del Área de Servicio (DL)

Yendo a los valores exactos en nuestro histograma, observamos que sólo el 34,32% del territorio accede a modulaciones 64QAM, extendiéndose este número al 58,45% si consideramos también las modulaciones 16QAM. Resultados muy insatisfactorios en comparación al 85% que pretendemos lograr.

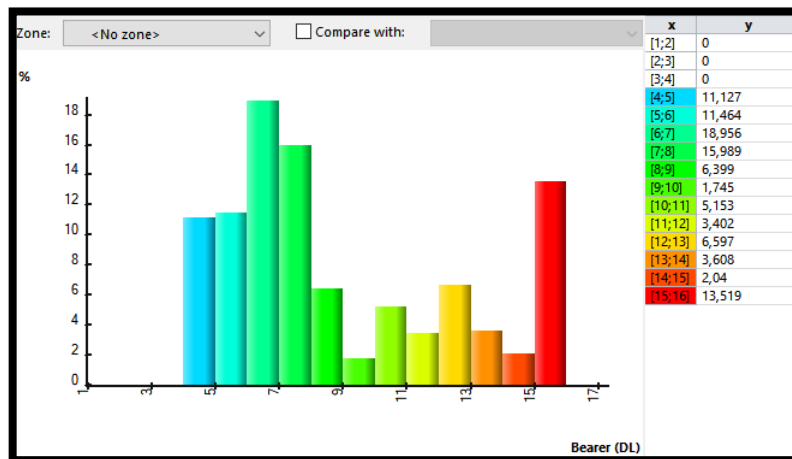


Imagen 6-16 Histograma de Análisis del Área de Servicio (DL)

6.1.7. Análisis del Área de Servicio (UL)

En el caso del Uplink se ve un escenario muy distinto, donde a simple vista se alcanzan las modulaciones pretendidas en casi todo el territorio:

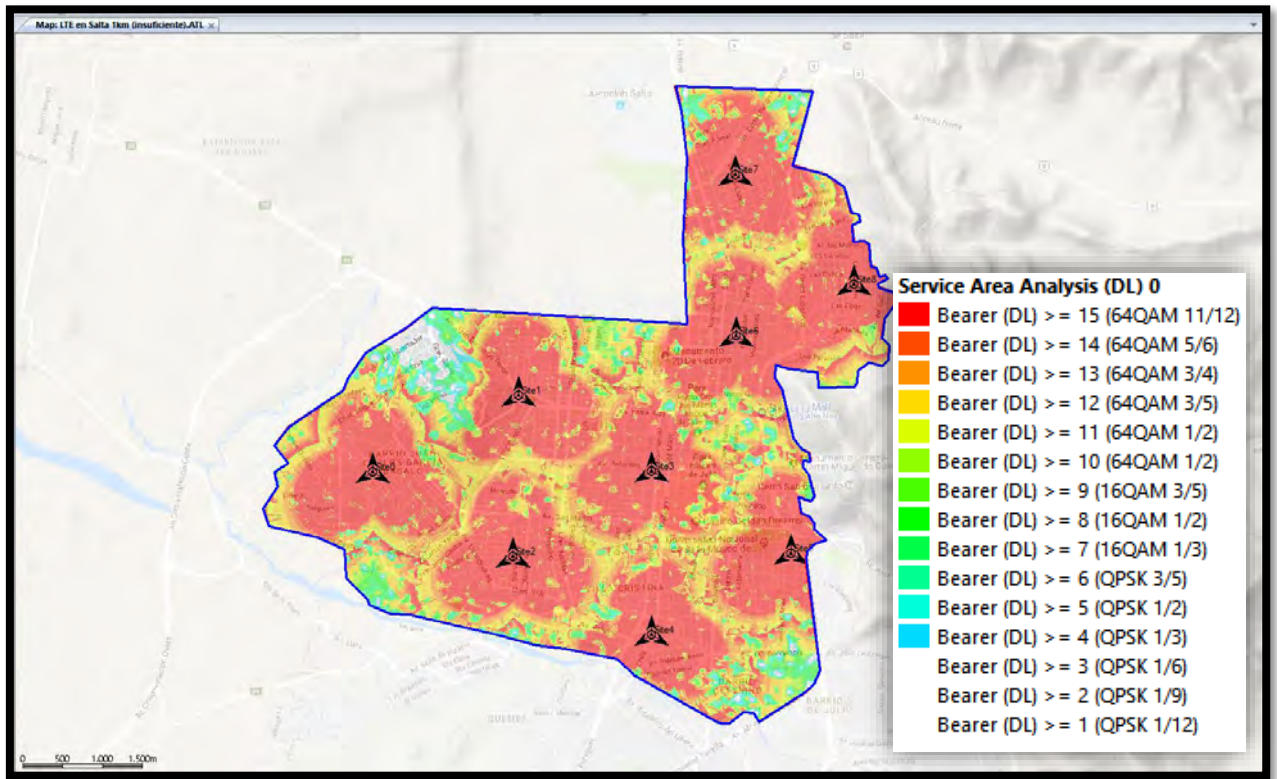


Imagen 6-17 Análisis del Área de Servicio (UL)

En el histograma observamos como ya en la modulación más eficiente se encuentra el 53,45% del terreno, extendiéndose a 91.87% el total de 64QAM y 97.29% incluyendo a 16QAM.

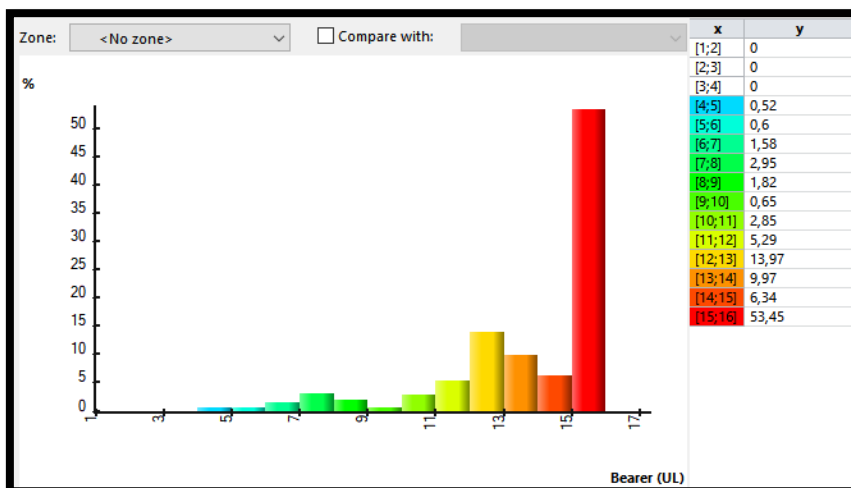


Imagen 6-18 Histograma de Análisis del Área de Servicio (UL)

7. Optimización

Basado en la información analizada y suponiendo que la cobertura o performance planificadas no se alcanzaron, se debe iniciar el proceso de optimización.

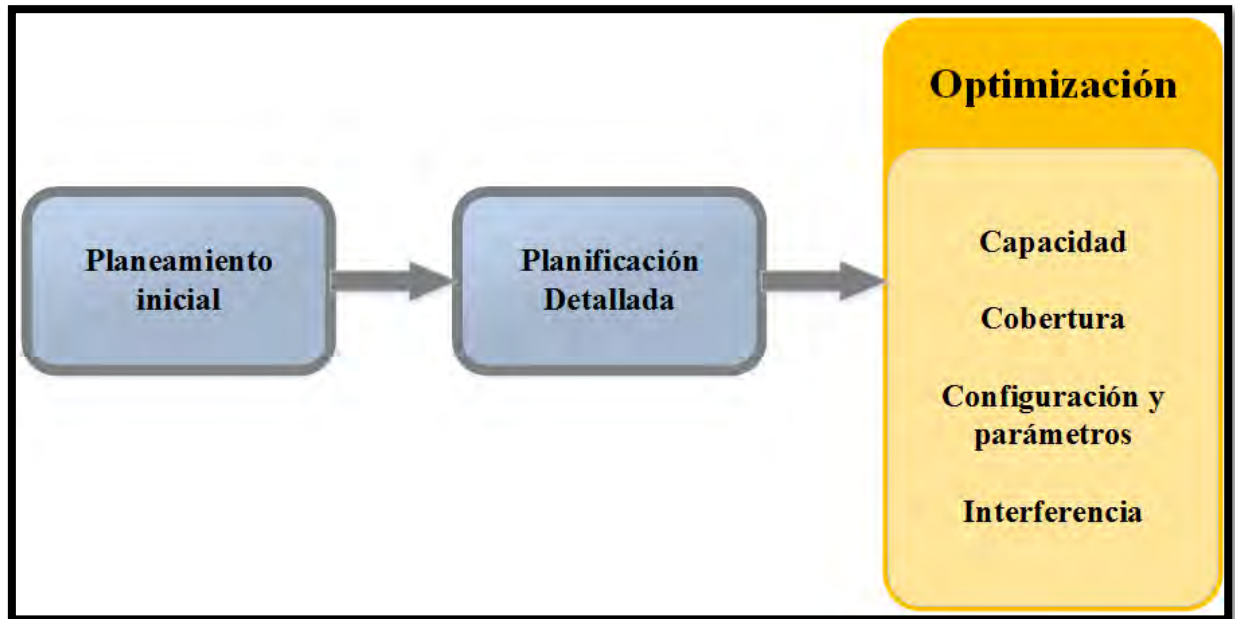


Imagen 7-1 Optimización (3GPP, 2013)

Hay un número de áreas que pueden ser optimizadas, estas incluyen:

- Capacidad.
- Cobertura.
- Configuración y parámetros.
- Interferencia.

Generalmente el proceso de optimización se basa en el análisis de red. Éste se hace juntando estadísticas y resultados medidos del sistema de manejo de la red, así como de pruebas de campo. Esta información permite que la herramienta de optimización proponga cambios y consecuentemente optimice la performance de la red. De una manera similar a la planificación detallada, esto se hará iterativamente hasta que los requerimientos de cobertura, capacidad y calidad se alcancen.

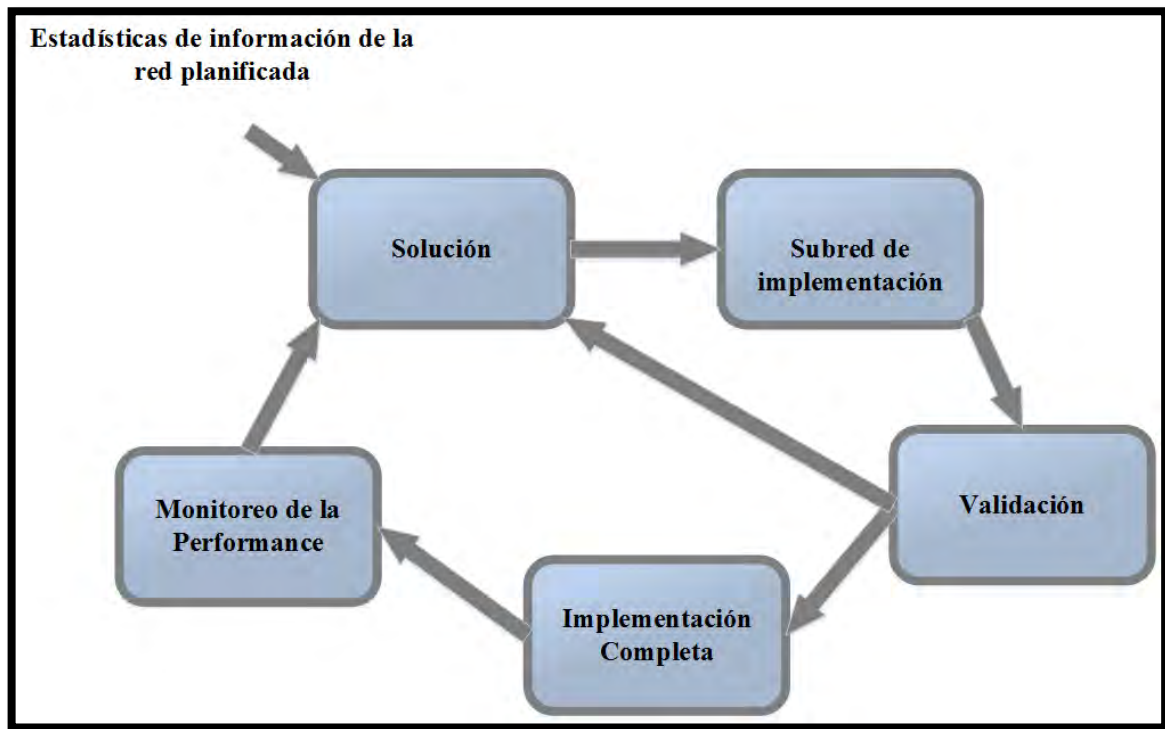


Imagen 7-2 Proceso Simplificado de Optimización (3GPP, 2013)

Como se señaló previamente, el tráfico es un tema clave en el proceso de planificación. Por lo tanto, debe ser considerado continuamente durante las etapas de dimensionamiento, planificación detallada y optimización. Además, como las planificaciones de cobertura y capacidad también están interrelacionadas, la interferencia debe ser considerada en todas las etapas.

8. Rediseño de la Red

Si bien nuestra red es optimizable, el objetivo de este proyecto es, como se aclaró desde un principio, mostrar un despliegue hiperdenso. Por lo tanto, el uso de tan sólo 9 antenas en todo el terreno que queremos cubrir no cumpliría con dicha premisa. Su exposición fue para tener un punto de comparación con la red que se planificará a continuación. Se podrá apreciar que ésta última sólo requerirá de una cantidad mínima de ajustes para su optimización.

8.1.1. Cambio de Banda

Como se observó, los resultados obtenidos distan mucho de los objetivos pretendidos. Al analizar más en profundidad los motivos de la pobre cobertura y aún peor calidad de las transmisiones conseguidas anteriormente, se identifica que el ancho de banda de 20 MHz sobre la banda 4 limita la cantidad de canales de frecuencias disponibles a tan sólo 2, lo que resulta en una interferencia muy alta entre las celdas.

Frequency Band	Channel Number
E-UTRA Band 4 - 20MHz	2.050
E-UTRA Band 4 - 20MHz	2.050
E-UTRA Band 4 - 20MHz	2.250

Imagen 8-1 Canales de Banda 4

Luego de esto se decide cambiar la banda de frecuencias LTE seleccionadas a la número 7, con un ancho de banda de 10 MHz, lo cual nos asegura 7 canales para distribuir en las distintas celdas.

Banda de Operación	Enlace Ascendente Uplink (UL) Radio Base Recibe Terminal Transmite	Enlace Descendente Downlink (DL) Radio Base Transmite Terminal Recibe	Separación Duplex (MHz)
	$F_{UL_baja} - F_{UL_alta}$	$F_{DL_baja} - F_{DL_alta}$	
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	120

Imagen 8-2 Banda 7 (ENACOM, Norma Técnica ENACOM-Q2-61.04 V17.1, 2017)

Frequency Band	Channel Number
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.300
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2.800
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2.900
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.000
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.100
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.200
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.300
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.400
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.000
E-UTRA Band 7 - 10MHz	2.800
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.100
E-UTRA Band 7 - 10MHz	3.300

Imagen 8-3 Canales de Banda 7

8.1.2. Cambio de Antena

También es necesario cambiar la antena por una del rango de frecuencias de la banda seleccionada. En la imagen se observa también el cambio de altura efectuado, cuyo motivo se explicará luego:

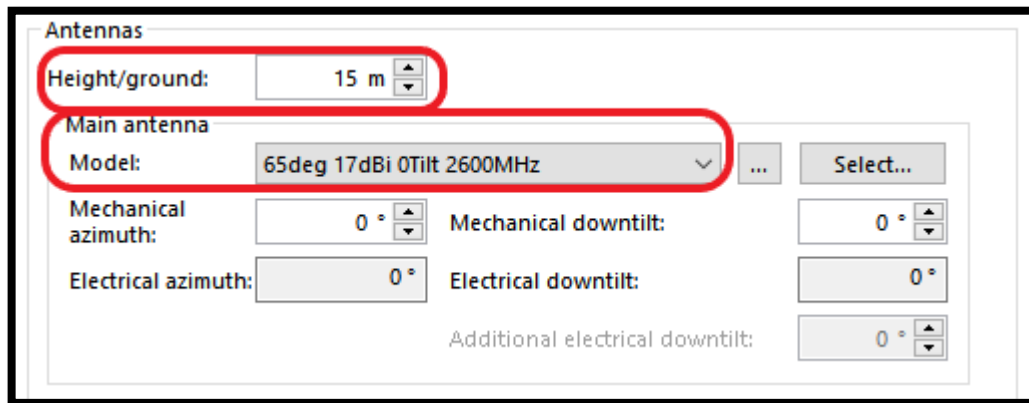


Imagen 8-4 Configuración de Nueva Antena

Se vuelven a adjuntar los datos de tipo, patrón de irradiación y tilt eléctrico de la antena seleccionada:

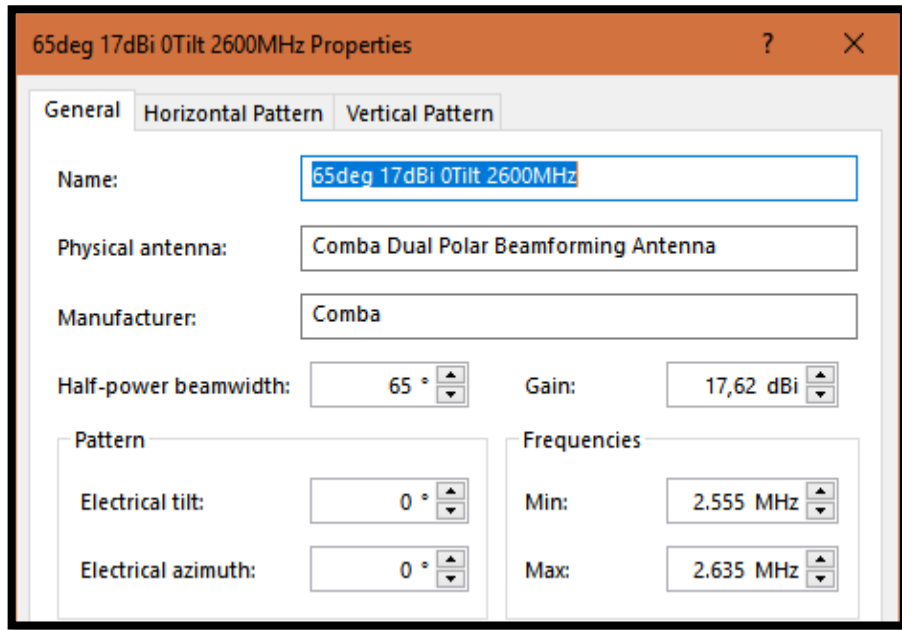


Imagen 8-5 Propiedades de Nueva Antena

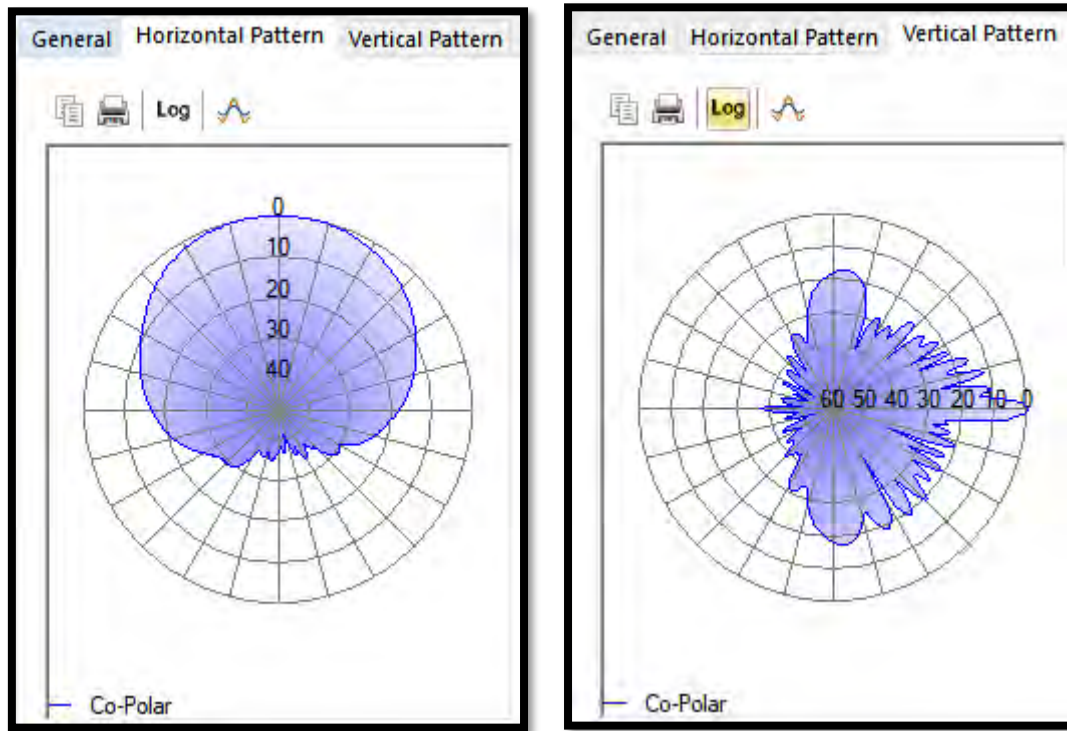


Imagen 8-6 Patrones de Radiación de Nueva Antena

8.1.3. Recalculo de Link Budget

$$L_u = 69.55 + 26.16 \cdot \log(f) - 13.82 \cdot \log(h_B) - C_H + [44.9 - 6.55 \cdot \log(h_B)] \cdot \log(d)$$

h_B : Altura de Antena de Estación Base (m)

f : Frecuencia (MHz)

C_H : Factor de corrección de la antena (dB)

D : Distancia entre la estación base y el móvil (km)

Si aplicamos nuestros nuevos valores elegidos ($f=2600\text{MHz}$, $h_B=15\text{m}$ y $d=1\text{Km}$) nos queda lo siguiente:

$$L_u = 69.55 + 26.16 \cdot \log(2600\text{MHz}) - 13.82 \cdot \log(15\text{m}) - 0\text{dB} + [44.9 - 6.55 \cdot \log(15\text{m})] \cdot \log(1\text{Km})$$

$$L_u = 142,63 \text{ dB}$$

Transmitter Power Output:	46	dBm
Transmitter Antenna Gain (dBi):	17	
Transmitter Loss (dB):	0	
Free Space Path Loss (dB):	142.63	
Miscellaneous Loss (dB):	0	
Receiver Antenna Gain (dBi):	0	
Receiver Loss (dB):	4	
Calculate		
Result:	Received Power: -83.63 dBm	

Imagen 8-7 Resultado de Nuevo Link Budget

8.1.4. Colocación de Sitios

Basados en el *Link Budget* y con el fin de mejorar nuestra red, se decide reducir el radio de cobertura de cada sitio a la mitad, resultando en una distancia entre sitios de 1 km.

