

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Simulación de una red celular LTE en la
ciudad Santiago de Cuba empleando la
herramienta Atoll**

Autor: Manuel Alejandro Cid Rodríguez

Tutora: Ing. Yanet Almaguer Lora

Santiago de Cuba

Junio, 2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Simulación de una red celular LTE en la
ciudad Santiago de Cuba empleando la
herramienta Atoll**

Autor: Manuel Alejandro Cid Rodríguez

manuel.cid@tle.fie.uo.edu.cu

Tutora: Ing. Yanet Almaguer Lora

Profesor Instructor, Departamento de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería
Eléctrica, yanet@fie.uo.edu.cu

Consultante: M.Sc. Lidice Romero Amondaray

Profesor Auxiliar, Departamento de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Eléctrica,
lidice@fie.uo.edu.cu

Ing. Leonardo Marin Dolz

Especialista C Telemática, Departamento de Servicios Móviles de ETECSA

Santiago de Cuba

Junio, 2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

PENSAMIENTO

“Con la constancia y tenacidad se obtiene lo que se desea, la palabra imposible no tiene significado”

Napoleón Bonaparte.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen por acompañarme y guiarme siempre.

A mis padres Sonia y Manuel por todo el apoyo, cariño y dedicación que hizo posible la culminación de esta etapa de mi vida.

A mis tutores, Yanet, Lidice y Leonardo por su disposición, dedicación y orientación durante la realización de este proyecto.

A todos mis amigos con los que he compartido estos inolvidables años de vida universitaria.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una investigación sobre el proceso evolutivo de los sistemas celulares, analizando los antecedentes que hicieron posible el surgimiento de LTE, se describen las características propias del sistema celular LTE. Se explican las particularidades de la herramienta de simulación Atoll y la metodología de diseño de una red LTE con este *software*. Se realiza la planificación de la red LTE en la ciudad Santiago de Cuba, y se analizan los resultados de la misma.

Palabras clave: 4G, LTE, simulador, redes.

ABSTRACT

In this paper, an investigation on evolutionary process of cellular systems was perform by analyzing the background that made possible the emergence of LTE, and then describe the characteristics of the system of fourth generation cellular. The peculiarities of the simulation tool and methodology Atoll design an LTE network with this software is explain. Planning LTE network in the city Santiago de Cuba was do and the results thereof are analyze.

Keywords: *4G, LTE, simulator, networks.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÓVILES.....	4
1.1 Primera generación (1G).	4
1.2 Segunda generación (2G).....	5
1.2.1 GPRS.....	6
1.2.2 EDGE.....	7
1.3 Tercera generación (3G).....	8
1.3.1 Características generales.	8
1.3.2 Sistemas 3.5G.....	10
1.4 Evolución a LTE.	10
CAPÍTULO 2: LTE (<i>LONG TERM EVOLUTION</i>).....	12
2.1 Características generales.	12
2.2 Requisitos del sistema LTE.	13
2.3 Mecanismo de acceso.	15
2.4 Arquitectura global del sistema.	17
2.4.1 Arquitectura de la E-UTRAN.....	20
2.4.2 Núcleo de la red	21
2.5 LTE-ADVANCED.....	24
CAPÍTULO 3: HERRAMIENTA DE SIMULACION ATOLL	27
3.1 Descripción de la herramienta	27
3.1.1 Ambiente de trabajo.....	27
3.1.2 Principales características	28
3.1.3 Definiciones de Atoll	29
3.1.4 Plantillas disponibles en el programa.....	31
3.1.5 Formato de los mapas	33
3.1.6 Modelos de propagación	33