Al ser un proyecto académico cuyas dimensiones son acotadas y nuestro costo asociado no es monetario, vamos a implementar los cambios en toda la red, saltando el paso de una subred. Esto aumenta considerablemente la cantidad de sitios en la zona, pasando de 9 a 41,

como se ve en la siguiente imagen, con su consecuente interferencia intercelda incrementada, motivo por el cual se redujo la altura de las torres y antenas a 15 m, en comparación a los 30 m anteriores. Se empieza a ver una densificación de la red, en línea con la tendencia de las tecnologías.

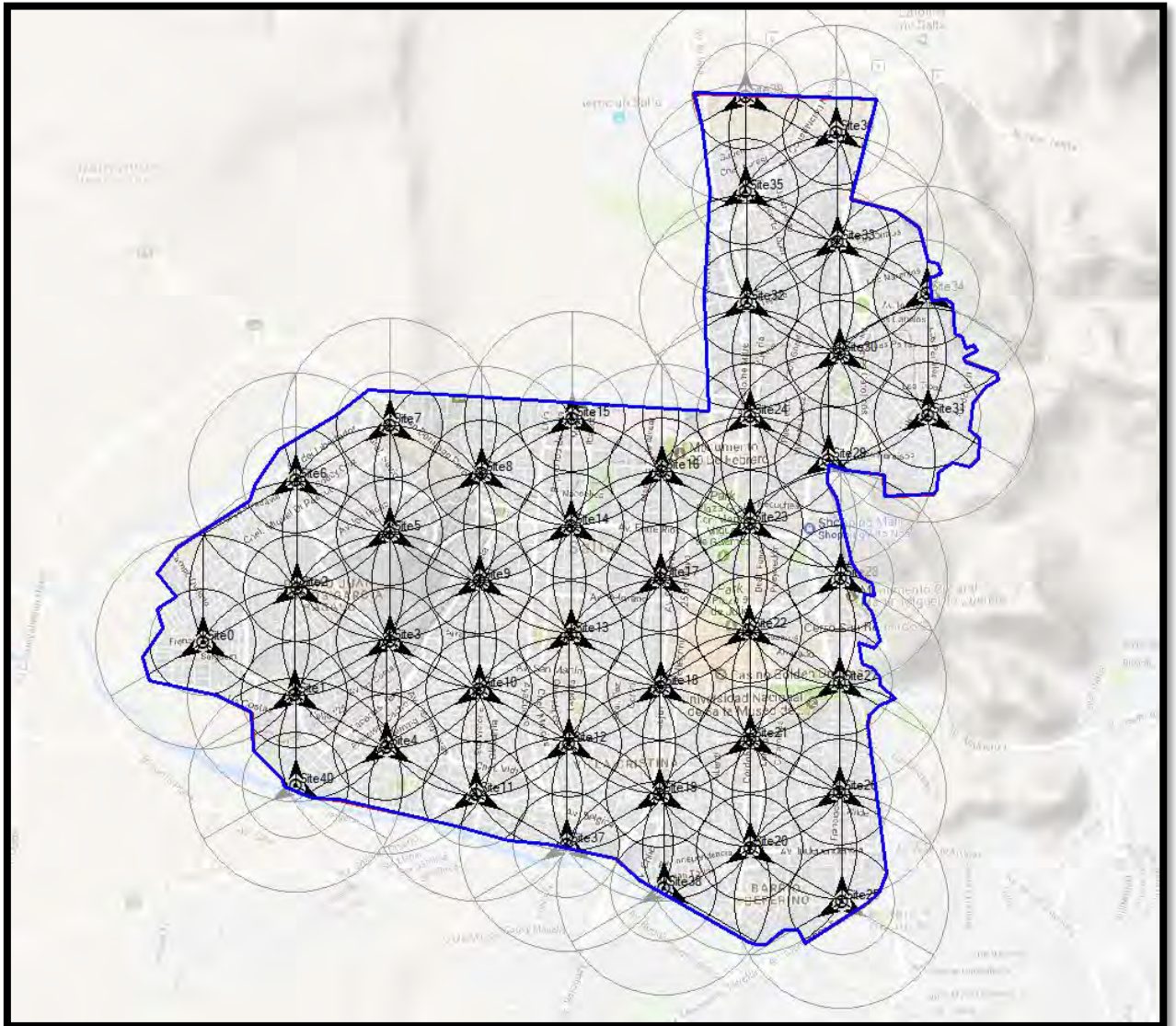


Imagen 8-8 Radiobases - Banda 7 - 15 m.

Es un dato importante de referencia el que expusimos al principio de la planificación, en el que se veía que la empresa Telecom posee en la misma zona 40 sitios. Si bien tienen una distribución distinta y más real en cuanto a disponibilidad de espacios, no deja de indicarnos que nuestra red es factible en términos económicos y de dimensionamiento.

Una vez hecho esto, se vuelven a correr los procedimientos de *asignación automática de celdas vecinas*, *asignación automática de frecuencias* y *asignación automática de Physical Cell IDs* tal como se hizo en el caso anterior.

8.2. Predicciones Banda 7 – Altura = 15m

Teniendo la red lista y optimizada, se corren las predicciones obteniendo los siguientes valores:

8.2.1. Cobertura por Nivel de Señal (DL)

Empezando con nuestras nuevas predicciones, observamos como mejoró el nivel de señal en toda la zona, predominando la referencia que nos indica valores alrededor de -80 dBm.

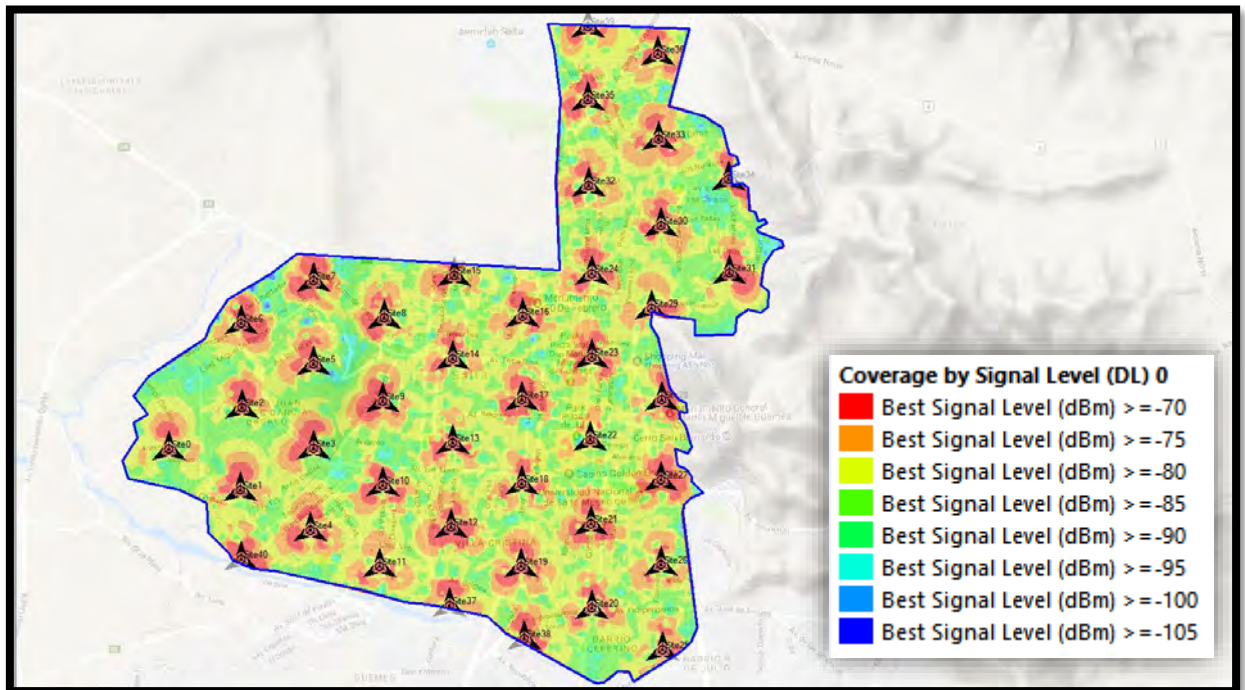


Imagen 8-9 Cobertura por Nivel de Señal (DL)

En el histograma accedemos a los valores exactos, donde vemos que el porcentaje de terreno con más de -90 dBm asciende a 98,6%, en comparación al 77,76% de las predicciones anteriores.

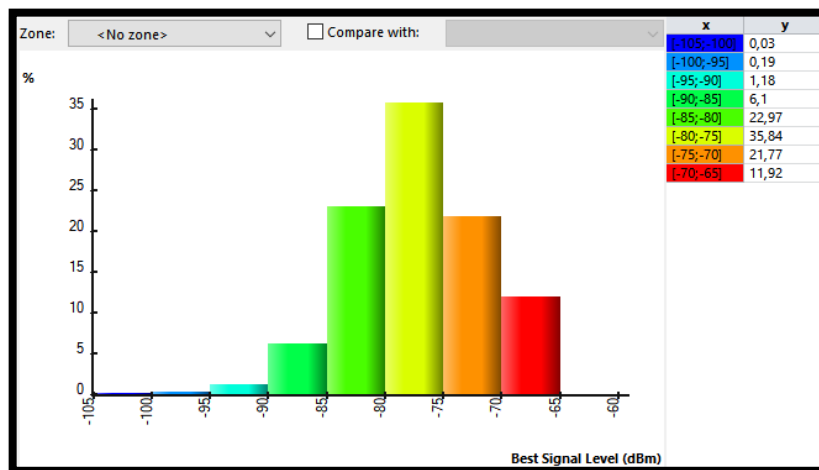


Imagen 8-10 Histograma de Cobertura por Nivel de Señal (DL)

8.2.2. Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)

Pasando a la señal efectiva de los canales compartidos, observamos que el PDSCH también mejoró su nivel a valores mayores a los necesarios pero que, como se recuerda, finalmente veían su performance opacada por un bajo C/(I+N). Por lo tanto, estos niveles serán necesarios para cumplir nuestros objetivos.

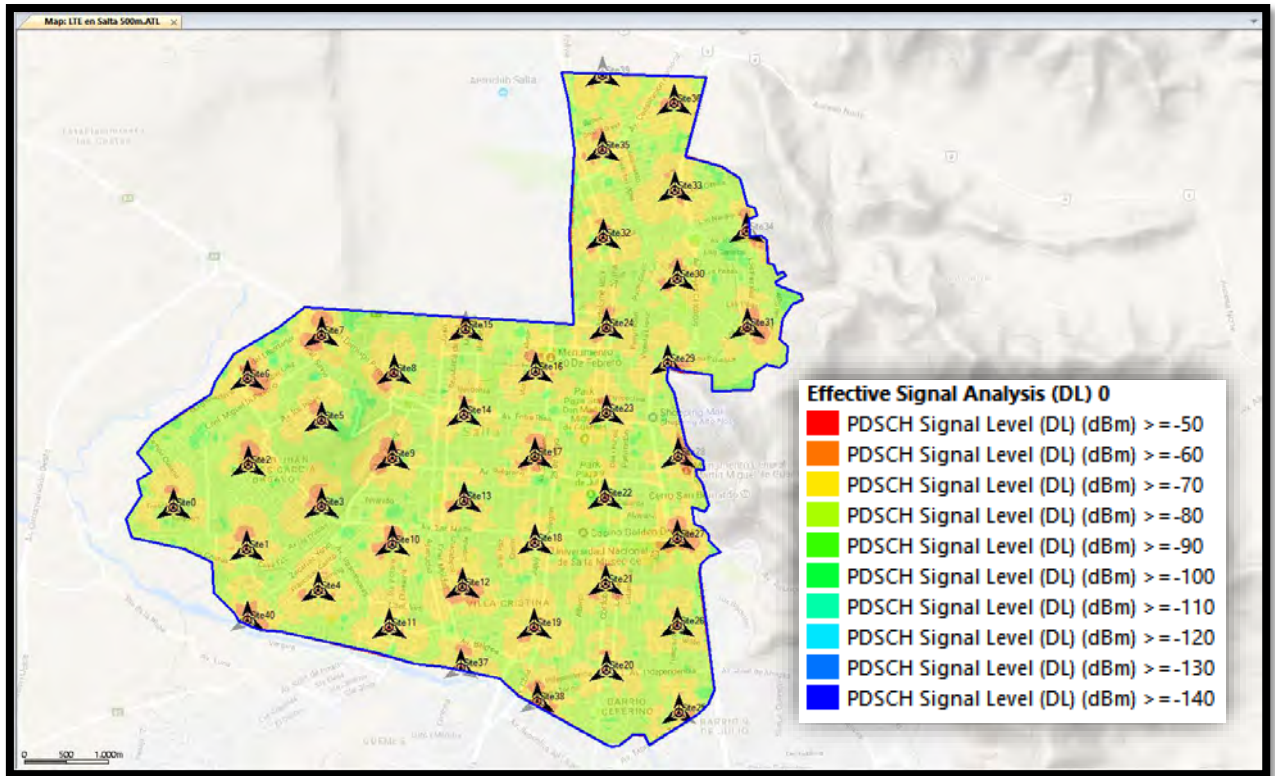


Imagen 8-11 Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)

En comparación al 92,4% de territorio cubierto en el caso anterior, esta predicción aumenta nuestra eficiencia a un 99,99%.

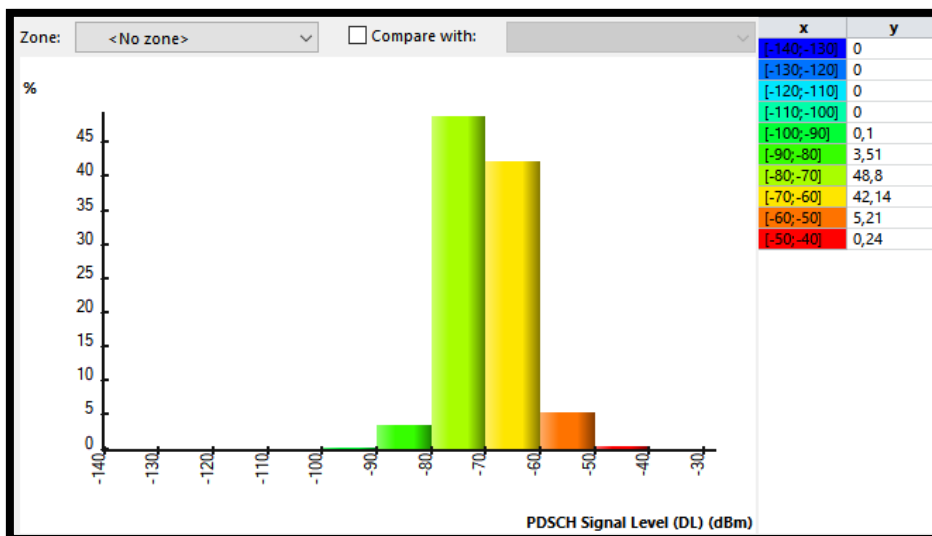


Imagen 8-12 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PDSCH (DL)

8.2.3. Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)

En el caso de los canales PUSCH y PUCCH ya habíamos conseguido excelentes valores en las predicciones anteriores, aunque se podía ver una zona en la parte Noroeste de la ciudad que tenía niveles bajos. En la imagen actual esa zona se encuentra con muy buen nivel de señal, al mismo tiempo que, en general se aprecia una mejora.

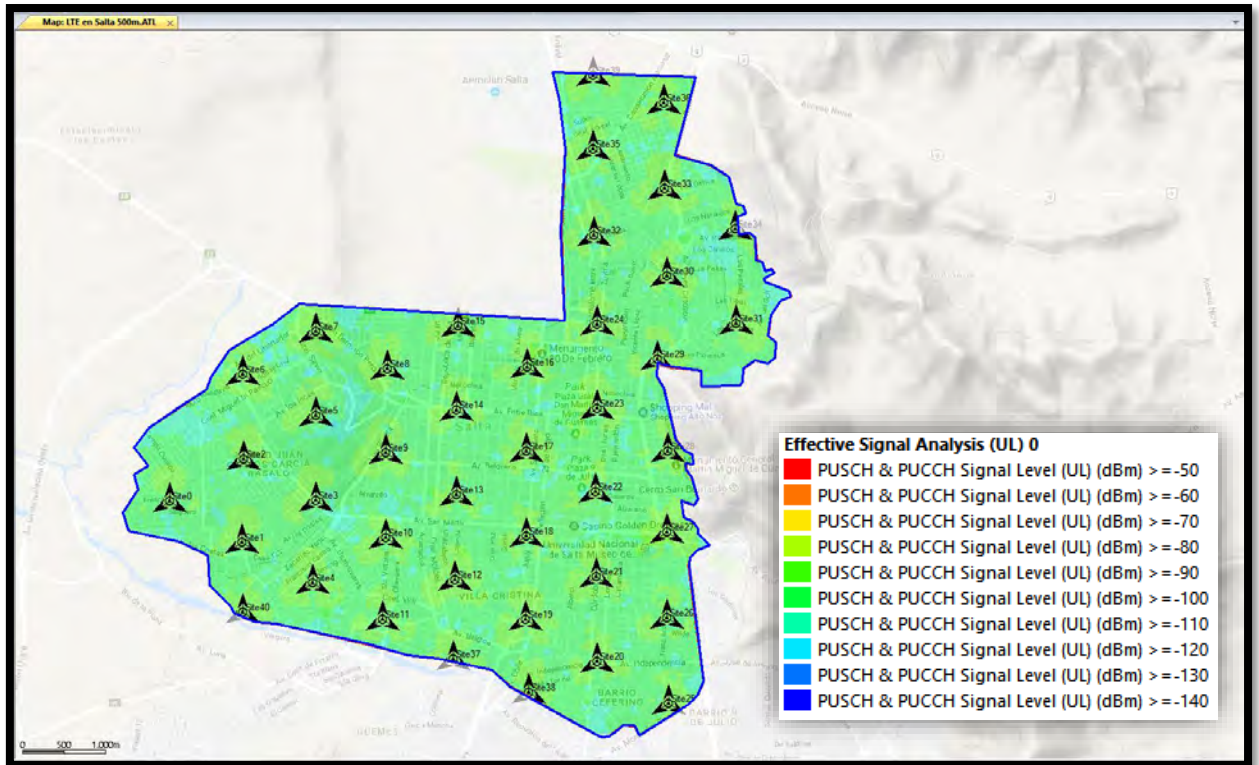


Imagen 8-13 Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)

Sumando los valores distribuidos en el histograma nos encontramos con que el 99.72% del terreno supera los -110 dBm de señal en los canales compartidos del Uplink, en contraste con el 87.75% del diseño anterior.

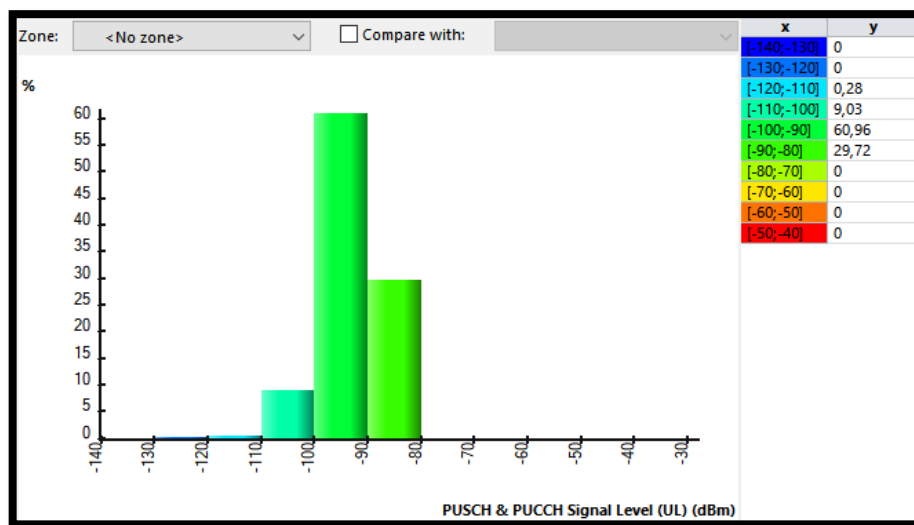


Imagen 8-14 Histograma de Análisis de Señal Efectiva de PUSCH & PUCCH (UL)

8.2.4. Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)

Llegamos a un punto crítico en las predicciones, ya que el resultado de la cobertura por nivel de PDSCH considerando C/(I+N) fue probablemente el condicionante y responsable de que no hayamos podido alcanzar los objetivos.

En este caso podemos ver que los valores aumentaron considerablemente, sin tener prácticamente zonas con menos de -5 dB.

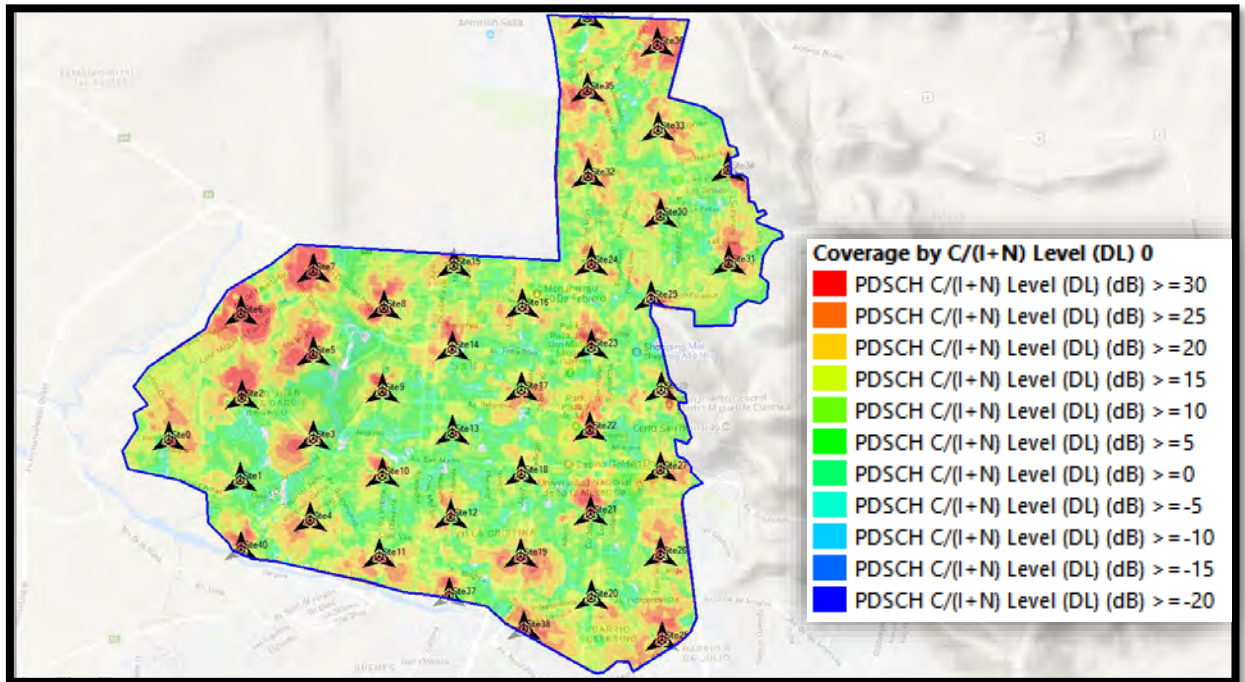


Imagen 8-15 Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)

En el histograma vemos que las zonas mayores a 10 dB equivalen al 75.46% del terreno. Una mejora sustancial si la comparamos con el 42.46% obtenido en la etapa previa. Además, se aprecia que, al aumentar en general los valores, alcanzamos grandes zonas con una C/(I+N) de 35 dB.