3.1.7	Predicciones de cobertura disponibles.....	34
3.1.8	Simulaciones Monte Carlo	36
3.2	Metodología para el diseño de una red LTE	36
CAPÍTULO 4: SIMULACIÓN DE UNA RED LTE EN LA CIUDAD SANTIAGO DE CUBA EMPLEANDO EL SOTWARE ATOLL.....		38
4.1	Planificación de una red LTE en la ciudad de Santiago de Cuba.....	38
4.1.1	Elección del modelo de propagación	41
4.1.2	Configuración de la red.....	42
4.1.3	Configuración de los parámetros de tráfico.....	46
4.1.4	Predicciones de cobertura según el nivel de señal	49
4.1.5	Asignación de vecinos.....	57
4.1.6	Asignación de frecuencias.....	57
4.1.7	Asignación de identificadores de células físicas.	57
4.1.8	Simulación.....	58
4.1.9	Predicciones de cobertura según la calidad de la señal.....	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		65
ANEXOS.....		67

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles se han ido desarrollando acorde a los nuevos intereses de los usuarios. Cada vez los consumidores son más exigentes y buscan nuevas y mejores alternativas de comunicación. Es por esto que el desarrollo hacia nuevas tecnologías móviles apunta hacia la transmisión de alta velocidad, permitiendo el acceso a nuevos servicios como la banda ancha móvil. Para la implementación de estas nuevas tecnologías se hace indispensable el uso de simuladores de sistemas utilizando equipos informáticos, los cuales han experimentado un crecimiento exponencial en el campo de las redes de telecomunicaciones.

Cada vez que una nueva tecnología móvil se está considerando para su despliegue a gran escala, cientos de sus parámetros de radiofrecuencia pasan por un proceso de ajuste con el fin de averiguar su valor óptimo. Sin embargo, esta fase requiere mucho tiempo y es muy laboriosa. Por lo tanto, antes de su despliegue comercial se hace una extensa simulación de la red y se ajustan, en primera aproximación, sus parámetros. Con ello se pretende desplegar una red optimizada y con un menor costo. Al surgir el sistema LTE y además hacerse disponible en el mercado de herramientas que permiten modelar estas redes, surgió la necesidad de extender los conocimientos teóricos al ámbito práctico para observar el comportamiento de estas redes bajo diferentes condiciones y establecer comparaciones con los resultados esperados.

En Cuba se realizan inversiones en función de incrementar el acceso masivo a las comunicaciones móviles, pero este desarrollo se ve limitado por la reducida cantidad de Estaciones Bases Transceptoras instaladas, así como la tecnología de acceso implementada (GSM), lo que imposibilita reducir los costos del servicio de telefonía móvil prepago, impidiendo un acelerado y necesario crecimiento del número de clientes y servicios.

Con la posibilidad de configurar el correo Nauta en los celulares se pudo apreciar el considerable incremento del tráfico de datos a través de la red móvil, provocando saturación en algunas radio bases ubicadas en zonas de alto tráfico, generando el fenómeno del “falso apagado” y lentitud en el envío y recepción de los mensajes de correo electrónico, ocasionando molestias a los usuarios del servicio.

En recientes declaraciones públicas de dirigentes cubanos se manifiesta la disposición de la máxima dirección del país de masificar el acceso a Internet, lo que se demuestra con la creación y ampliación de las salas de navegación creadas por ETECSA. Como es lógico pensar lo ideal para cumplimentar este proyecto sería poder dar acceso a través de los terminales móviles, teniendo en

cuenta el elevado número de clientes que posee la telefonía celular (superior a 2,5 millones según reportes del 2015), muy por encima de cualquier otra modalidad de acceso.

Para poder asumir la demanda que se generaría y solucionar definitivamente los problemas presentes en la actualidad se hace necesario migrar el sistema de telefonía móvil a una generación superior, pudiendo de esta manera suplir las demandas asociadas a un incremento en la transmisión de datos.

Actualmente, los esfuerzos se centran en la transición desde 2G hacia 3G, con la que se adopta un estándar global, con capacidades de *roaming* en todo el planeta, además de incrementar considerablemente el ancho de banda y los mecanismos de acceso permitiendo un aumento en las velocidades de transmisión de datos. Esta concepción de evolución en los sistemas de telefonía móvil conlleva al estudio y preparación en los estándares más recientes de los sistemas de comunicaciones móviles específicamente las redes LTE (*Long Term Evolution*), que es la tecnología de acceso inalámbrica de banda ancha más reciente, denominada a nivel de usuario y comercialmente sistema de comunicación móvil de cuarta generación (4G).