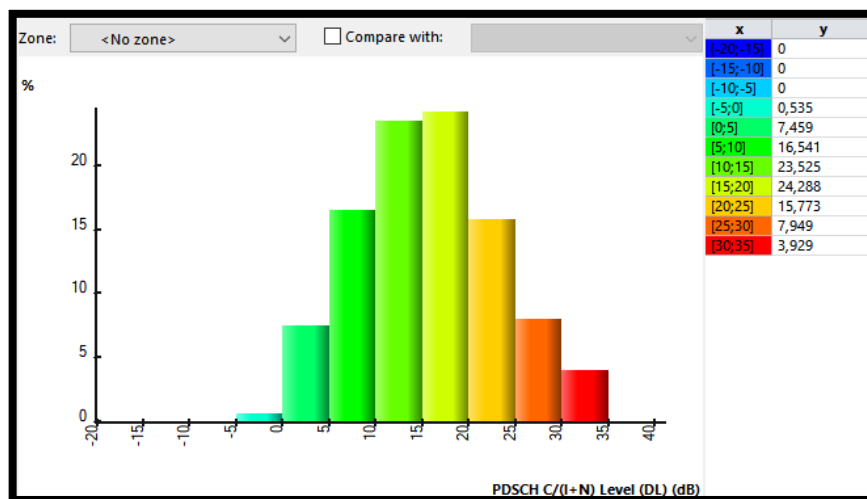


Imagen 8-16 Histograma de Cobertura por nivel de PDSCH C/(I+N) (DL)

8.2.5. Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)

Para el Uplink la imagen es similar, manteniendo valores, pero con una uniformidad casi perfecta a lo largo de todo el territorio.

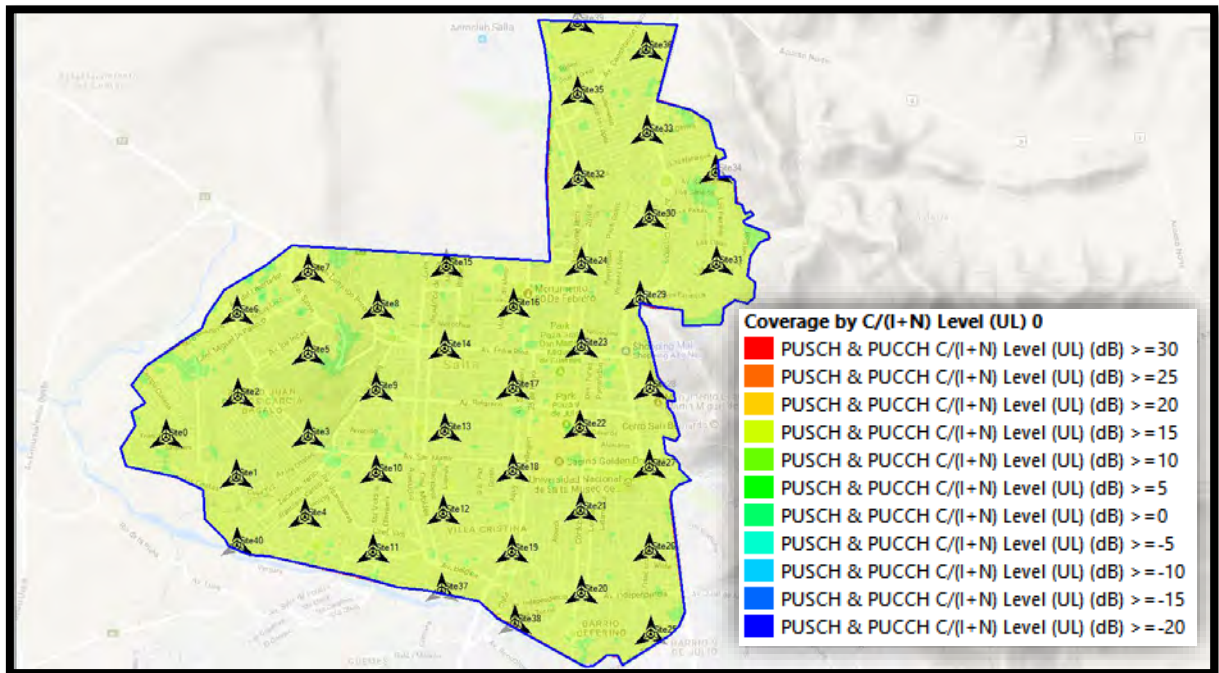


Imagen 8-17 Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)

En números observamos que la zona con excelentes relaciones a interferencia y ruido aumenta asintóticamente hasta el 99.86% del total (94.37% en el diseño anterior). Pero se destaca que la dispersión de valores es menor, encontrándose casi el 95% con valores de C/(I+N) entre 15 dB y 20 dB. Este valor no aumenta más porque como dijimos anteriormente, el Uplink se encuentra mucho más limitado en potencia que el Downlink.

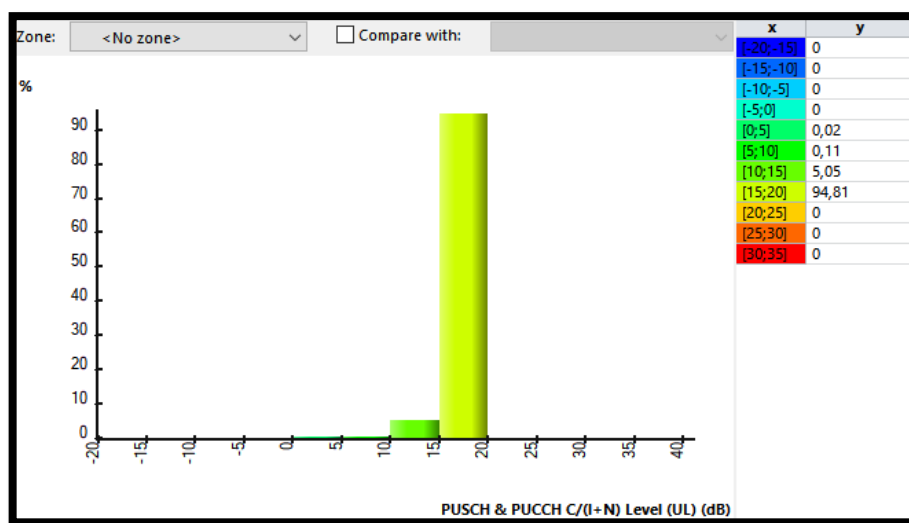


Imagen 8-18 Histograma de Cobertura por nivel de PUSCH & PUCCH C/(I+N) (UL)

8.2.6. Análisis del Área de Servicio (DL)

En esta predicción podemos esperar un resultado mucho mejor si nos basamos en la mejora de los valores del PDSCH C/(I+N).

Al analizar la imagen vemos que ahora todas las zonas se encuentran cubiertas, y un gran porcentaje de ellas en colores rojizos, lo que se traduce en una eficiencia espectral muy alta y, por lo tanto, altas velocidades para los usuarios.

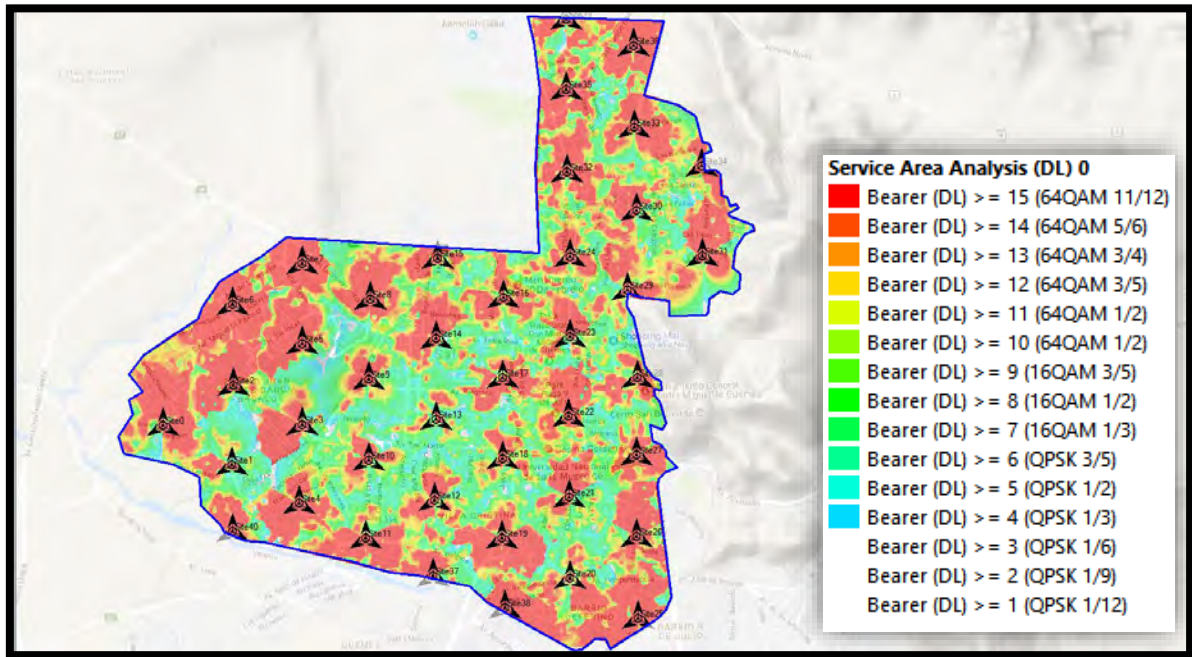


Imagen 8-19 Análisis del Área de Servicio (DL)

Se aprecia una gran mejora en cuanto a terreno cubierto con modulaciones QAM, siendo el porcentaje que tiene 64QAM de 67.3%. Este número asciende a 87.7% si sumamos también el porcentaje cubierto por 16QAM.

Vemos que finalmente en este punto hemos alcanzado el otro objetivo propuesto, de proveer modulaciones QAM a por lo menos el 85% del territorio.

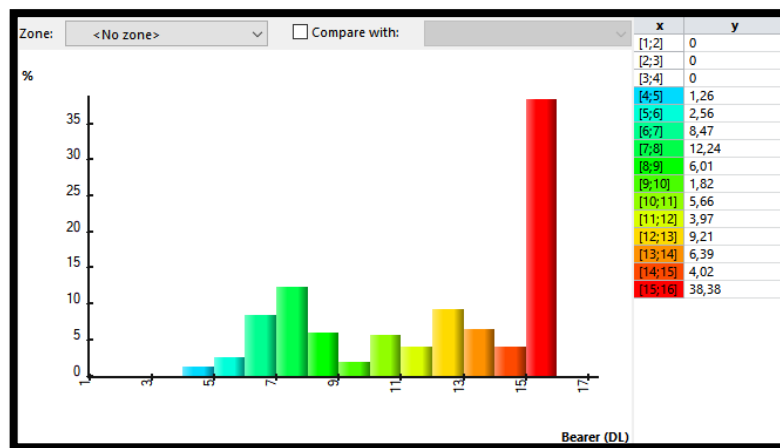


Imagen 8-20 Histograma de Análisis del Área de Servicio (DL)

8.2.7. Análisis del Área de Servicio (UL)

Como habíamos visto anteriormente, ya se alcanzaban muy buenos servicios en casi todo el territorio, y como es de esperarse, en la siguiente imagen esos resultados inclusive mejoraron.

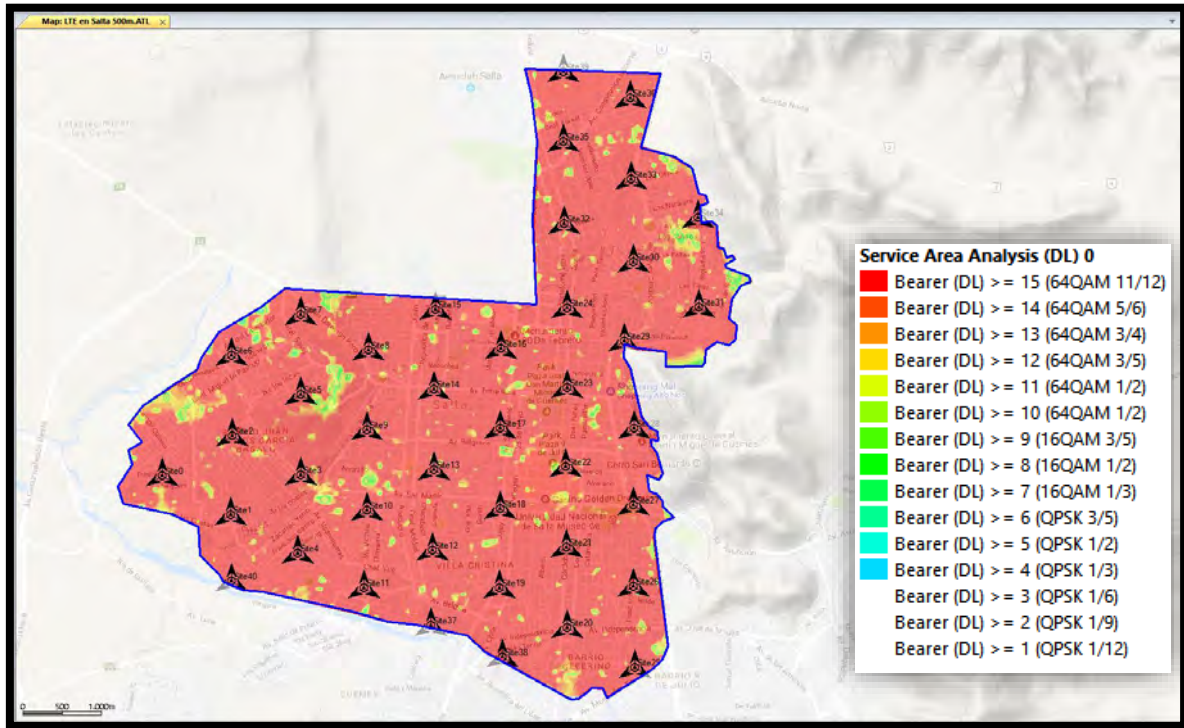


Imagen 8-21 Análisis del Área de Servicio (UL)

Se otorga modulaciones QAM al 99,98% del territorio.

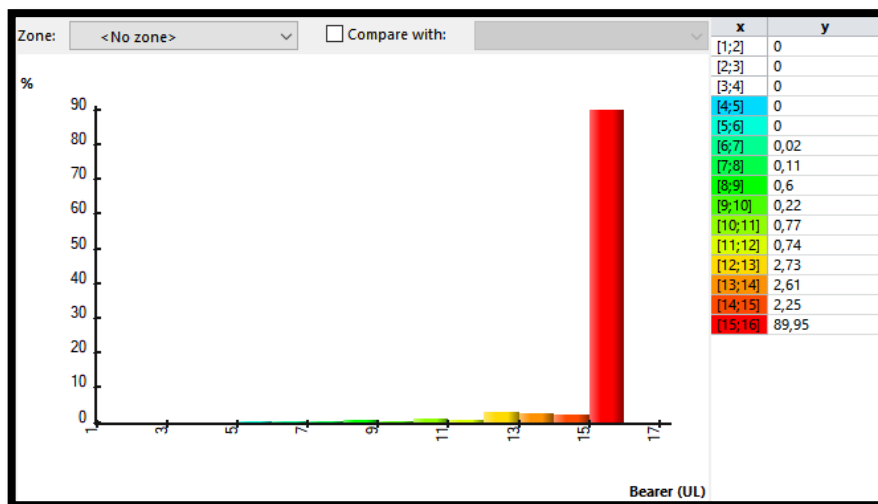


Imagen 8-22 Histograma de Análisis del Área de Servicio (UL)

8.3. Simulaciones de Monte Carlo

8.3.1. Mapas de Tráfico

Los mapas de tráfico nos determinan cuantos usuarios se generan en cada zona del mapa y de qué perfil son. En nuestro programa se pueden definir tres tipos de mapas de tráfico. Para crear cada uno hay que dirigirse a la pestaña *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, la opción que vamos a utilizar es con los mapas del tipo *User profile*, que se basa en datos estadísticos de perfiles de usuario (*User Profiles*) 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.

8.3.2. Polígonos de Mapas de Tráfico

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.

En nuestro caso, hemos creado en el capítulo de Planificación los distintos *Environments* basándonos en la zonificación y uso de suelos. Dichos entornos se detallan a continuación y se utilizan para definir nuestro mapa de tráfico.

Name: R1 (Residencial Alta Densidad)			
User profiles:			
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)	
Business User	Pedestrian	900	
Standard User	Pedestrian	1.000	

Name: R2 (Residencial Media Alta Densidad)			
User profiles:			
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)	
Business User	Pedestrian	600	
Standard User	Pedestrian	1.000	

Name: R3 (Residencial Media Densidad)			
User profiles:			
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)	
Business User	Pedestrian	250	
Standard User	Pedestrian	750	

Name: R4 (Residencial Media Baja Densidad)			
User profiles:			
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)	
Business User	Pedestrian	100	
Standard User	Pedestrian	500	

Name: R5 (Residencial Baja Densidad)			
User profiles:			
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)	
Business User	Pedestrian	25	
Standard User	Pedestrian	225	

Name: M3 (Mixto Residencial - Comercial)			
User profiles:			
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)	
Business User	Pedestrian	800	
Standard User	Pedestrian	400	

Imagen 8-23 Configuración de Ambientes de Trafico

Como se observa a continuación, hemos copiado los polígonos disponibles en el documento de zonificación de la municipalidad de Salta.

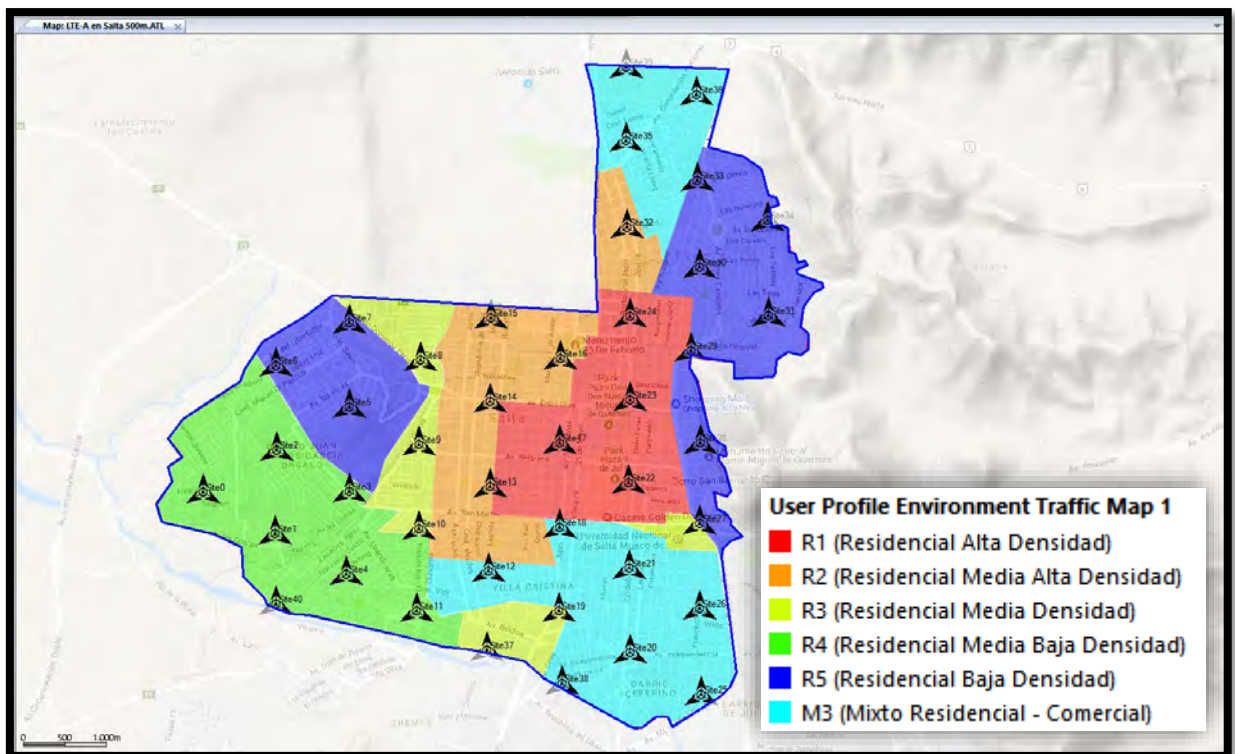


Imagen 8-24 Poligonos de Tráfico

8.3.3. Creación de Simulaciones

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 usuarios LTE. Se trata de una instantánea de la red. 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 con el mapa de tráfico y siguiendo una distribución de Poisson. A continuación, el programa inicia un proceso iterativo, donde en cada paso se selecciona a un usuario sobre el mapa.

Para realizar la simulación hay que dirigirse a la pestaña *Network*, luego a la carpeta *Simulations/New*. A continuación, se abre una ventana de propiedades de simulación en la que se define el grupo correspondiente. En nuestro caso es el *Group 1*, donde decidimos realizar 30 simulaciones como se ve en la siguiente imagen.

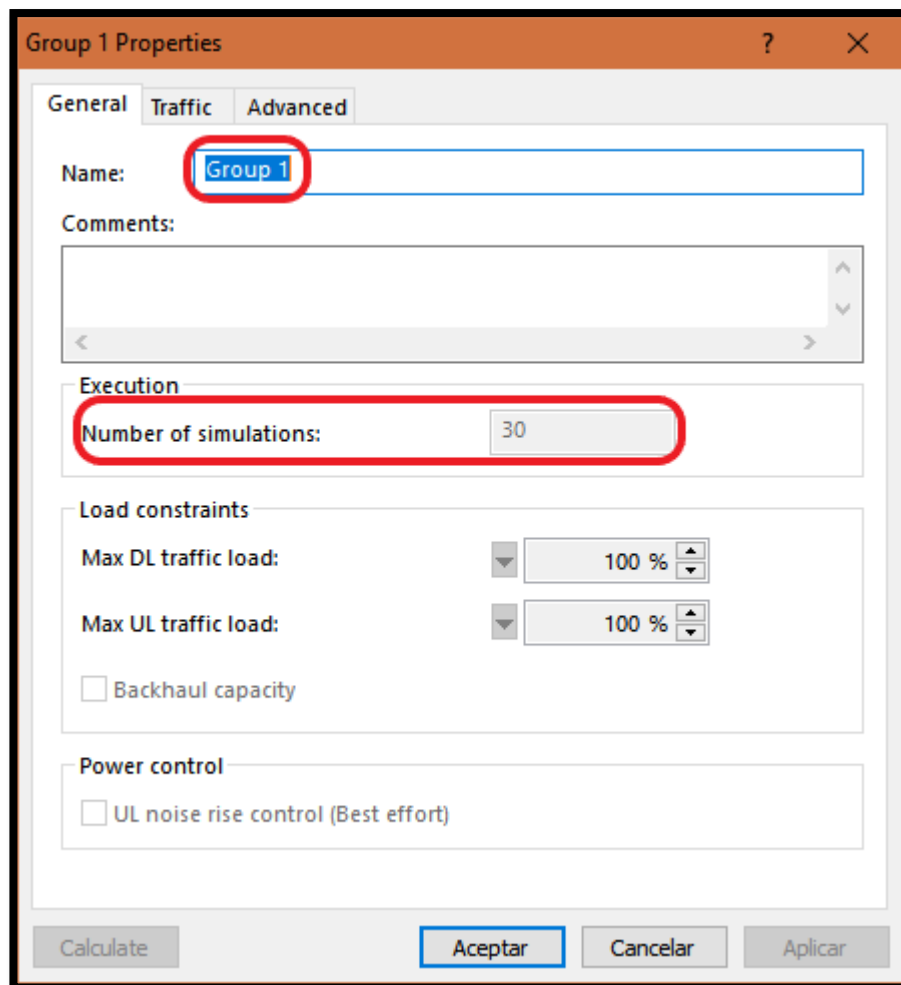


Imagen 8-25 Creación de Group 1 de Simulaciones

También es posible configurar que tipo de información vamos a obtener. Por defecto vemos el *Connection Status*, cuyo resultado veremos a continuación.

8.3.4. Resultados de Simulaciones

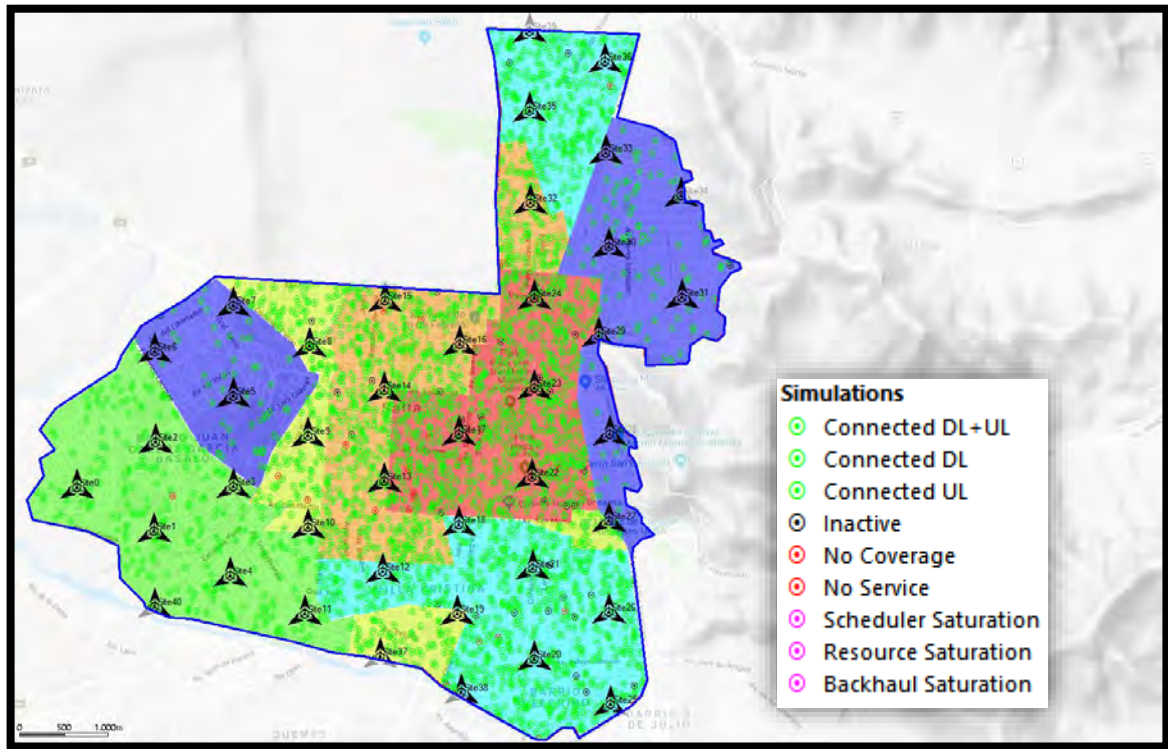


Imagen 8-26 Resultado de Simulaciones de Monte Carlo para Group 1

Como se aprecia visualmente, casi todo el mapa se encuentra con usuarios en verde, lo que implica que casi no hubo personas que no hayan tenido cobertura o servicio debido a una saturación. Se aclara que la información mostrada en pantalla corresponde a sólo una de las 30 simulaciones, ya que es representativa del total y si colocáramos todas al mismo tiempo, sería difícil distinguir el mapa. El detalle de dicha simulación se adjunta en esta imagen:

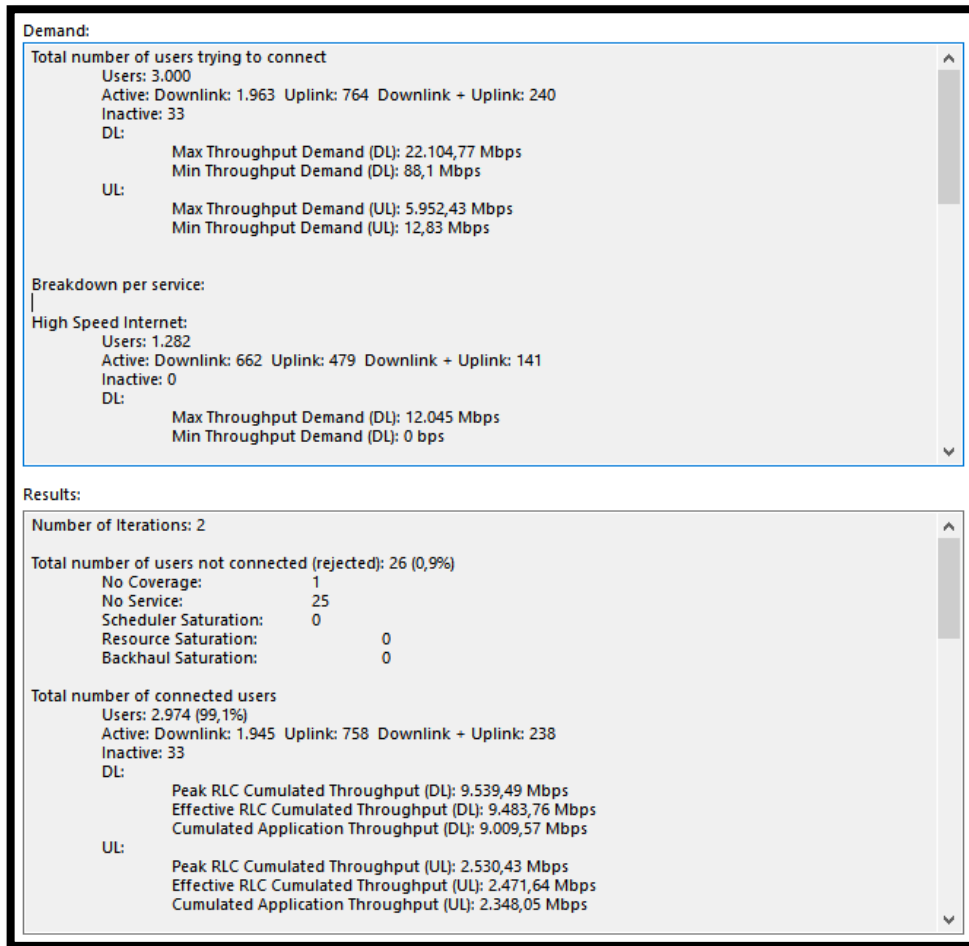


Imagen 8-27 Detalle de Resultado de Simulaciones de Monte Carlo para Group 1

Tal como se intuye en la imagen, la cantidad de usuarios no conectados es mínima, 26 de 3000, indicándonos una red prácticamente ideal.

Con la única intención de mostrar las posibilidades de análisis que se tienen con una herramienta como ésta, a continuación, se ven los resultados de las mismas simulaciones, pero indicando el tipo de servicio que cada usuario quiso utilizar. No se profundizará en sus detalles.

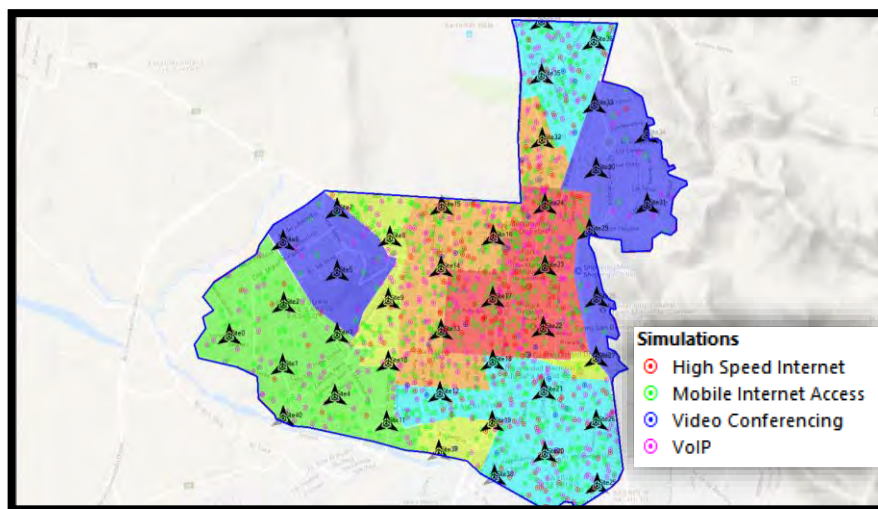


Imagen 8-28 Resultado de Tipos de Servicio

8.4. Predicciones Basadas en Simulaciones

Como último análisis realizaremos las predicciones de Análisis de Área del Servicio y *Throughput* únicamente en el Downlink, cargando previamente los datos de las simulaciones de Monte Carlo para tener una idea de cómo se comporta nuestra red bajo un modelado del tráfico más cercano al real en la ciudad de Salta.

Para cargar las condiciones de las simulaciones, en las propiedades de la predicción, se accede a la pestaña *Conditions*, y en el campo *Load Conditions* se selecciona el grupo de simulaciones.

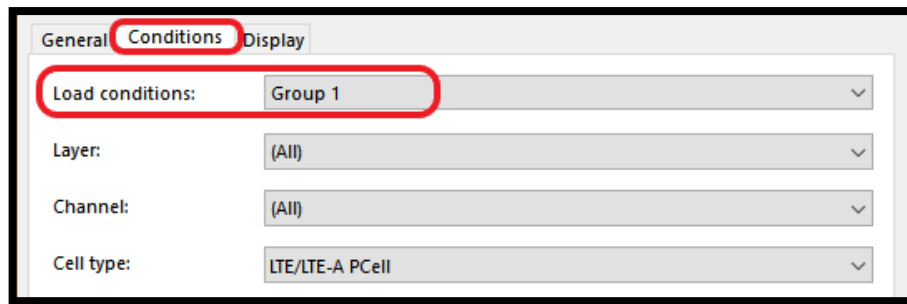


Imagen 8-29 Carga de Group 1 en Condiciones de Predicción

8.4.1. Análisis de Área del Servicio (DL)

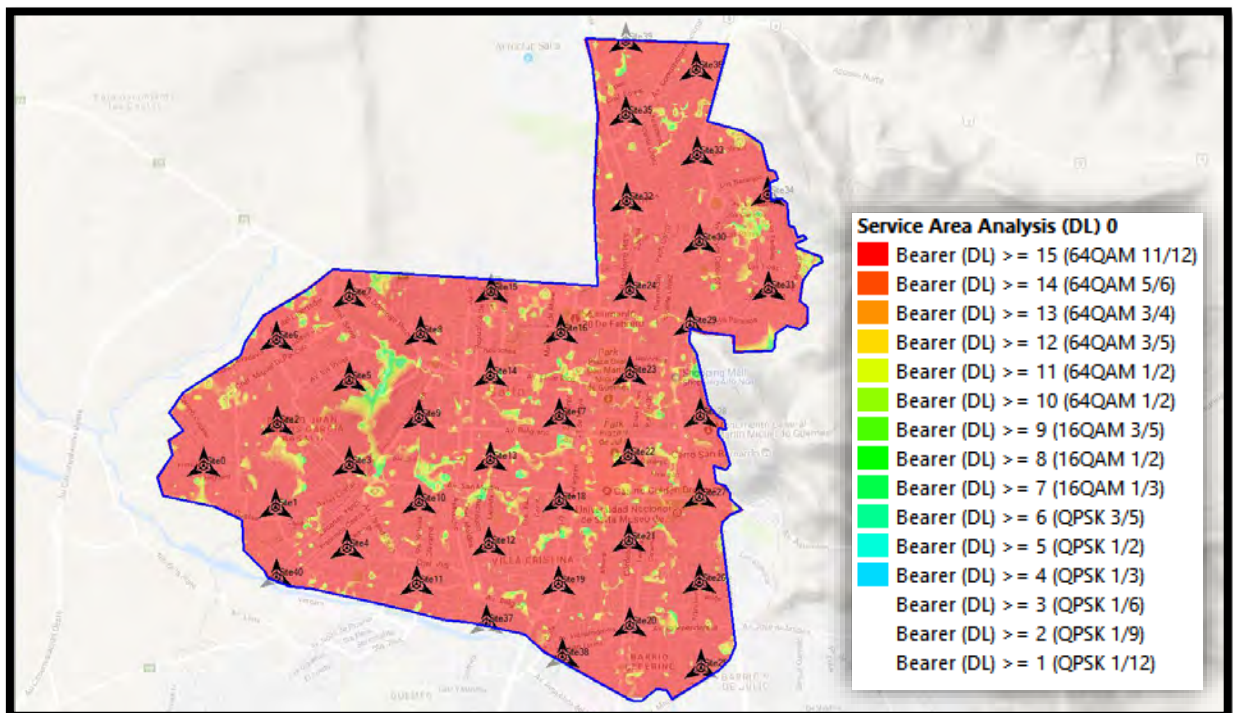


Imagen 8-30 Análisis del Área de Servicio (DL)

Es evidente en comparación a la predicción previa que, basado en la simulación de Monte Carlo, se obtiene un servicio mucho mejor, donde el 99,96% de los usuarios accede a modulaciones

QAM y el 98,93% a 64QAM específicamente. En el histograma podemos ver la comparación de la predicción actual (en colores) contra la anterior (dibujada en contornos).

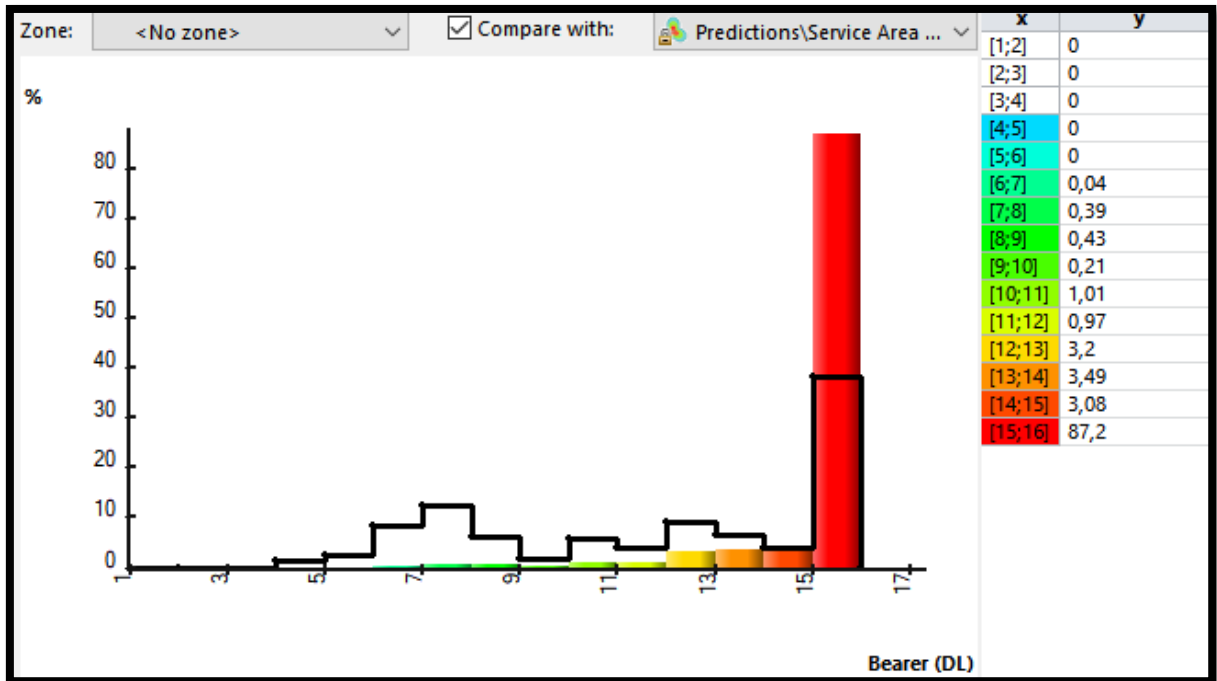


Imagen 8-31 Histograma de Comparación de Área de Servicio (DL) con y sin Simulación Cargada

8.4.2. Análisis de Throughput (DL)

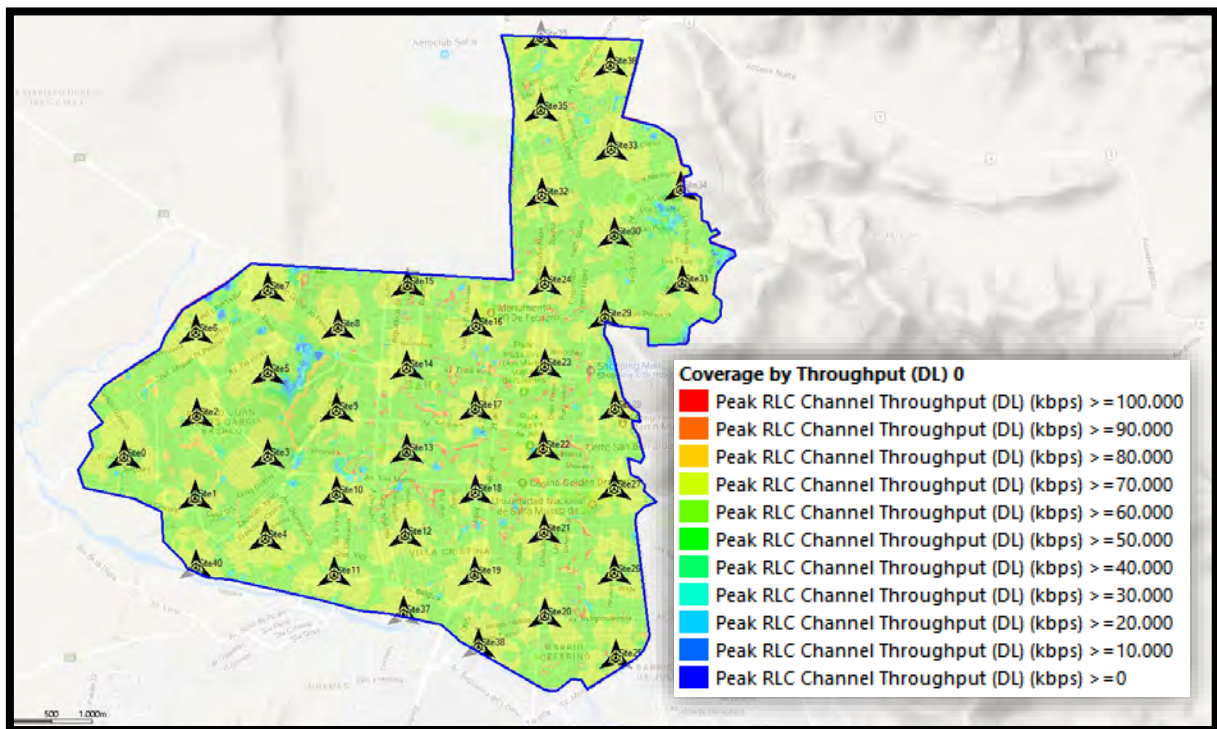


Imagen 8-32 Análisis de Throughput (DL)

Esta última predicción se realizó únicamente para saber que velocidades alcanzan los usuarios a lo largo del terreno estudiado. En el histograma se ve que la mayoría alcanza velocidades de

entre 60 Mbps y 80 Mbps, llegando unos pocos a velocidades de entre 90 Mbps y 100 Mbps. Resultados excelentes para nuestra red.

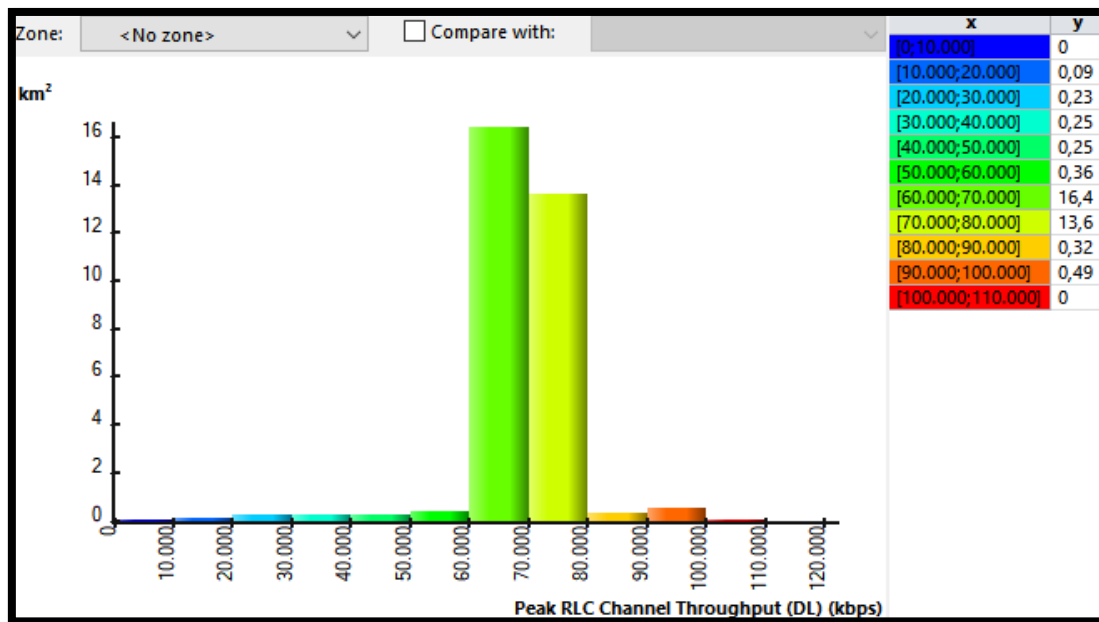


Imagen 8-33 Histograma de Análisis de Throughput (DL)

8.5. Comparación con Datos de un Sitio Real

Con el fin de tener un punto de vista real del comportamiento de un sitio de la ciudad de Salta, se recolectaron datos que podían ser comparados con los que se obtuvo a través de las simulaciones realizadas. Dichos datos fueron conseguidos a través de la herramienta NetChart, específicamente sobre el sitio 4AALVAR ubicado en intersección de calles Alvarado y Buenos Aires. La elección de este sitio es debido a que se encuentra en la zona de mayor densidad poblacional de la ciudad, y sus valores máximos nos permiten saber cómo funciona la red bajo estrés. Se tomarán sus datos como forma representativa de otros sitios similares.