El presente trabajo propone la planificación de una red LTE en la ciudad de Santiago de Cuba utilizando la herramienta de simulación de radio *Atoll*, de reconocido prestigio a nivel internacional por todas las variables que se consideran al realizar la simulación y la variedad y veracidad de los resultados. Además se tienen en cuenta la tecnología realmente instalada y los sitios donde se encuentran. Múltiples son las inquietudes que surgen como base para emprender este proyecto, planificar una red de cuarta generación que en estos momentos solo es operativa en pocos países, permite vislumbrar los múltiples beneficios de los que se habla, por el momento, solo en los libros y las especificaciones. En este sentido, aprovechando la posibilidad de disponer de un *software* que permite modelar estas redes, se estudiarán diversos parámetros haciendo mayor hincapié en las funciones referentes a la gestión de recursos de radio.

Problema a resolver

No existe, en el Departamento de Servicios Móviles de ETECSA, un análisis del comportamiento de una red LTE en la ciudad de Santiago de Cuba.

Objeto de estudio

Telefonía celular.

Objetivo General

Simular una red LTE en la ciudad de Santiago de Cuba.

Objetivos específicos:

- Estudiar la evolución de los sistemas celulares.
- Analizar las particularidades de la red LTE.
- Estudiar de la herramienta de simulación Atoll.
- Buscar información del estado actual de la red de telefonía móvil en Santiago de Cuba.
- Simular la red LTE con la herramienta Atoll.
- Analizar los resultados.

Hipótesis

Si se simula una red LTE en la ciudad de Santiago de Cuba, el Departamento de Servicios Móviles de ETECSA podría analizar el comportamiento de esta, para su posterior despliegue.

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, el trabajo se estructura en cuatro capítulos. En el **Capítulo 1** se estudia el proceso evolutivo de las redes celulares predecesoras a LTE, profundizando en la arquitectura de cada generación, lo cual sienta las bases para el estudio posterior de la cuarta generación. Seguidamente se realiza un análisis del sistema LTE, lo cual constituye el objeto de estudio del **Capítulo 2**. Luego, se procede a explicar las particularidades del *software* Atoll y la metodología de diseño de la red LTE en este *software*, constituyendo el tópico del **Capítulo 3**. Finalmente en el **Capítulo 4** se realiza la planificación de la red LTE en la ciudad Santiago de Cuba y se analizan los resultados de las simulaciones.

Capítulo 1: EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÓVILES.

En este capítulo se explican las principales características de la primera generación de la telefonía móvil y se describe de manera detallada de las tecnologías 2G (Segunda Generación) y 3G (Tercera Generación). Con el análisis de estas tecnologías se podrá obtener una mayor comprensión de la cuarta generación LTE. Las tecnologías 2G y 3G que se explican en este trabajo son las desarrolladas por la organización 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) ya que estas, GSM y UMTS, han sido las tecnologías que han predominado en cada generación y han entregado los antecedentes para desarrollar LTE. En la figura 1.1 se presenta la evolución de estos sistemas.