Si bien la herramienta permitía conseguir una cantidad enorme de datos y KPIs, sólo se seleccionaron los que tienen características similares a los que Atoll nos puede proveer. En este sentido, los principales fueron los throughputs máximos tanto en el UL como en el DL, así como la cantidad total de usuarios conectados a cada celda y los que no pudieron conectarse. Con respecto a este último KPI, el más parecido encontrado en NetChart fue el de *Accesibilidad Total de Paquetes*, que es distinto, pero nos puede servir a fines comparativos.

8.5.1. Tablas de Datos

A continuación, se ven los datos obtenidos del sitio 4AALVAR y su celda en cuestión, a lo largo de varios días:

Dateday	2018-11-02	2018-11-03	2018-11-04	2018-11-05	2018-11-06	2018-11-07	2018-11-08	2018-11-09	2018-11-10	2018-11-11	2018-11-12	2018-11-13
Accesibilidad Total Packet	99,9	100	100	99,9	99,9	100	100	99,9	99,9	100	99,9	99,9
Service Drop_Rate	0,04	0,01	0	0,03	0,01	0,03	0,01	0	0,01	0,04	0,02	0,01
Cell_DI Avg_Throughput	14,5	13,2	10	19,5	12,2	22,9	20,6	17,5	12,4	11,8	13,7	17,4
Cell_DI Max_Throughput	74,5	35,9	29,7	59,1	86,8	58	67,3	83,6	38	40,1	91	98
Cell_UI Avg_Throughput	3,12	2,18	3,91	3,52	2,92	3,67	3,87	3,09	4,75	3,67	2,95	2,72
Cell_UI Max_Throughput	31,8	34,3	30,7	34,1	27,4	36,1	42,6	22,1	32,8	18,9	33,5	24,8
User_Avg	6,85	2,37	1,26	6,13	5,32	5,97	6,31	6,51	2,61	1,38	4,96	5
User_Max	32	14	9	31	27	26	27	30	51	16	29	24

Tabla 8-1 KPIs de 4AALVAR (NetChart, 2018)

Hay que destacar que los datos contra los que se realizará la comparación no pertenecen a distintos días, sino a distintas celdas de diferentes sitios. Por lo tanto, los datos obtenidos de la simulación son bastante extensos, implicando una tabla de más de 120 entradas. Con el fin práctico que perseguimos sólo se mostrarán las primeras 30. Sin embargo, en los gráficos que se usarán para comparar sí se tendrá en cuenta la totalidad de los datos:

Transmitter	Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)	Peak RLC Cumulated Throughput (UL) (kbps)	Connection Success Rate (%)	Total number of connected users	No Service
Site0_1	90.000,09	9.331	100	16	0
Site0_2	89.356,84	1.732,80	100	15	0
Site0_3	40.812,36	6.498,01	100	10	0
Site1_1	56.471,81	11.696,43	100	22	0
Site1_2	43.032,65	3.249,01	100	8	0
Site1_3	39.720,60	6.714,61	100	10	0
Site10_1	81.182,82	11.696,43	100	21	0
Site10_2	88.259,94	38.134,02	100	42	0
Site10_3	91.503,16	14.945,46	100	16	0
Site11_1	69.902,61	9.963,63	100	15	0
Site11_2	112.573,42	6.726,82	100	15	0
Site11_3	70.949,44	11.696,43	100	15	0
Site12_1	93.331,48	44.403,21	100	40	0
Site12_2	75.547,97	38.886,16	100	33	0
Site12_3	102.851,77	27.788,89	100	24	0
Site13_1	71.897,75	28.029,90	100	48	0
Site13_2	82.323,22	40.132,37	97,67	42	1
Site13_3	84.266,55	28.005,51	100	39	0
Site14_1	114.167,95	13.569,48	100	44	0
Site14_2	63.173,08	60.203,74	98,07	51	1
Site14_3	113.651,55	43.167,54	100	39	0
Site15_1	79.573,51	9.963,63	100	13	0
Site15_2	87.062,30	32.935,51	94,44	34	2
Site15_3	99.610,23	36.452,93	100	37	0
Site16_1	81.112,97	26.489,30	97,14	34	1
Site16_2	91.258,35	32.144,64	100	34	0
Site16_3	105.127,56	43.103,61	100	48	0
Site17_1	80.220,87	34.439,50	100	37	0
Site17_2	102.920,76	13.429,27	100	25	0
Site17_3	108.826,72	54.009,74	96	48	2

Tabla 8-2 Resultados de Simulación por Celda

8.5.2. Throughputs Máximos

Al analizar los graficos generados a partir de las tablas podemos ver valores mayores de throughput en el **downlink** en el caso de la simulación. Específicamente viendo resultados que van desde los **50 Mbps** hasta casi **100 Mbps** con promedio en **63,5 Mbps** en 4AALVAR, y desde **7,5 Mbps** hasta **120 Mbps**, con promedio en **78,8 Mbps** en el caso de nuestra simulación.

En el lado del **uplink** la situación es distinta, ya que en 4AALVAR los valores van desde **19 Mbps** hasta **42 Mbps**, con promedio en **30,7 Mbps**, y en el caso de la simulación los mismos abarcan desde **0 Mbps** en muchos casos, hasta **60 Mbps** en el máximo, con un promedio de **20,9 Mbps**. Esta situación puede deberse a que en el momento que definimos los perfiles de usuario y su consumo de datos, le dimos valores unas 7 veces menor en el UL que en el DL.

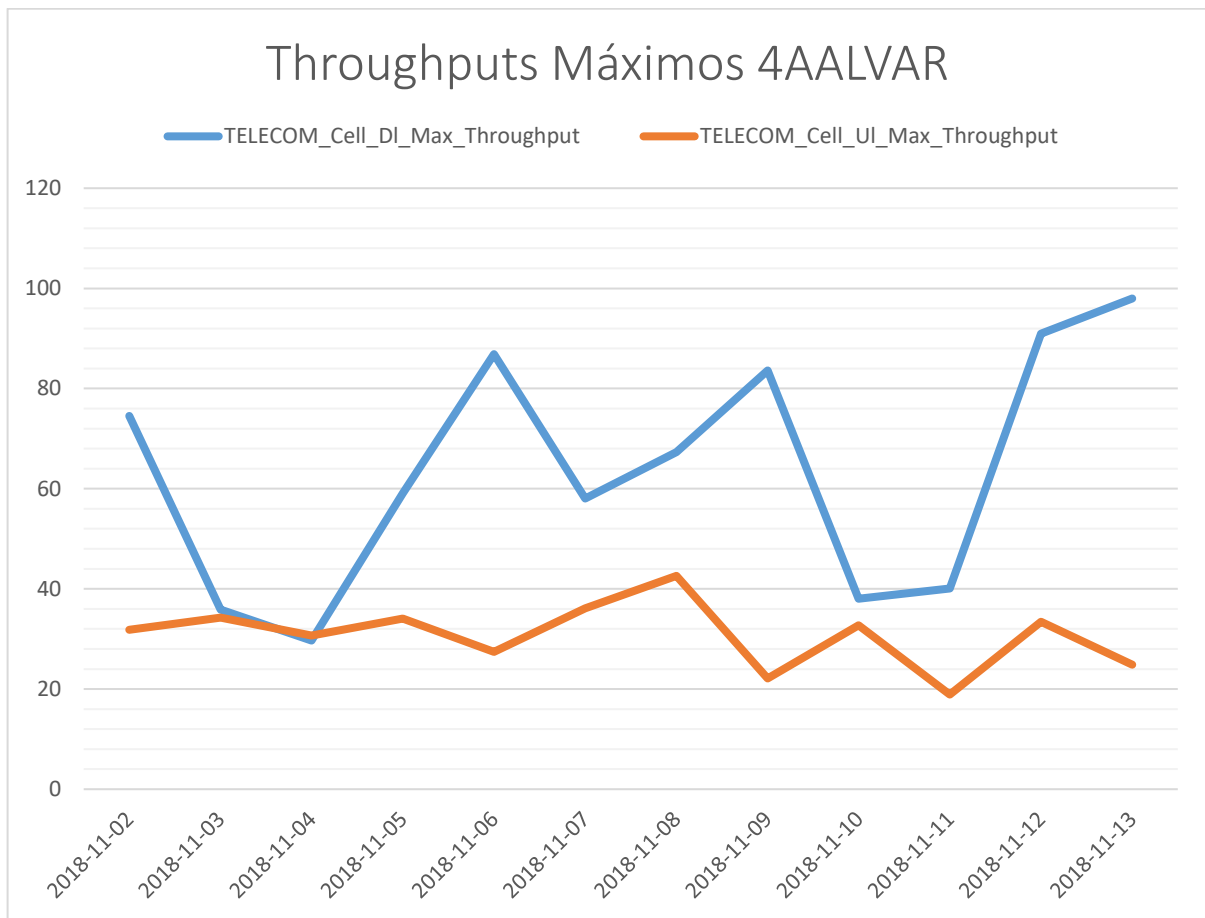


Imagen 8-34 Throughputs Máximos 4AALVAR (NetChart, 2018)

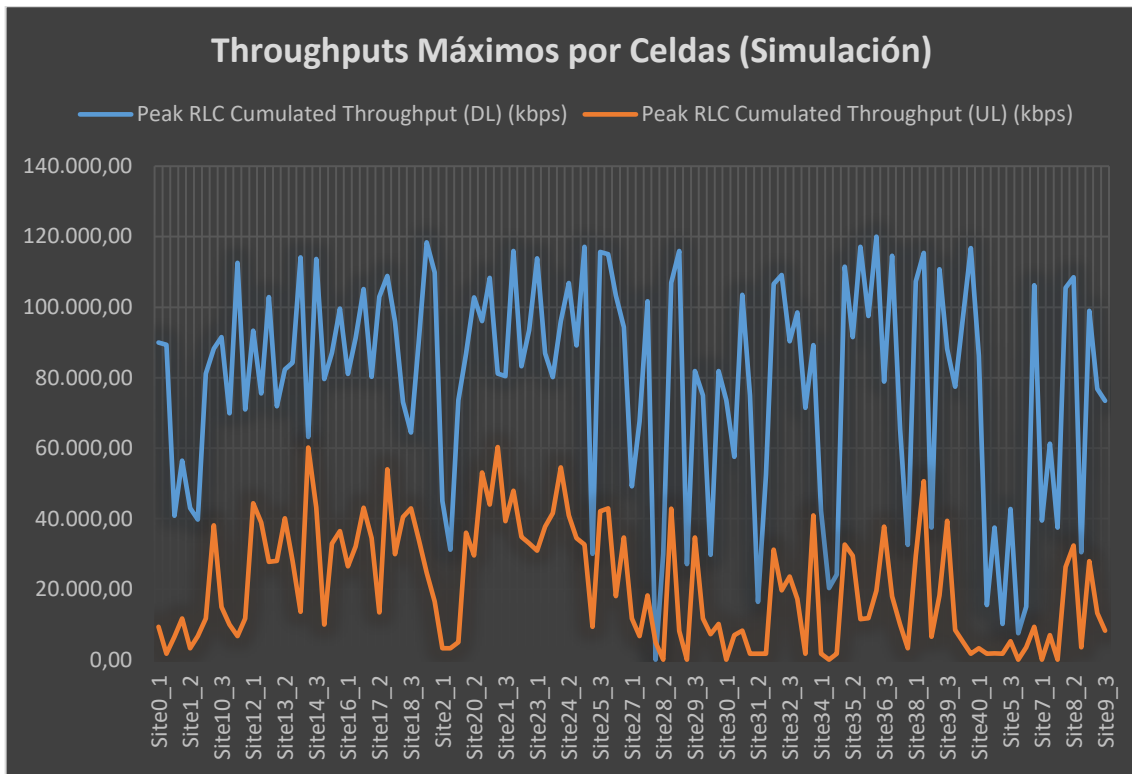


Imagen 8-35 Throughputs Máximos por Celdas (Simulación)

Para verificar lo expuesto sobre el posible motivo de los valores inferiores de tráfico en el *uplink*, veremos el porcentaje de capacidad máxima por celda utilizado en el siguiente gráfico.

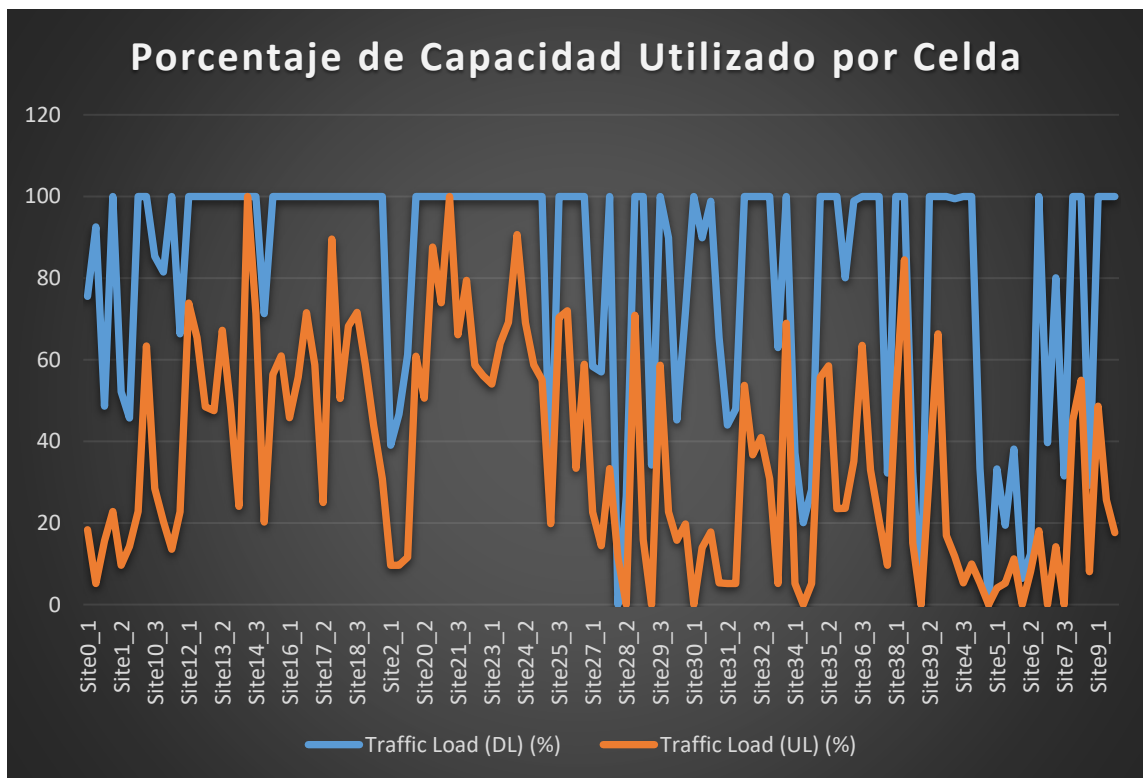


Imagen 8-36 Porcentaje de Capacidad Utilizado por Celda

Como se aprecia, en el DL en muchos casos se alcanzó el 100% de capacidad siendo su promedio de **80,77%**, mientras que en el UL apenas unas cuantas celdas llegaron al consumo máximo, siendo respaldado por un promedio de tan sólo **36,19%**. Estos datos significan que, en caso de redefinir los perfiles de usuario para producir una mayor cantidad de tráfico en el *uplink*, se podrían superar los valores de la celda 4AALVAR.

8.5.3. Cantidad Máxima de Usuarios Conectados

Con respecto a la cantidad máxima de usuarios conectados, podemos ver que en 4AALVAR depende bastante del día en que se haya tomado la medición, mostrando desde 9 usuarios hasta 51 en el mayor de los casos, pero manteniendo un promedio de 26.

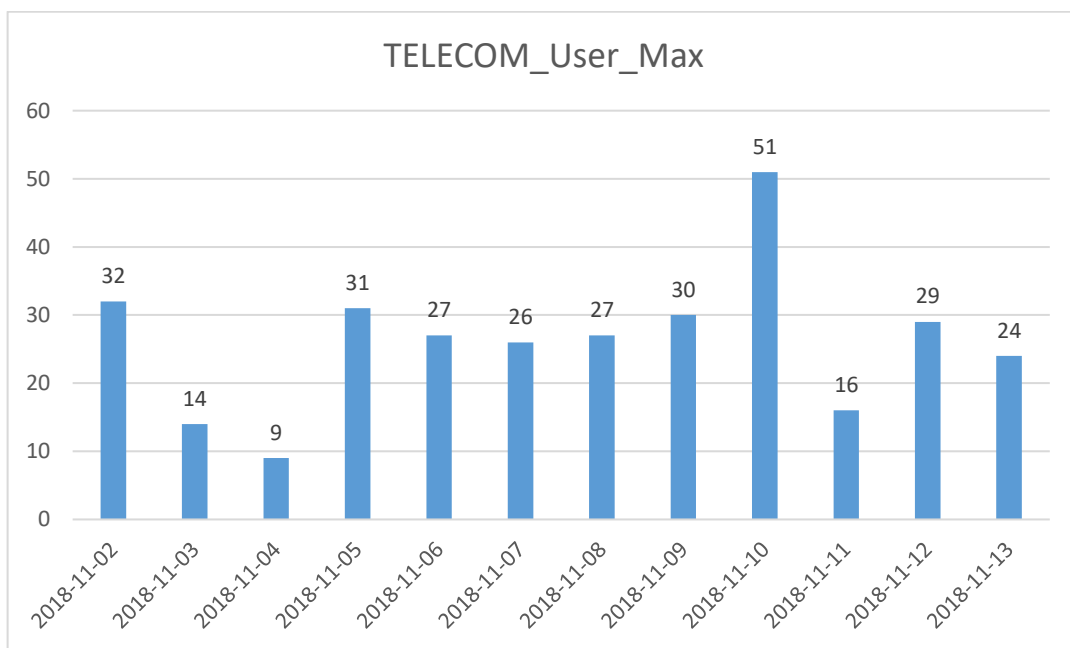


Imagen 8-37 TELECOM_User_Max (NetChart, 2018)

En la simulación tenemos un volumen muchísimo mayor de datos para comparar, yendo desde ningún usuario conectado en algunas celdas, hasta un máximo de 60, manteniendo un promedio de 24 usuarios por celda. Es evidente que las zonas de densidad poblacional que definimos anteriormente para todo el terreno provocan una variabilidad bastante grande en la simulación, pero cuya media tiende a los valores de la celda real que estamos tomando como punto de comparación.

En la misma gráfica podemos observar en naranja los usuarios que no pudieron conectarse a determinadas celdas. Este dato nos servirá para determinar el porcentaje de éxito de conexión en la siguiente comparación.

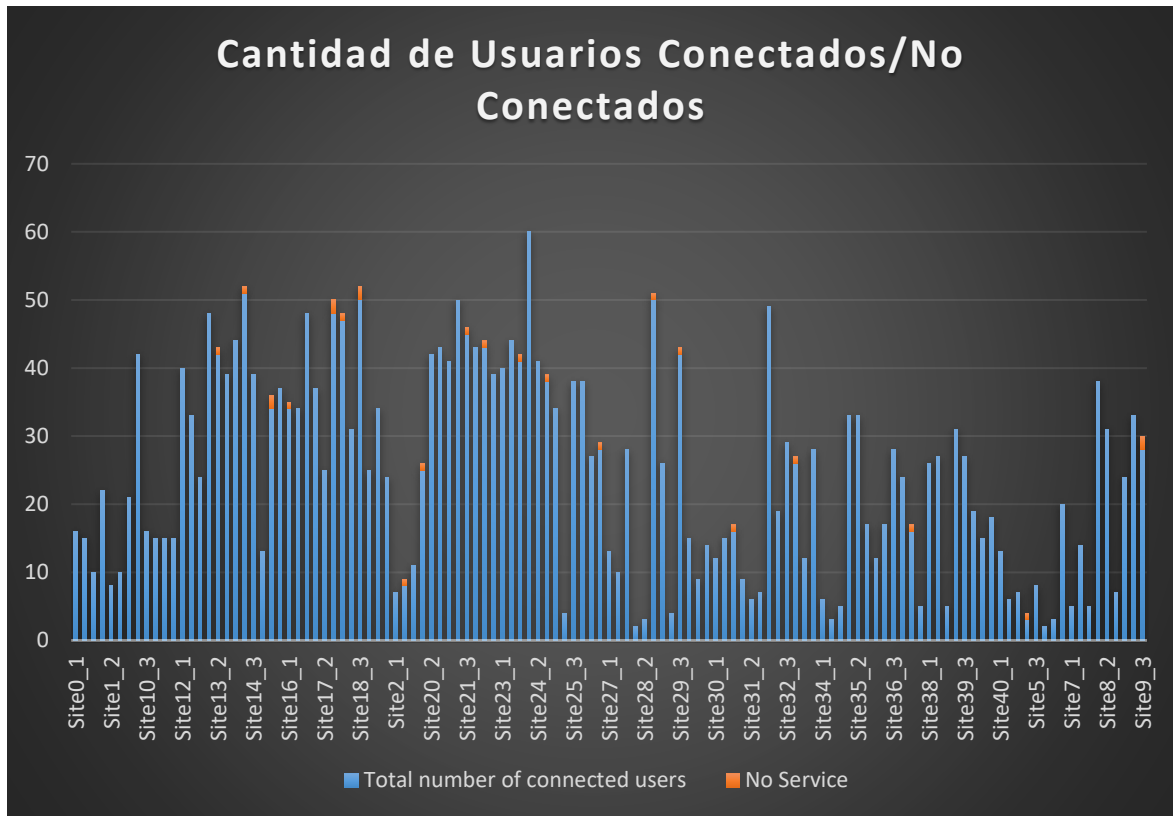


Imagen 8-38 Cantidad de Usuarios Conectados/No Conectados (Simulación)

8.5.4. Accesibilidad

En el apartado de accesibilidad no fue posible conseguir KPIs que coincidan perfectamente para su comparación. Por este motivo, se compara la accesibilidad total de paquetes en 4AALVAR contra la tasa de conexión exitosa en la simulación.