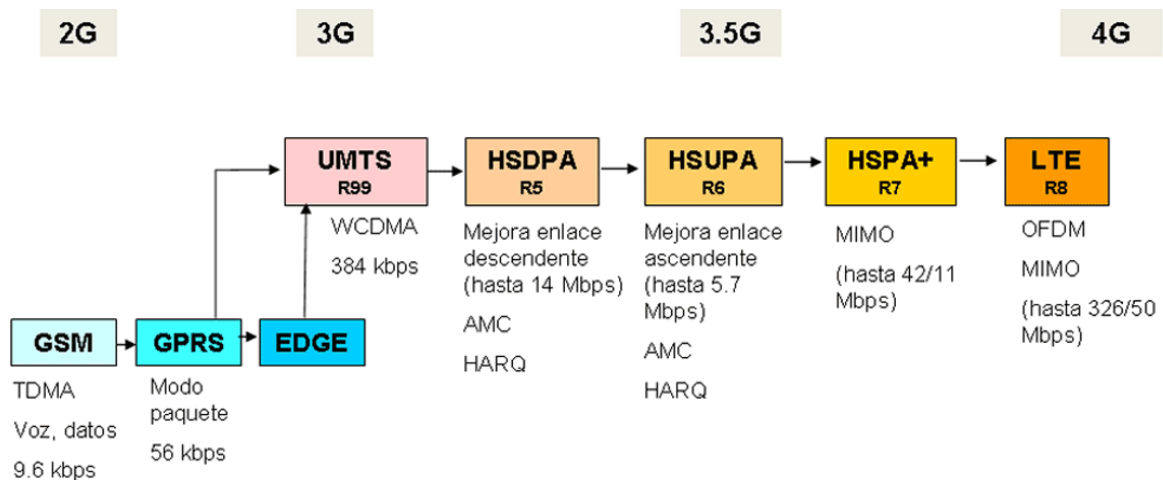


Fig. 1.1. Evolución de las redes celulares.

1.1 Primera generación (1G).

La primera generación de telefonía móvil, apareció en los años ochenta, su modo de transmisión era analógico. Las redes más destacadas, fueron la telefonía nórdica móvil *Nordic Mobile Telephone* (NMT), el sistema de servicio de telefonía móvil avanzado *Advanced Mobile Phone Service* (AMPS) el cual utilizaba la banda de frecuencia de 824-894 MHz, el sistema de comunicación de acceso total *Total Access Communication System* (TACS) y *Extended TACS* (ETACS). Principalmente se ofrecía servicio de voz y empleaban como esquema de acceso múltiple FDMA. Empleaban la modulación analógica FM para la voz, dividían el espectro disponible en canales que repartían a las estaciones base, de manera que para evitar interferencias se asignaban canales distintos a las estaciones bases vecinas, y por cada llamada se asignaba un canal dedicado para cada enlace por todo el tiempo de duración de la misma. Todo esto requería de un ancho de banda grande para poder soportar varios usuarios. Entre sus limitaciones se

encontraban las bajas velocidades de transmisión, los enlaces pocos estables que provocaban la pérdida de la comunicación fácilmente y la poca seguridad que poseía el sistema, además de que la señalización se realizaba en banda por lo que además de ser perceptible por el usuario, no permitía el uso de telefax.

Por el lado de su arquitectura, era poco robusta ya que estaba formada por una gran cantidad de sistemas incompatibles entre sí, lo que hacía muy difícil la opción de tener cobertura fuera de la zona geográfica (*roaming*).

1.2 Segunda generación (2G).

La segunda generación de telefonía móvil se caracteriza por introducir la comunicación digital. Este sistema utiliza protocolos de codificación más sofisticados que los de la 1G y se emplea en los sistemas de telefonía celular actuales. Las tecnologías predominantes son: Sistema Global para Comunicaciones Móviles (*GSM, Global System for Mobile Communications*); IS-136 (*Interim Standard-136*), conocido también como ANSI-136 (*American National Standards Institute-136*); Acceso Múltiple por División de Código (*CDMA, Code Division Multiple Access*) y PDC (*Personal Digital Communications*), éste último utilizado en Japón. [1]

La característica más relevante de los sistemas de segunda generación con respecto a los de primera es que pasaron de ser analógicos a digitales, lo que implica una serie de ventajas como lo es una mayor calidad frente a interferencias y mejor utilización del espectro. Además, gracias a los avances en las tecnologías digitales se logró la miniaturización de los equipos terminales, así como la reducción del costo y del consumo de potencia de los mismos, permitiendo que las comunicaciones móviles pasaran de ser utilizadas por un grupo selectivo de personas con vehículos a extenderse a toda la población interesada en comunicarse en cualquier momento y desde cualquier lugar. Por otro lado, las técnicas de procesado digital de la información como la modulación digital, codificación de canal, codificación de fuente, sistemas entrelazados, cifrado de las comunicaciones, entre otras, permitieron mejoras en cuanto a calidad, velocidad de transmisión, capacidad del sistema y la posibilidad de agregación de nuevos servicios como el buzón de voz, identificador de llamadas y mensajes de texto. [2]

El sistema GSM utiliza la técnica de duplexado FDD (*Frequency Division Duplex*) en la banda de 900 MHz, operando inicialmente a frecuencias de 890-915 MHz en el enlace ascendente y 935-960 MHz en el enlace descendente. Como técnica de acceso emplea una combinación de frecuencia y tiempo, es decir, utiliza FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) para dividir el espectro total de 25 MHz en 124 portadoras de 200 kHz y a su vez cada canal de 200 kHz lo divide

en 8 ranuras de tiempo empleando TDMA (*Time Division Multiple Access*). A pesar de que el sistema GSM fue creado para operar en la banda de 900 MHz, posteriormente surgieron variaciones del sistema, de las cuales las más importantes son DCS-1800 y PCS-1900, también conocidas como GSM-1800 y GSM-1900 respectivamente, que fueron adoptadas por algunos países dentro y fuera de Europa. [3]

La arquitectura GSM conserva los bloques generales de una estructura básica de red móvil, como se muestra en la figura 1.2. Entre cada uno de estos bloques funcionales, existe una interfaz eléctrica adecuada, responsable de hacer posible el intercambio de información entre ellos. A su vez, cada bloque se encuentra constituido por sub-bloques, que realizan operaciones específicas dentro de la red.

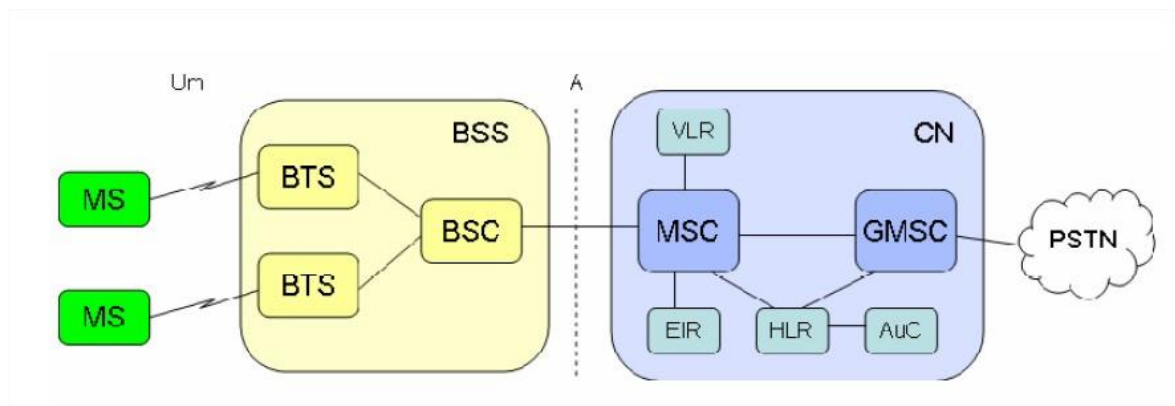


Fig. 1.2. Arquitectura de redes GSM (2G).

Las versiones originales de 2G están orientadas a modo circuito, lo que permite soportar transmisiones de voz de manera muy eficiente pero solo algunos servicios de transmisión de datos a baja velocidad (9.6 – 14.4 Kbps). Para alcanzar mayores velocidades en la transmisión de datos surgieron una serie de tecnologías conocidas como generación 2.5 por suponer la transición entre los sistemas de segunda y de tercera generación [4]. Las tecnologías desarrolladas para mejorar el sistema fueron GPRS (*General Packet Radio System*) y luego EDGE (*Enhanced Data rate for GSM Evolution*). GPRS fue una actualización que agregó al núcleo de red un bloque de conmutación de paquetes, que se encargó de gestionar el tráfico de datos. Mientras que EDGE se basó en mejoras en la interfaz aérea, lo que permitió un aumento en la velocidad en la transmisión de datos.