Al observar los gráficos se puede apreciar que los números de la celda real son casi perfectos, manteniendo la accesibilidad por arriba del 99,9%

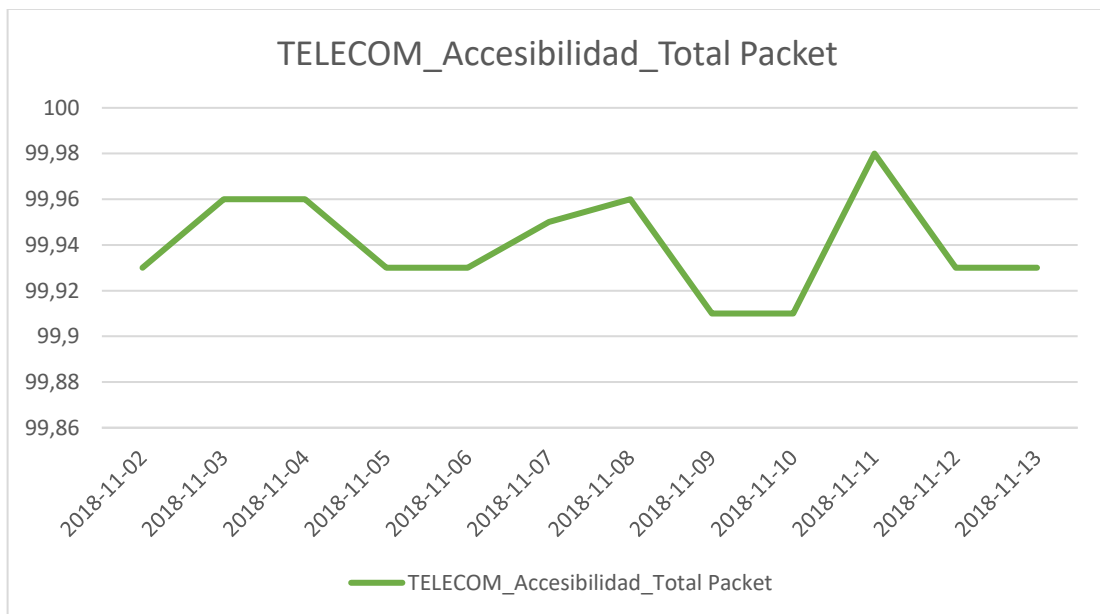


Imagen 8-39 TELECOM_Accesibilidad_Total Packet (NetChart, 2018)

En el caso de la simulación, los resultados obtenidos llegan con mucha mayor frecuencia a un 100% de usuarios conectados por celda, pero en algunas específicas, este porcentaje cae al 95% y en el peor caso al 75%.

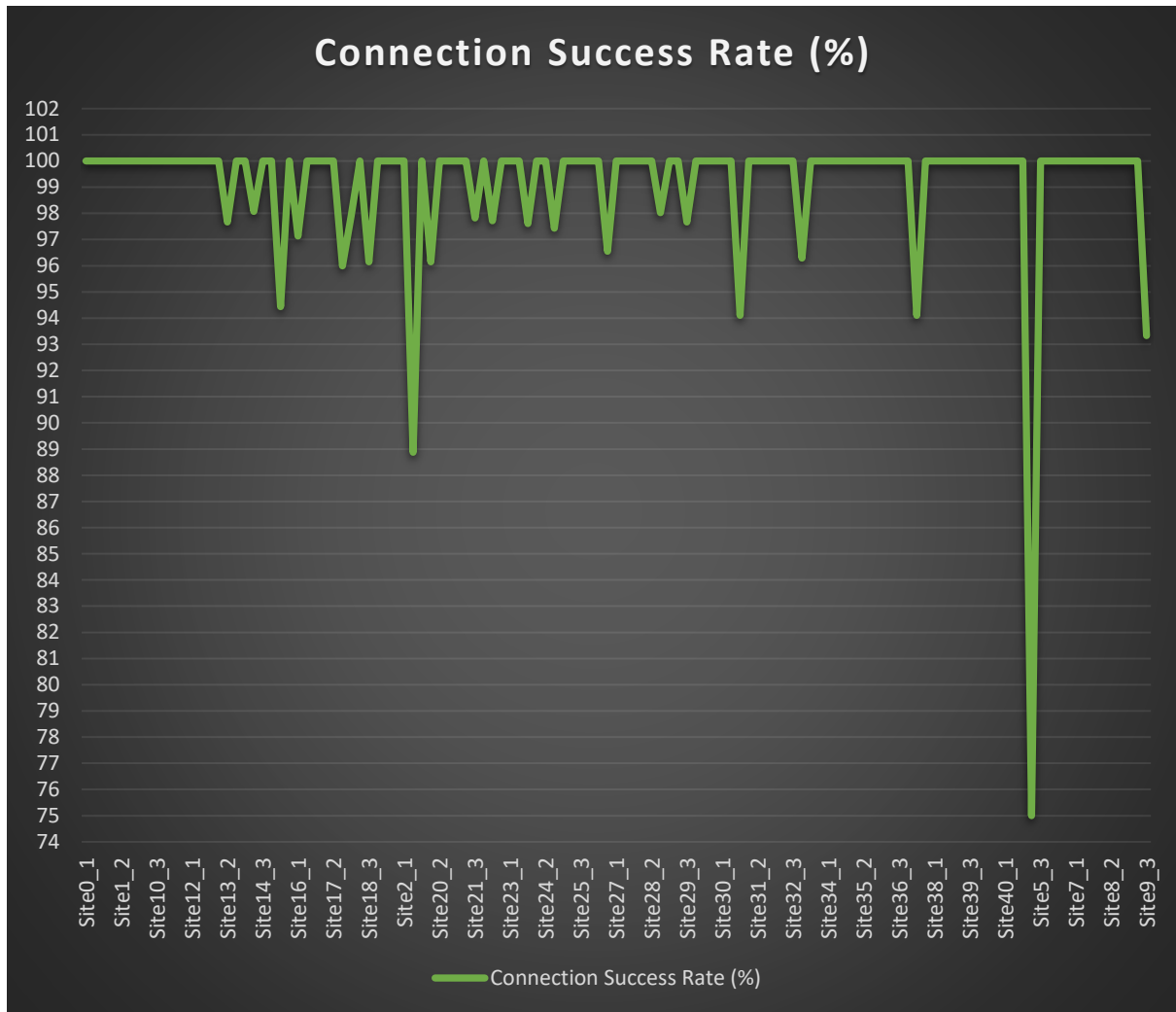


Imagen 8-40 Connection Success Rate (%) (Simulación)

Sin embargo, al investigar el motivo de este porcentaje tan bajo, se aprecia en la siguiente tabla que tan sólo se conectaron a dicha celda 3 usuarios, siendo un cuarto el que no se pudo conectar y representando ese 25% de caída. Luego de encontrar y analizar específicamente a dicho usuario, se descubrió que la imposibilidad de conexión se debió a una C/(I+N) muy pobre de la señal de referencia SS, específicamente de 5,12 dB. Siendo en la mayoría de los casos de alrededor de 30dB.

Transmitter	Peak RLC Cumulated Throughput (DL) (kbps)	Peak RLC Cumulated Throughput (UL) (kbps)	Connection Success Rate (%)	Total number of connected users	No Service	SS/C(I+N) (DL) (dB)
Site5_2	10.166,26	1.732,80	75	3	1	5,12

Tabla 8-3 Usuario no Conectado Site5_2

8.5.5. Conclusión de las Comparaciones

En general la red simulada muestra una mejor performance y márgenes de explotación que la celda comparada, mostrando límites superiores tanto en throughput de DL como en UL, cantidad de usuarios máximos por celda y porcentaje de conexión exitosa, dejando de lado algunos valores alejados que por su poca ocurrencia no deben significar un problema. Sin embargo, no se debe quitar el hecho de que una es una simulación con muchas menos variables que los datos recogidos de un entorno real y actualmente funcional.

Con el fin de mostrar las capacidades de la red planificada, se corrió una nueva simulación, incrementando el factor de tráfico para producir el doble de usuarios. Como se ve a continuación, la demanda fue de 5.902 usuarios intentando conectarse, habiéndolo logrado 5.837, es decir, el 98,9% del total. Se demuestra así que, con pequeñas correcciones, se puede conseguir valores todavía más eficientes para nuestra red.

Demand:

Total number of users trying to connect
 Users: 5.902
 Active: Downlink: 3.757 Uplink: 1.643 Downlink + Uplink: 455
 Inactive: 47

DL:
 Max Throughput Demand (DL): 42.588,85 Mbps
 Min Throughput Demand (DL): 165,26 Mbps

UL:
 Max Throughput Demand (UL): 12.534,87 Mbps
 Min Throughput Demand (UL): 25,71 Mbps

Breakdown per service:

Results:

Number of iterations: 3

Total number of users not connected (rejected): 65 (1,1%)

No Coverage:	0
No Service:	65
Scheduler Saturation:	0
Resource Saturation:	0
Backhaul Saturation:	0

Total number of connected users
 Users: 5.837 (98,9%)
 Active: Downlink: 3.717 Uplink: 1.623 Downlink + Uplink: 450
 Inactive: 47

Imagen 8-41 Simulación con Doble Factor de Tráfico

9. LTE-A en un Evento Masivo

Siendo posible aprovechar nuestra red ya diseñada y trabajando de excelente manera, se quiso exponerla al caso de un evento real y multitudinario que se realiza anualmente en la ciudad de Salta. Dicho acontecimiento se denomina Procesión del Señor y la Virgen del Milagro y es de carácter religioso. Se realiza durante el mes de septiembre y atrae también mucha actividad turística y comercial.

Su elección se debe a que la densidad de cantidad de gente sobre el recorrido que propone el evento es una de las más altas que experimenta la ciudad. Esta situación nos permitirá poner bajo estrés a nuestra red y probablemente dará margen para mejoras con las tecnologías evolucionadas de LTE.

Como ya sabemos, el programa sólo nos permite herramientas para simular hasta LTE-Advanced, pero la densificación que esta tecnología facilita para su aprovechamiento forma parte de los pilares de 5G. Trabajando de esta manera, en un futuro podría instalarse la nueva red sobre los sitios de LTE-A, cuyas alturas y parámetros fueron concebidos con la 5ta generación en mente.

9.1. Sobre el Evento

A mediados de septiembre se acerca una gran cantidad de gente para participar durante alrededor de una semana, de las distintas actividades previas a la procesión. Es el último día cuando mayor cantidad de gente visita la ciudad. Particularmente durante el horario que dura la procesión y, geográficamente, sobre el recorrido de la peregrinación. Para este fin, el tránsito se corta y las calles son ocupadas completamente por la gente.

Según fuentes periodísticas, en el año 2017 fueron 800.000 personas las que participaron en la culminación de este evento. Para poder traducir estos datos a una simulación en Atoll, es necesario definir el espacio del recorrido.

Se crea un nuevo *Environment* llamado “Procesión”, que en primera instancia se deja sin valores de densidad. Se dibuja el polígono (en gris oscuro) sobre las plazas y calles que abarca el evento, teniendo en cuenta que su densidad se sumará a los polígonos de la ciudad creados anteriormente. Se aclara que la zona encerrada por el trazo rojo es nuestra nueva zona de computación, que se acotó para ahorrar tiempo computacional de resultados, pero que aún así tiene en cuenta los sitios que se encuentran fuera de ella.

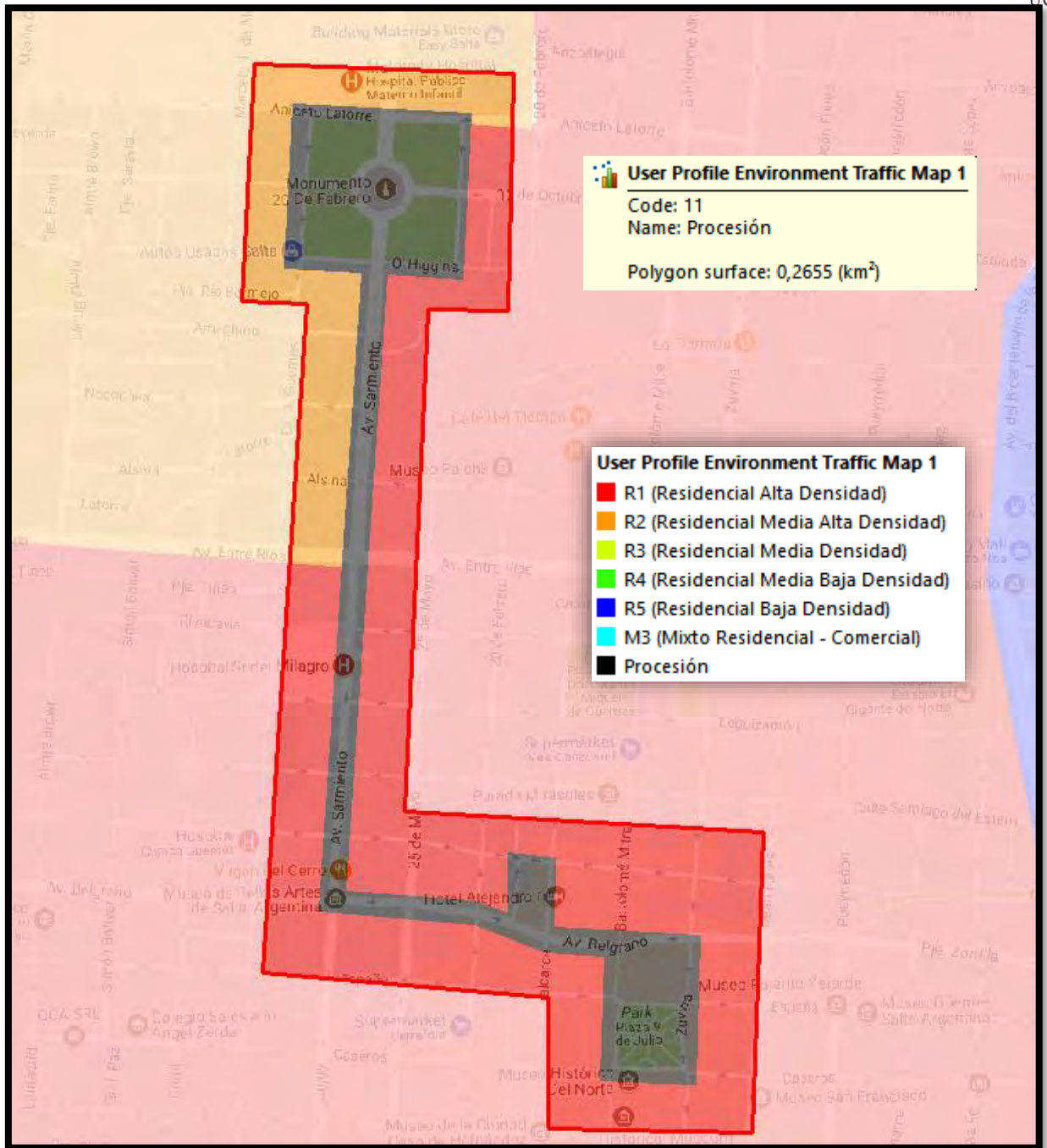


Imagen 9-1 Mapa de Tráfico de Procesión

Como se observa, la superficie de nuestro último polígono equivale a 0.2655 km². Si nos basamos en la cantidad de asistentes declarada por la prensa (800.000 personas) y lo dividimos por la superficie de nuestro polígono, tendremos un estimado de la densidad durante el evento.

Dicho cálculo nos arroja como resultado una densidad de alrededor de 3 millones por km². Tendremos en cuenta un margen de un 33% más, considerando que generalmente la gente no se encuentra homogéneamente distribuida sobre el terreno, sino que se concentra en el frente de la procesión. Además, dicho margen nos permite tener cierta holgura con respecto a la cantidad de asistentes anuales, que cada vez se vuelve mayor.

Habiendo definido una densidad de 4 millones por km², decidimos plasmar los datos en el entorno Procesión, otorgando 3,5 millones a *Standard Users* y 500.000 a *Business Users*, como se ve en la siguiente imagen.

Name: Procesión		
User profiles:		
User Profile	Mobility	Density (Subscribers/km ²)
Business User	Pedestrian	500.000
Standard User	Pedestrian	3.500.000

Imagen 9-2 Configuración de Ambiente Procesión

9.2. Simulaciones sin Modificación de la Red

Apreciamos en esta imagen, el resultado de las Simulaciones de Monte Carlo para el *Group 2*. Al ser tanta la densidad de usuarios pareciera verse a todos con conexión. Pero si ampliamos la imagen podemos ver que en realidad existe casi la misma cantidad de puntos con conexión como con saturación.

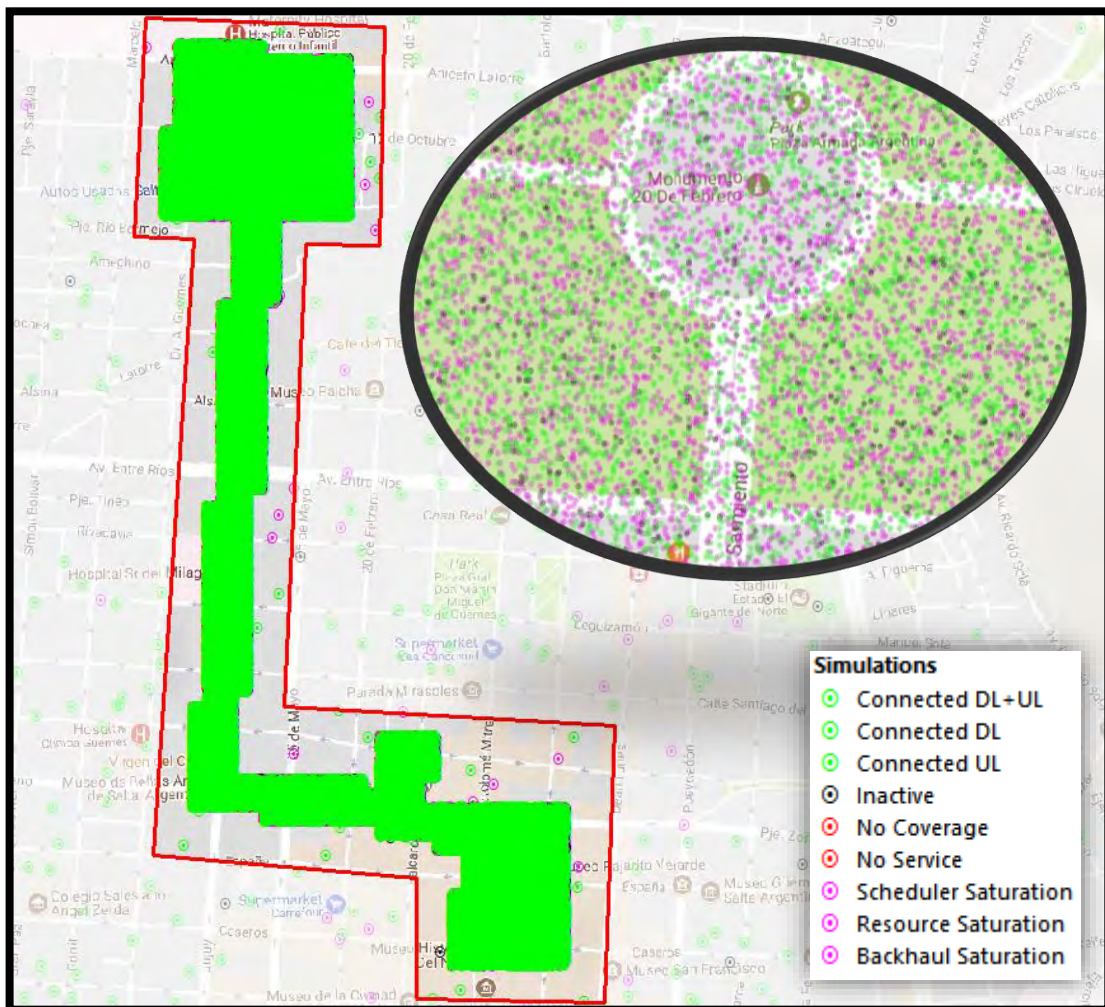


Imagen 9-3 Simulaci3n de Monte Carlo sobre zona de Procesi3n

Al analizar los resultados cuantitativos de una simulación encontramos que, del total de usuarios, sólo se conectó el 59,2%. El 40,8% restante tuvo principalmente problemas de saturación del recurso, mientras que unos cuantos directamente no tuvieron servicio.

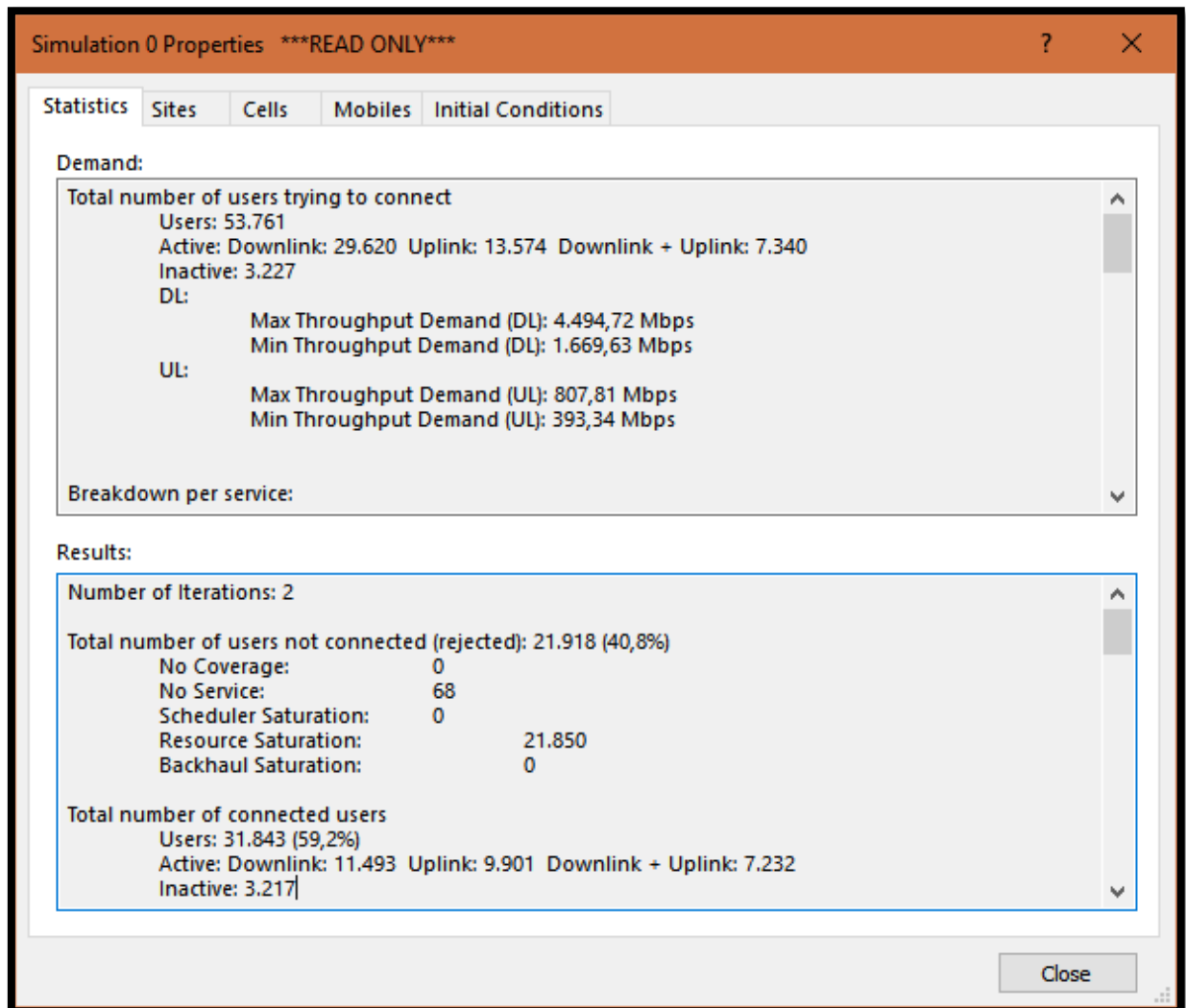


Imagen 9-4 Detalle de Simulación sobre Zona de Procesión

9.3. LTE-Advanced

9.3.1. Configuración de Celdas LTE-Advanced

La situación descrita nos otorga un margen importante para colocar antenas de LTE-A. Para su elección nos remitimos nuevamente al documento sobre radiobases de la ENACOM, que define el siguiente tipo:

“Área Local (Local Area Base Station), comúnmente denominadas pico celdas. Se utilizan típicamente para dar cobertura a grandes oficinas bajo techo o como puntos de acceso en recintos al aire libre. Están caracterizadas por una pérdida de acoplamiento mínima de 45 dB. La potencia máxima admitida para esta clase de radiobases es de 24 dBm.” (ENACOM, Norma Técnica ENACOM-Q2-61.04 V17.1, 2017)

Basándonos en esto, se decide colocar los sitios cada 100 m aproximadamente, llegando a tener algunas más cercanas en las plazas. Con motivo de no crear mucha interferencia, se opta por una altura de antena de 6 m y un tilt eléctrico y mecánico de 4° cada uno. Al tener la certeza de que casi todos los usuarios se encuentran entre 1,5 m y 2 m de altura, nuestra elección no debería tener problemas para abarcarlos. Además, esta altura nos permitiría una instalación más simple, quizás sin necesidad de una torre.