1.2.1 GPRS.

El sistema GPRS surge como una extensión del sistema GSM para la transmisión de la información empleando la técnica de conmutación de paquetes. Esta técnica permite una mayor

eficiencia espectral ya que los recursos no son asignados de manera exclusiva para una única comunicación sino compartidos entre varios usuarios, y además se toma en cuenta la asimetría de los servicios de paquetes de datos pues la asignación de los recursos en los enlaces ascendente y descendente se realiza de manera separada. Asimismo surge la posibilidad de realizar una tarificación del servicio más atractiva al usuario, basada en la cantidad de paquetes transmitidos y no en la duración de la conexión. [5]

Los nuevos nodos que incluye GPRS en el núcleo de la red para el tráfico de paquetes son el Nodo de Soporte GPRS de Servicio SGSN (*Serving Support Node*) y el nodo de Soporte del Gateway GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) e incorpora una unidad PCU (*Packet Control Unit*) en las BSC (*Base Station Controller*), con la capacidad de que los canales sean asignados dinámicamente a GSM o GPRS dependiendo de los niveles de tráfico dando siempre prioridad a los servicios de voz [6]. Cuenta con la interfaz Gb, la cual permite la comunicación de datos entre el BSC y el SGSN, quedando la interfaz A conectada solamente al MSC, encargándose exclusivamente del tráfico de voz. Otra de las modificaciones que realiza GPRS a la arquitectura original GSM es sobre el HLR que ahora debe almacenar información de las cuentas de usuarios de datos, que se guardan en el registro GR (*GPRS Register*) del HLR. En la figura 1.3 se muestra la arquitectura de las redes GPRS.

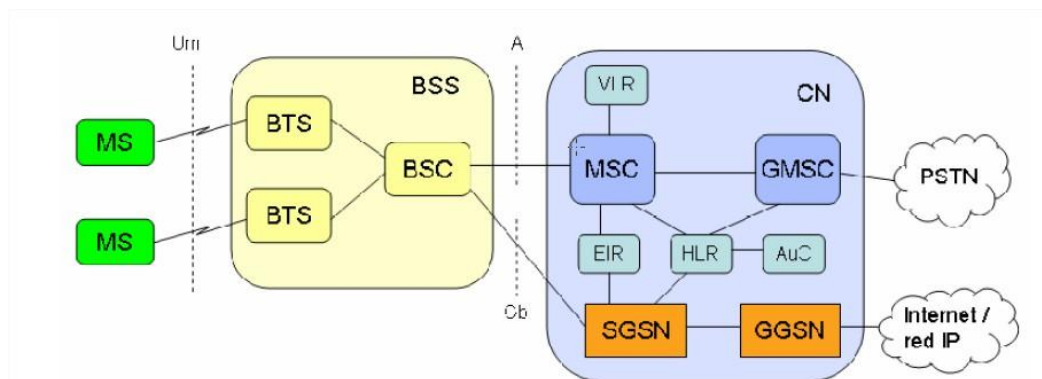


Fig. 1.3. Arquitectura de redes GPRS (2.5G).

1.2.2 EDGE.

GPRS al permitir la transmisión de datos y la conexión a internet, mostró las limitaciones que existían con respecto a las velocidades de transmisión. Para solucionar este tema se realizaron modificaciones en la interfaz aérea de GSM/GPRS, a las que denominó EDGE. A la combinación de la red de acceso de radio GSM/GPRS y EDGE se le llamó GERAN (*GSM EDGE Radio Access Network*).

El objetivo de EDGE es incrementar la velocidad de datos utilizando la portadora de radio de 200 KHz de GSM, pero cambiando el tipo de modulación utilizada. En GSM/GPRS la modulación ocupada era GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) que transmitía 1 bit de información por cada símbolo. EDGE introduce la modulación 8PSK que permite triplicar la tasa de transmisión de datos de GPRS a cambio de una menor área de cobertura. La máxima velocidad de transmisión en EDGE es de 384 kbps utilizando 8 *time slots* y el más eficiente de los esquemas de modulación/codificación. [7]

1.3 Tercera generación (3G).

A pesar de las mejoras de velocidad para datos que entregó EDGE en GSM/GPRS, el sistema siguió siendo limitado sobre todo para el acceso a servicios multimedia y conexiones a internet. Por otra parte debido al aumento de usuarios se requirió de un sistema que permitiera mayor capacidad, entre otras modificaciones. Estas razones permitieron la evolución hacia la tercera generación de sistemas móviles. La tecnología que permitía mejorar GSM/GPRS/EDGE, y que provocaba un menor impacto fue UMTS, que también fue desarrollada por la 3GPP. Los *Release* involucrados en la estandarización de UMTS fueron los *Release* 99, 4, 5, 6, 7, 8, 9, los cuales se muestran en la figura 1.4 [8]



Figura 1.4. Características principales de las Release de UMTS (Fuente: [4])

1.3.1 Características generales.

Para mejorar las velocidades de transferencia y capacidad en la red, UMTS modifica el tipo de acceso y los terminales móviles. Esta generación considera muy pocos cambios en la arquitectura de la red, lo que permite compatibilidad (coexistencia) entre las redes. Los sistemas 3G se plantean tasas objetivo de 144 kbps para entornos vehiculares de gran velocidad, 384 kbps para

espacios abiertos y velocidades de hasta 2 Mbps para entornos interiores de baja movilidad. Con estas velocidades los usuarios pueden utilizar sus terminales móviles en una variedad de servicios desde llamadas telefónicas, acceso a redes LAN corporativas, acceso a Internet, envío de correo electrónico, transferencia de archivos e imágenes de calidad e incluso servicios de video conferencias y transmisión de audio y video en tiempo real. [2]

UMTS también separa definitivamente el tráfico de datos y de voz en dos dominios. En el núcleo de red se definen el dominio de conmutación de circuitos (CS) para los servicios de voz y el dominio de conmutación de paquetes (PS) para los servicios de datos. Permite también que los sistemas de datos estén basados totalmente en protocolo IP, lo que facilita el sistema de cobro en función del tráfico o descarga.

Utiliza un par de canales de 5 MHz, uno en el rango 1900 MHz para el enlace ascendente y uno en el rango 2100 MHz para enlace descendente. Las bandas de frecuencias específicas originalmente definidas por el estándar UMTS son 1885-2025 MHz para el enlace ascendente y 2110-2200 MHz para el enlace descendente. [9]

La arquitectura de UMTS se muestra en la figura 1.5, la misma se compone de tres grandes bloques, el terminal móvil (*UE: User Equipment*), Red de Acceso de radio (*UTRAN: UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y el núcleo de red (*CN: Core Network*).

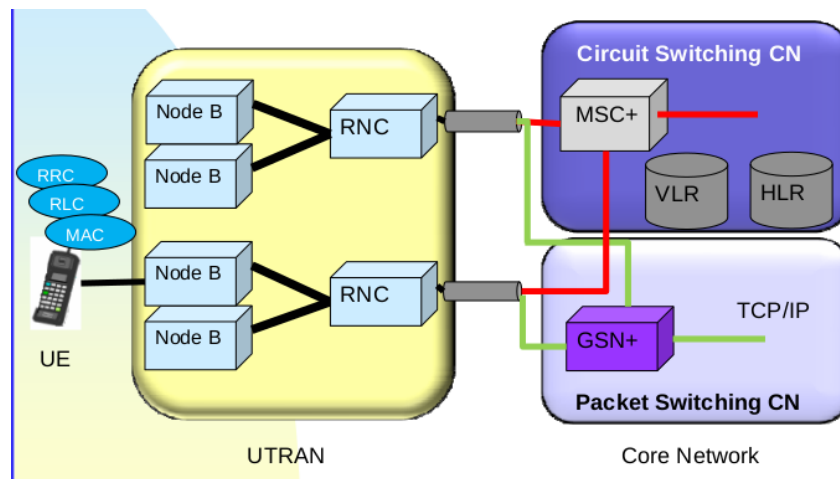


Fig. 1.5. Arquitectura Redes UMTS (3G)

Los modos de operación de UMTS en cuanto al acceso radio son: el modo FDD empleando la técnica de acceso W-CDMA (*Wideband CDMA*), donde los enlaces de las transmisiones de subida y de bajada emplean dos bandas de frecuencia diferentes, se le asigna un par de bandas de frecuencia para cada enlace, las cuales se denominan frecuencias emparejadas. El otro modo es