A continuación, se ve la configuración en Atoll de nuestras celdas:

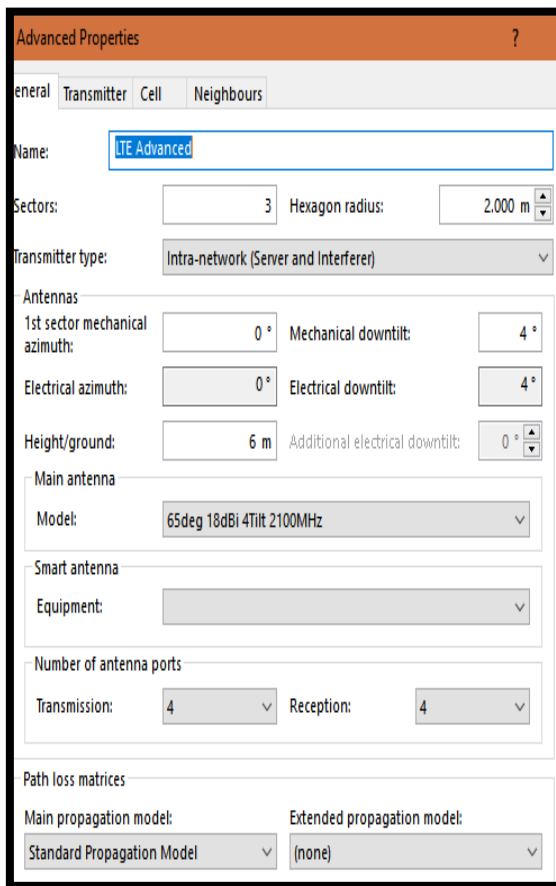


Imagen 9-5 Plantilla LTE Advanced

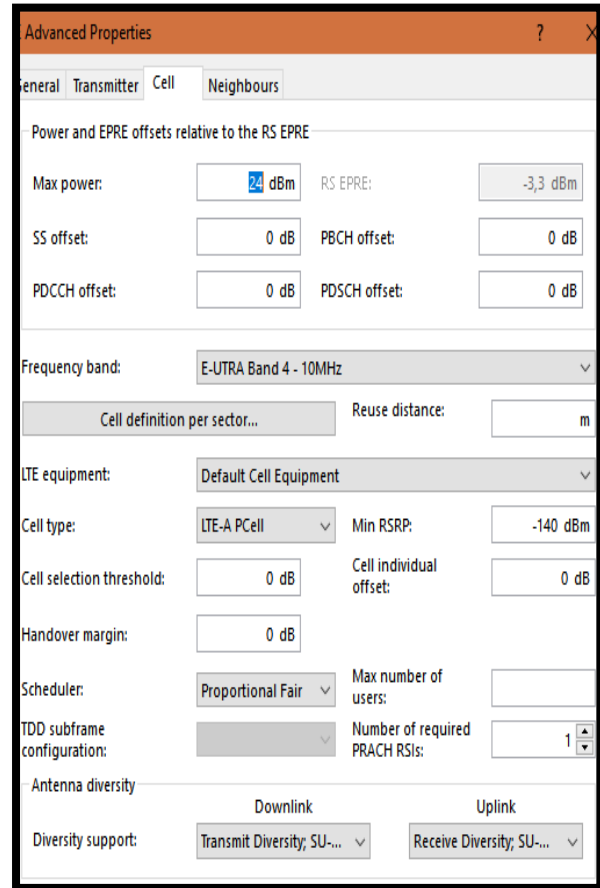


Imagen 9-6 Configuración de Celda LTE-A

Hemos elegido la banda de 4 MHz, motivo por el cual hemos seleccionado una antena acorde. También se configuró la potencia máxima en 24 dBm, se eligió la celda tipo LTE-A *Primary Cell* y se activaron las opciones de Multiuser MIMO.

9.3.2. Colocación de Sitios Para LTE-A

En el siguiente mapa se observa la distribución de los sitios LTE-A a lo largo de la zona definida, así como también un par de sitios LTE que ya pertenecían a la red diseñada. En total se agregaron 21.

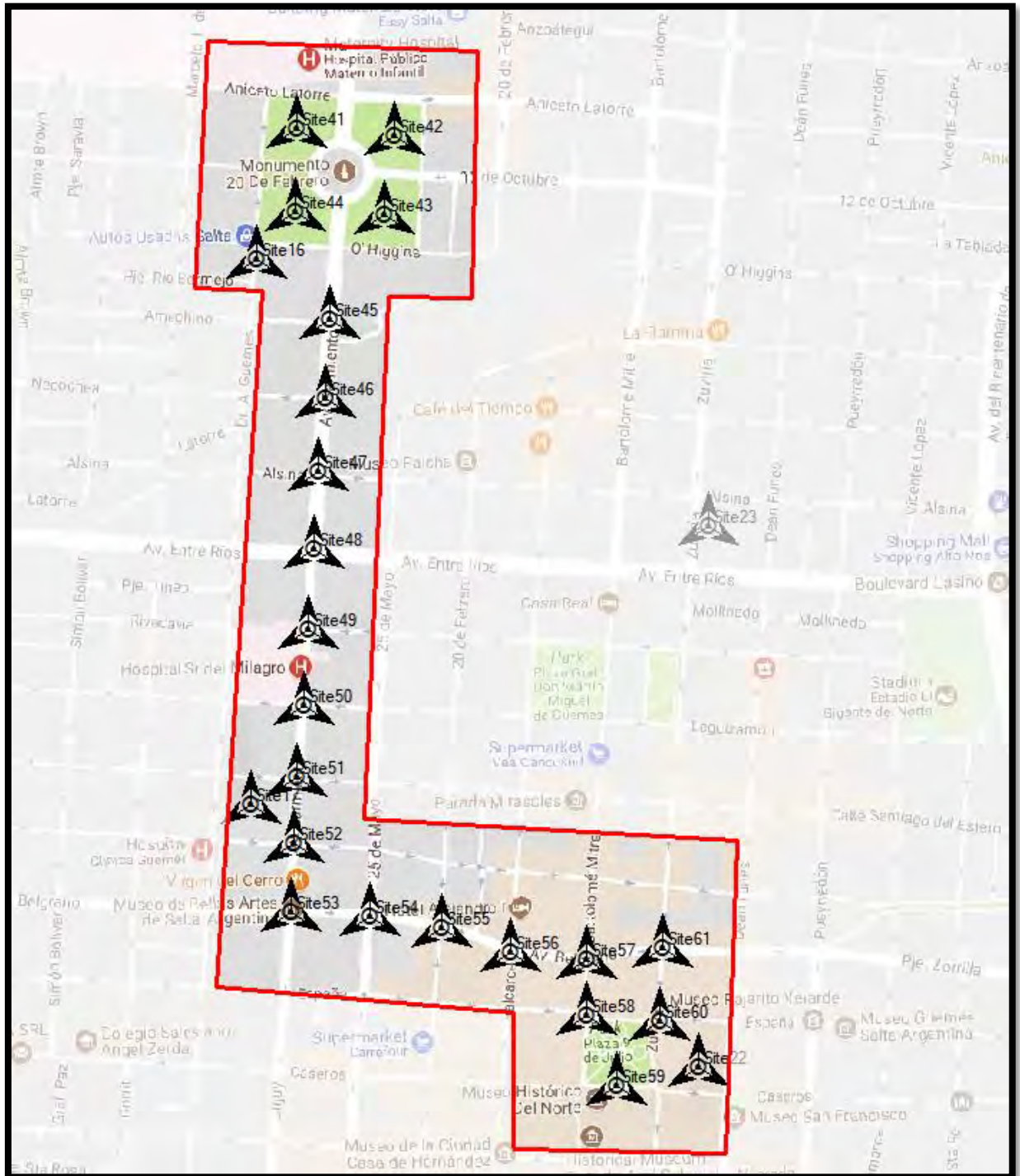


Imagen 9-7 Sitios LTE-A

Fue necesario activar en los perfiles de usuarios el soporte para LTE-Advanced dentro de las propiedades del *MIMO Terminal* y *Mobile Terminal* de cada uno. De otra manera, las

simulaciones se mantenían igual, ya que los usuarios no se conectaban a las nuevas celdas que creamos.

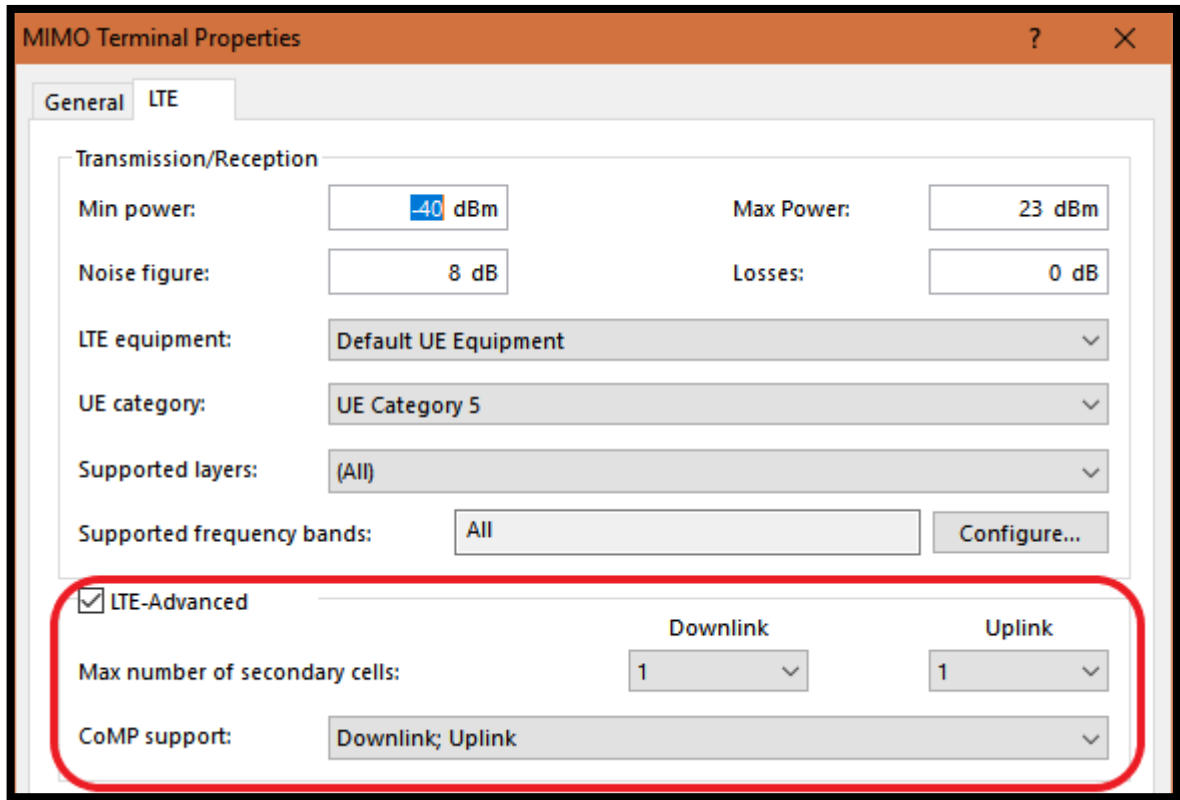


Imagen 9-8 Activación de LTE-A en Perfiles de Usuarios

9.3.3. Resultados de Nuevas Simulaciones

Se corrieron 10 simulaciones que constituyeron el *Group 3*, entregándonos en la imagen ampliada, una cantidad mucho mayor de usuarios conectados que aquellos con saturación, en contraste a lo ocurrido en las simulaciones del *Group 2* sin las antenas de LTE-A.

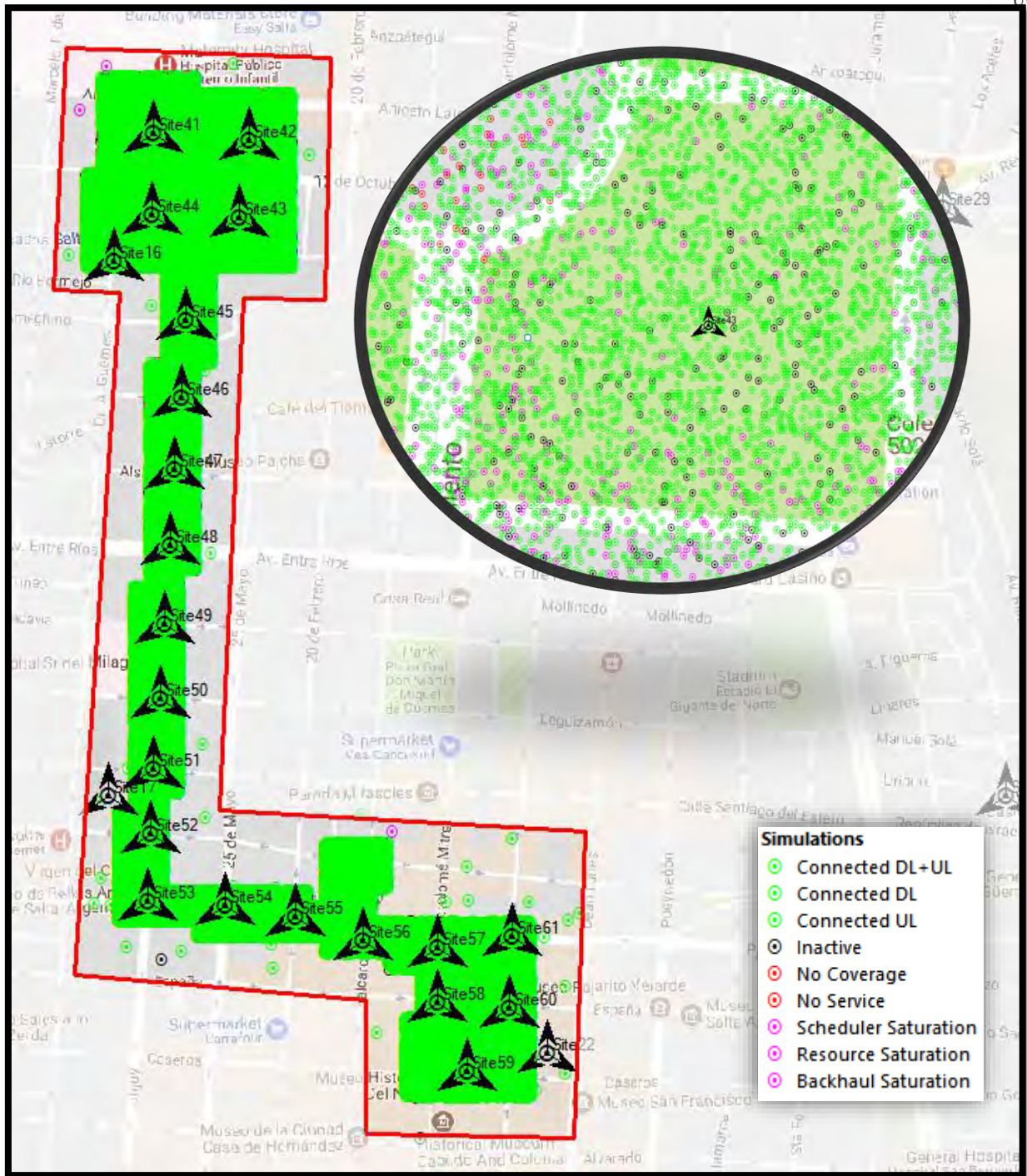


Imagen 9-9 Simulación de Monte Carlo con Sitios LTE-A

Al remitirnos a los números obtenidos, comprobamos que ahora pudo conectarse el 92,3% de los usuarios, quedando sin servicio o bajo saturación del recurso sólo el 7,7%.

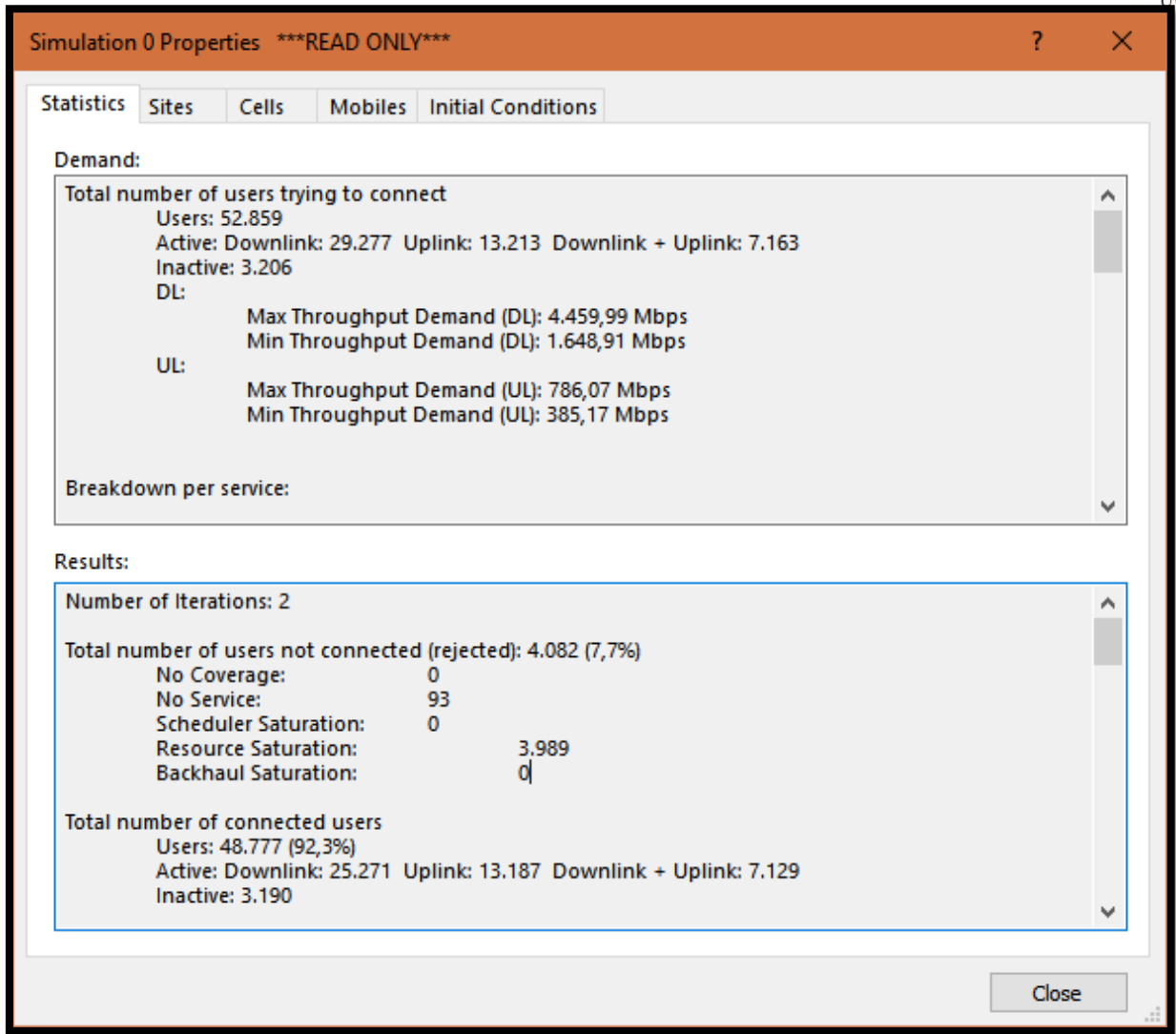


Imagen 9-10 Detalle de Simulación de Monte Carlo con Sitios LTE-A

Estos excelentes números demuestran que la densificación de sitios junto con la aplicación de técnicas de LTE-A como despliegues heterogéneos, celdas pequeñas, coordinación y transmisión multipunto y las mejoras multi antena descritas en los capítulos teóricos de este proyecto tienen un gran efecto bajo escenarios de concurrencia masiva como el planteado.

9.3.4. Análisis del Área de Servicio (DL) con Sitios LTE-A

Finalmente se corre una última predicción basado en este *Group 3* de simulaciones para ver que mantenemos nuestro objetivo de más de 85% del terreno con modulaciones QAM bajo las condiciones de estrés propuestas. Específicamente se obtuvo un 98.39% con dicha meta alcanzada.

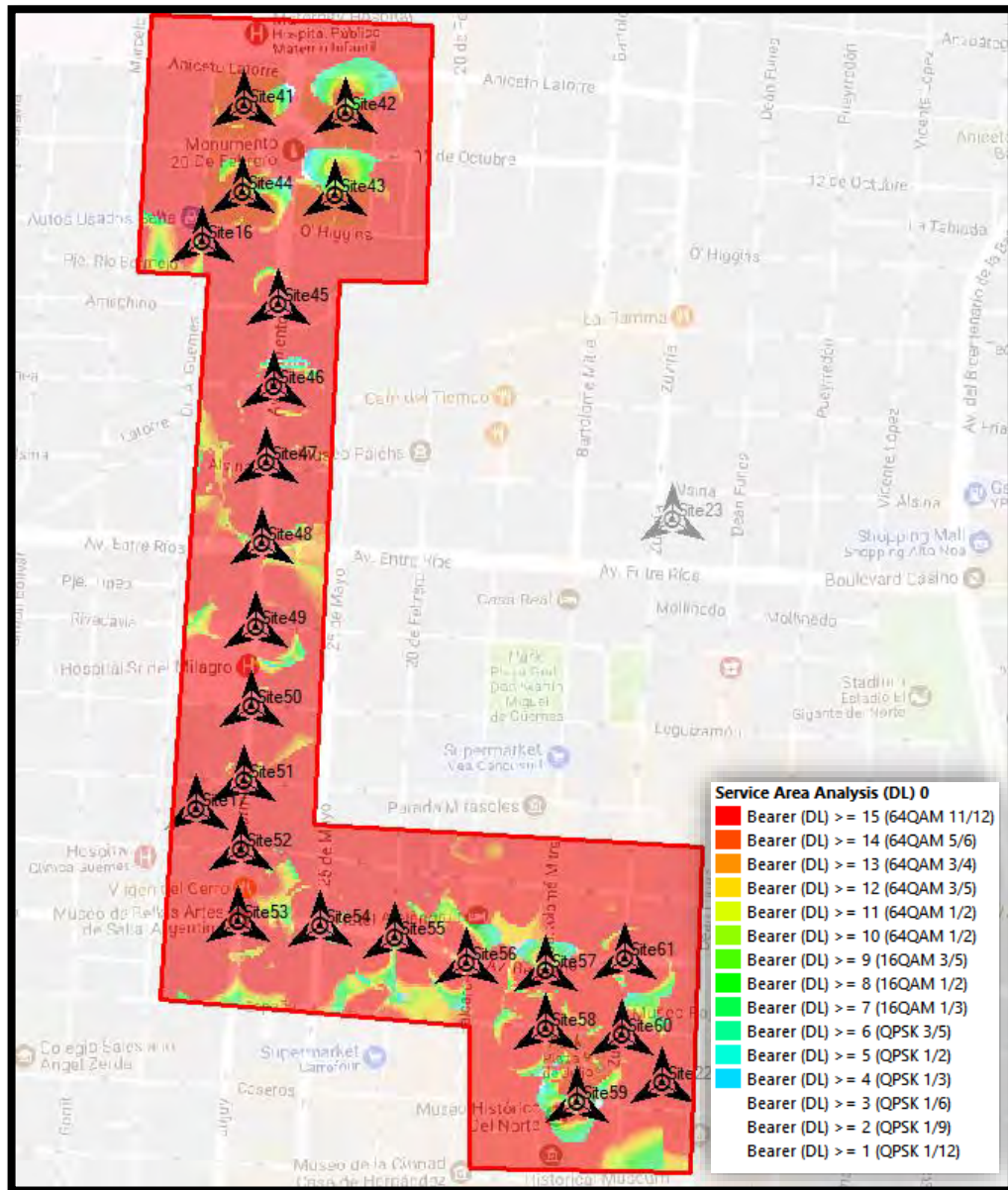


Imagen 9-11 Análisis del Área de Servicio (DL) con Sitios LTE-A

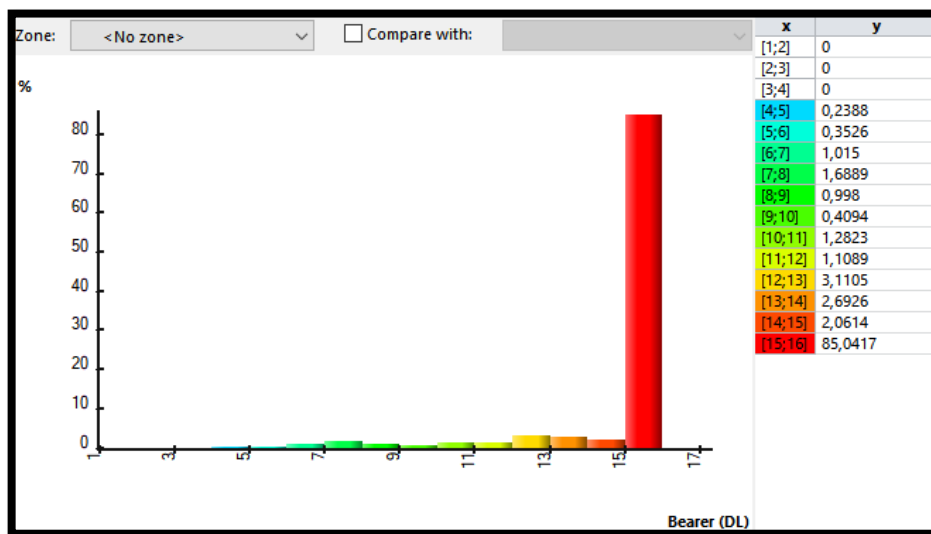


Imagen 9-12 Histograma de Análisis del Área de Servicio (DL) con Sitios LTE-A

10. Conclusión

A lo largo de nuestro proyecto hemos abarcado de forma integral los conocimientos necesarios para entender el camino de la comunicación móvil los últimos 30 años. En este sentido hemos explicado las tecnologías que formaron parte de ella, haciéndose evidente en este proceso aquellas que saltaron de una generación a otra.

Como se pudo ver, el sector de las comunicaciones móviles crece a pasos agigantados, con una evolución continua, al punto de que en el mismo momento que se empieza a implementar una tecnología, se inicia el proceso de investigación para la siguiente. Este motivo fue el principal por el que se decidió no entrar en gran detalle en los aspectos más técnicos de cada una, concentrándonos en cambio, en las características que las definían para tener una visión amplia sobre lo que va a venir.

Luego de esto hemos iniciado el desarrollo de una red sobre los barrios céntricos de la ciudad de Salta. Esto se realizó acompañado del respaldo teórico para el diseño de una red LTE. Se identificaron tres grandes procesos: planeamiento, planificación detallada y optimización. Si bien estas son las etapas que nos indica la teoría, vimos que muchas veces no se pudo encasillar alguna actividad de forma estricta en una de estas clasificaciones.

El primer paso para todo esto fue conseguir información que nos ayude al desarrollo de la red. Se eligieron zonas, software de diseño, se obtuvieron planos con información sobre uso de suelos, densidad poblacional, orografía, cartografía y distribución de radiobases de una empresa.

A continuación, luego de cálculos iniciales y el uso de herramientas de asignación automática de celdas vecinas y frecuencias, se probó una red con antenas a 30 m de altura en la banda 4 de LTE. En esta configuración se utilizaron sólo 9 radiobases, basados en el *Link Budget*. Al realizar predicciones determinadas con el software de diseño, se llegó a la conclusión de que dicha red no alcanzaba los objetivos perseguidos, lo que nos dio lugar para densificar nuestra red.

En la siguiente iteración del diseño, se utilizaron antenas a una altura de 15 m, se optó cambiar a la banda 7, así como también optar por una canalización de 10 MHz en comparación a la anterior de 20 MHz. Recalculando el *Link Budget* colocamos 41 sitios sobre el mismo terreno. Cuando se realizaron las predicciones pertinentes (incluyendo algunas basadas en simulaciones de Monte Carlo) se observó una mejora sustancial en toda la red, alcanzando los objetivos planteados en un principio. En resumen, casi el 100% de la red tenía cobertura en niveles muy buenos (mayores a -90 dBm) y más del 85% accedía a modulaciones muy eficientes dentro de QAM, esto se traducía en excelentes velocidades para los usuarios. Implícitamente esto significa que las relaciones $C/(I+N)$ eran lo suficientemente grandes y que, por lo tanto, la gestión para la reducción de la interferencia intercelda que se realizó a través de la asignación de frecuencias a las celdas fue efectiva.

Finalmente se decidió llevar la red un paso más allá, sometiéndola a una prueba de fuego: una concurrencia multitudinaria de usuarios a un evento de carácter religioso en la ciudad. Al ver que, en la zona elegida para dicho evento, las simulaciones de Monte Carlo nos

otorgaban valores muy bajos de conexiones efectivas (alrededor del 60%), se pudo decidir avanzar tecnológicamente e implementar radiobases LTE-Advanced, con una densidad mucho mayor de sitios.

Los resultados de este despliegue fueron excelentes, alcanzando nuevamente los valores deseados como objetivo aún bajo las condiciones extremas planteadas.

Al analizar nuestro proyecto como si su despliegue hubiera ocurrido en dos períodos de tiempo distintos, se puede apreciar cómo se puede evolucionar paulatinamente una red, por ejemplo, empezando por un sector pequeño que mantiene total compatibilidad con el resto de la red. De la misma forma, podemos pensar que en una red de LTE-A o LTE-A Pro bastante madura, debido a la densificación de población de sitios, sólo sería necesario agregar la tecnología que habilite 5G en los mismos, sobre todo si consideramos que ésta incluye la facilitación del acceso a todas las demás.

También la altura a la que colocamos nuestras últimas antenas (6 m) nos puede significar una simplificación en la instalación de estas. Hasta podríamos evitar la colocación de torres para utilizar métodos más fáciles de camuflaje.

La conclusión a la que se llega después de nuestro trabajo es que siempre se debe tener en cuenta la velocidad con que mutan las tecnologías actuales al momento de diseñar una red, conociendo con detalle cuáles fueron las que existieron antes y cuáles son las condiciones que definen las próximas, ya que podemos alcanzar grandes ahorros en tiempo y costo monetario si lo hacemos. Por el contrario, si no las consideramos, no podríamos aprovechar sitios ya elegidos, redes de backhaul que puedan reutilizarse al cambiar equipamiento en sus extremos o, en el peor de los casos, elegir implementar una tecnología que no vaya a tener soporte dentro de la siguiente generación.

Nuestro proyecto simulado nos entregó una idea bastante clara del tipo de redes que usamos y vamos a usar por los próximos años. Además, comprobamos que gran parte del diseño ya no se realiza de forma manual. Si otorgamos información pertinente y precisa al software, éste realizará cálculos que optimicen nuestra red en tiempos mucho menores de los que lograríamos. Por lo tanto, siempre es bueno familiarizarse con las herramientas de automatización de procesos disponibles.

Por último, se adjuntan imágenes de una importación de nuestra red a Google Earth, donde podemos apreciar en 3D la zona cubierta y cada uno de los sitios colocados, con su altura correspondiente y características de transmisión.

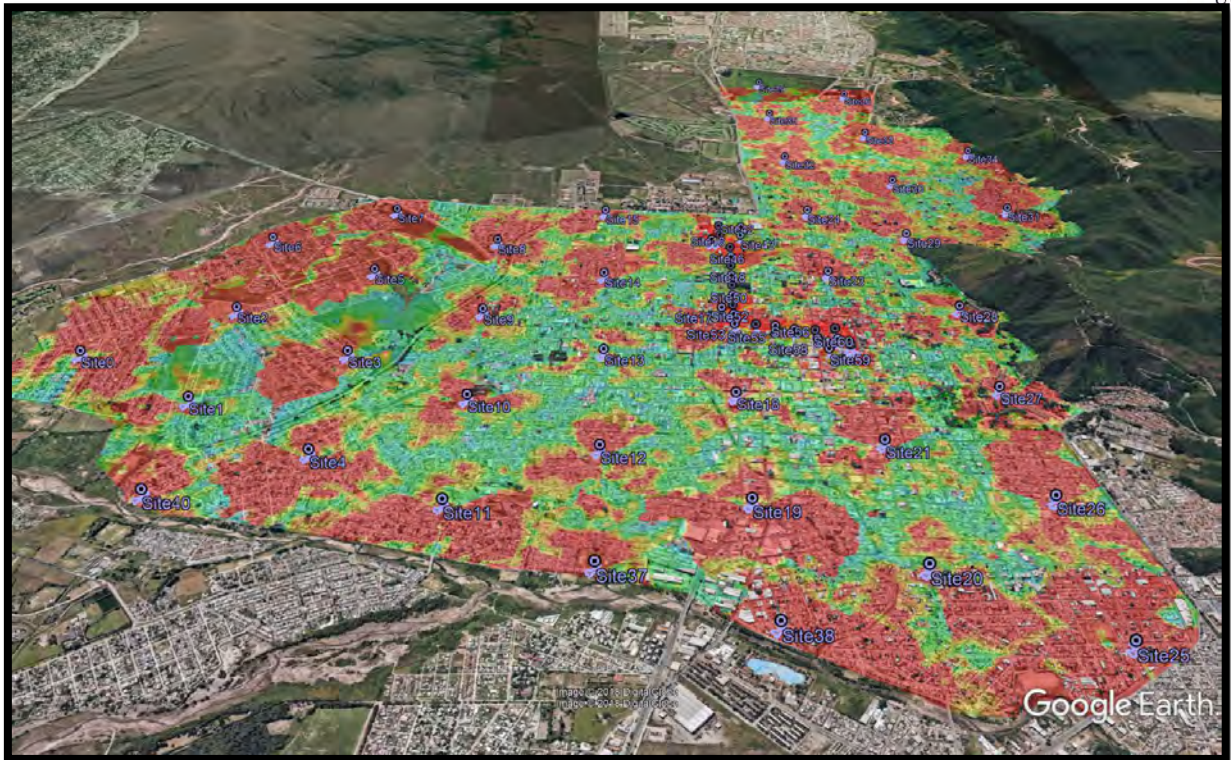


Imagen 10-1 Exportación de Sitios y Cobertura en 3D a Google Earth (a)



Imagen 10-2 Exportación de Sitios y Cobertura en 3D a Google Earth (b)

En la siguiente imagen se aprecia la diferencia entre los sitios que colocamos primero en LTE (de mayor tamaño), y los que colocamos para LTE-Advanced (más pequeños).

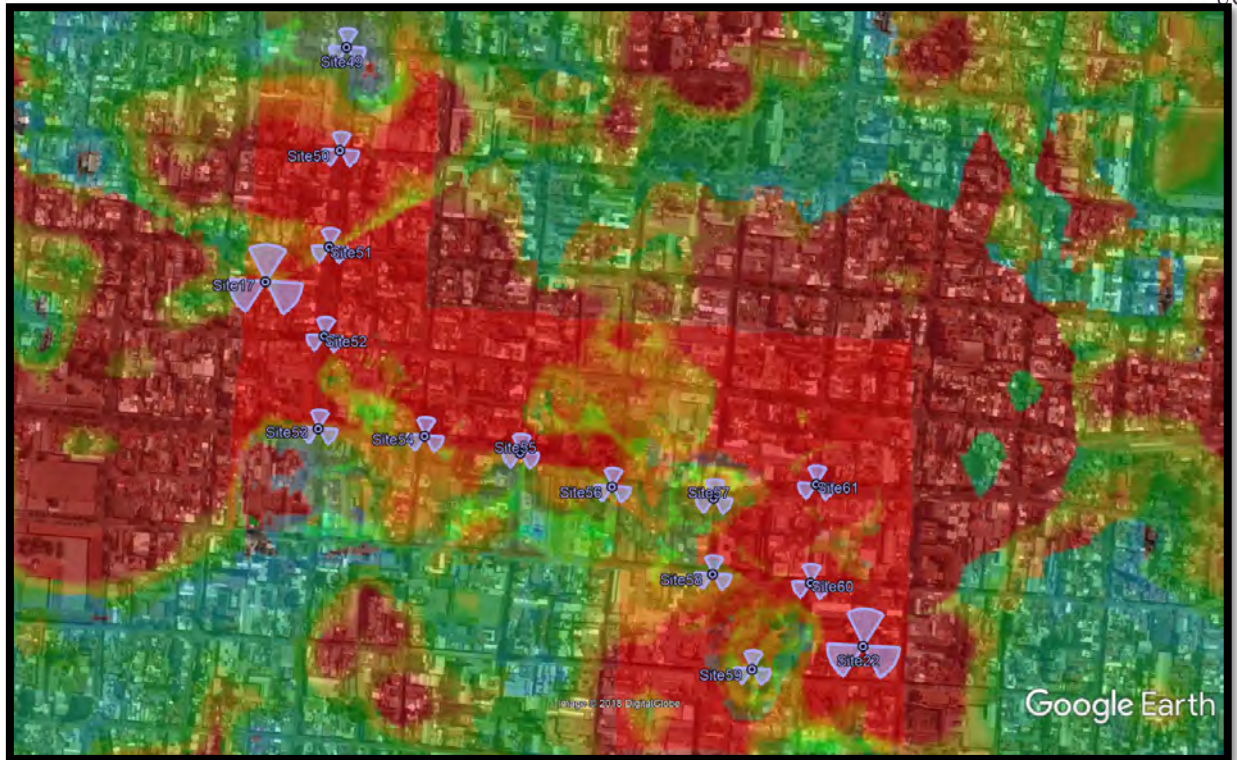


Imagen 10-3 Comparación Visual de Radiobases LTE y LTE-A



Imagen 10-4 Plano Cercano de una Radiobase LTE en Google Earth

11. Líneas Futuras de Investigación

La 5ta Generación trae consigo un gran salto en lo que respecta a exigencias de la red. Estas exigencias se basan en estadísticas de crecimiento de la demanda. A continuación, podemos ver el escenario en Argentina:

11.1. Estimaciones hacia el año 2021

Según un estudio realizado por Cisco, se enumeran a continuación los números que se verán en el año 2021 en Argentina, en comparación con datos tomados en el año 2016:

11.1.1. Tráfico de datos móviles

- El tráfico de datos crecerá 8 veces, a una tasa de crecimiento anual del 53%.
- En comparación al tráfico IP fijo, el tráfico móvil crecerá 3 veces más rápido.
- En el año 2016 el porcentaje de tráfico IP móvil era del 6%, mientras que en 2021 será del 20%.
- La conexión móvil media, generará 5198 Megabytes de tráfico de datos por mes en 2021, siendo de 684 Megabytes en 2016.

11.1.2. Tráfico de Video Móvil

- El tráfico de video móvil crecerá 11 veces, a una tasa anual del 62%.
- El video constituirá el 80% del tráfico de datos argentino en 2021, comparado al 61% a fines del 2016.

11.1.3. Dispositivos

- En 2021 habrán 160.9 millones de dispositivos conectados a la red, comparados con 115.5 millones en 2016.
- La cantidad de dispositivos interconectados per cápita, subirá de 2.6 a 3.5.
- El 53% de todos los dispositivos conectados lo harán a través de una red móvil.
- En 2016, los dispositivos M2M eran 26.1 millones, en 2021, 62.9 millones.

Una investigación que ayudaría a facilitar la preparación para 5G podría ser, por lo tanto, un análisis de la capacidad de tráfico actual para todo el sistema de comunicación móvil, ya que es un aspecto que puede implementarse y aprovecharse (gracias a las redes OTN), aún si las RAT no se encuentran listas.

11.2. Radiobases Temporales

Quedó evidenciado en nuestra implementación de LTE-A que puede haber casos específicos que requieran un aumento de recursos en una zona particular durante cierto tiempo. Si bien este despliegue puede hacerse de manera definitiva, se podría investigar la posibilidad de hacerlo sólo de forma temporal, con sitios desmontables, de dimensiones reducidas, que gracias a las características que ofrece una *Self Organizing Network* bajo *SDN*, se podría implementar sin significar un rediseño de la red.

El foco de esta investigación debería hacerse entonces en los medios físicos que permitan desplegar estos sitios flexibles, teniendo como claves el tipo de backhaul, energía, visibilidad, soporte, antenas, aspectos legales y variedad de RATs.

Bibliografía

- 3GPP. (2006). *3GPP - Release 8*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>
- 3GPP. (2008). *3GPP - Release 9*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/specifications/releases/71-release-9>
- 3GPP. (2009). *3GPP - Release 10*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>
- 3GPP. (2010). *3GPP - Release 11*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/specifications/releases/69-release-11>
- 3GPP. (2011). *3GPP - Release 12*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/specifications/releases/68-release-12>
- 3GPP. (2012). *3GPP - Release 13*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/release-13>
- 3GPP. (2013). *LTE - 4G Network Design and Planning Optimisation*. Mpirical Limited.
- 3GPP. (2014). *3GPP - Release 14*. Retrieved from <http://www.3gpp.org/release-14>
- Ahmadi, S. (2014). *LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding the 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies*. Elsevier Ltd.
- Akram, M. W. (n.d.). *Finding the best Radio Network Planning and Radio Network Optimization software*. Retrieved from <https://es.slideshare.net/waqasakram940/finding-the-best-rnp-and-rno-software>
- Chapman, T., Larsson, E., von Wrycza, P., Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2015). *HSPA Evolution: The Fundamentals for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd.
- Cisco. (2016). Argentina - 2021 Forecast Highlights. *VNI Complete Forecast Highlights*.
- Cisco. (2016). Argentina Mobile Highlights. *VNI Complete Forecast Highlights*.
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2011). *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Elsevier Ltd.
- Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J., & Beming, P. (2008). *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband* (Second ed.). Elsevier Ltd.
- ENACOM. (2017). Norma Técnica ENACOM-Q2-61.03 V17.1. *Terminales de Usuario de los Servicios de Comunicaciones Móviles*. Argentina.
- ENACOM. (2017). Norma Técnica ENACOM-Q2-61.04 V17.1. *Transceptores de Radiobases de los Servicios de Comunicaciones Móviles*. Argentina.

- Ericsson. (2017). *Mobile Data Traffic Growth Outlook*. Retrieved from <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2017/mobile-data-traffic-growth-outlook>
- Forsk. (2015). Atoll: Introducción a RNPs. In *Métodos para el aumento de la capacidad UMTS en Atoll*.
- La Rocca, M. (2016). *RSRP and RSRQ Measurement in LTE*. Retrieved from <https://www.larocasolutions.com/78-rsrp-and-rsrq-measurement-in-lte/>
- LTE Encyclopedia. (n.d.). LTE Radio Link Budgeting and RF Planning. Retrieved from <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning>
- Municipalidad de la Ciudad de Salta. (2011). *Código de Edificación*. Salta.
- Municipalidad de la Ciudad de Salta. (2018). *Zonificación Usos de Suelo*. Salta.
- NetChart. (2018). *NetChart Tim Argentina*.
- Nguyen, T. (2017). *Qorvo*. Retrieved from Small Cell Networks and the Evolution of 5G: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>
- Quiñones, L. I. (2016). Planificación y Optimización de una Red Lte con la Herramienta Atoll. Barcelona, Catalunya.
- Rodriguez, J. (2015). *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons Ltd.
- Salas, C. G. (2012). Planificación de una Red LTE con la Herramienta Atoll y Análisis del Impacto de las Estrategias de Packet Scheduling. Barcelona, Catalunya.
- Secretaría de Planeamiento Urbano. (2015). Plan Integral de Desarrollo Urbano Ambiental de Salta. Salta.
- Shum, Y. M. (2018). *La situación global del Internet en enero de 2018*. Retrieved from <https://yiminshum.com/situacion-global-internet-enero-2018/>
- Top Optimized Technologies. (2016). *Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos*. Dirección General de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información.
- USGS. (n.d.). *USGS - EarthExplorer*. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>