TDD (*Time Division Duplex*), el cual emplea la técnica de acceso TD-CDMA (*Time Division-CDMA*), donde las transmisiones del enlace ascendente y del descendente son transportadas en la misma banda de frecuencia usando intervalos de tiempo de forma síncrona, así las ranuras de tiempo en un canal físico se asignan para los flujos de datos de transmisión y de recepción. El uso de la tecnología CDMA implica un cambio en la arquitectura de red de acceso radio GSM/GPRS/EDGE permitiendo la posibilidad de emplear un reuso de frecuencia de factor 1, siempre que se tengan controladas las interferencias intercelulares, para lograr de esta manera una gran eficiencia espectral. [10]

1.3.2 Sistemas 3.5G.

Las mejoras más importantes de las características del acceso radio UMTS se describen en el *Release 5* conocido como HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y en el *Release 6* llamado HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) que juntas se conocen como HSPA (*High Speed Packet Access*). HSPA mejora los servicios de paquetes de datos introduciendo mayores velocidades y menores retardos, manteniendo al mismo tiempo una buena cobertura y una gran capacidad en el sistema. Para lograr esto, HSPA introduce nuevos esquemas demodulación de mayor nivel, control de potencia rápido, programación rápida y mecanismos de retransmisión híbrida HARQ con redundancia incremental. De esta manera se logran velocidades de hasta 14.4 Mbps en HSDPA y 5.7 Mbps en HSUPA. [11]

1.4 Evolución a LTE.

A pesar del mejoramiento en términos de conexión y velocidad entregados por las actualizaciones HSPA/HSPA+, las redes UMTS presentan varias limitaciones que afectan el buen funcionamiento de los sistemas de banda ancha y de voz. Algunas de las desventajas que tiene este sistema se explican a continuación:

- Cobertura de red limitada. Dependiendo del lugar de localización, la velocidad de transferencia puede disminuir considerablemente o incluso carecer totalmente de cobertura.
- Disminución de la velocidad si el dispositivo desde el que se conecta está en movimiento. Las redes UMTS no logran mantener la calidad de la señal cuando se realizan muchos *handover*, por ejemplo cuando se está circulando en un automóvil.

- Sistema jerárquico. Al tener división de sistema de voz (CS) y datos (PS) provoca aumentos en los costos de operación y mantenimiento de la red. Además el sistema de voz es similar a la tecnología previa, lo que entrega sistemas de voz de baja calidad.
- Sistema poco flexible. Al tener un tipo de acceso por código no permite la flexibilidad en las bandas de frecuencia. Solo puede operar con bandas de 5MHz o múltiplos, por lo que no es capaz de soportar otros tipos de accesos como el de GSM/GPRS. Las redes UMTS funcionan de forma independiente con respecto a GSM, pero entre ellas puede haber comunicaciones gracias a los puertos de enlace entre redes.

Debido al crecimiento en la demanda de servicios de paquetes de datos y la posibilidad de crear terminales aptos para ofrecer nuevas aplicaciones con mayores capacidades para audio, video, imágenes y otras actividades multimedia llevó a la necesidad de crear una nueva generación de telefonía móvil. Los requerimientos generales que determinó la 3GPP para el diseño de la red LTE fueron [12], [13]:

- Red simplificada sin división de dominios.
- Red unificadora con tecnologías previas.
- Red eficiente y automatizada.
- Velocidades de datos comparables con la banda ancha fija.
- La reducción de costos por bit en el tráfico.
- Mejor calidad y tipos de servicio.
- Ahorro de energía en los terminales móviles.

Capítulo 2: LTE (**LONG TERM EVOLUTION**)

En este capítulo se explica en qué consiste la tecnología LTE (*Long Term Evolution*), se recogen las especificaciones técnicas de este sistema y las tecnologías utilizadas para el acceso a la red, así como la arquitectura de red de esta generación.

2.1 Características generales.

El sistema LTE es una colección de tecnologías que inserta a las comunicaciones móviles en una red simplificada, de alto rendimiento. Dentro de los avances que entrega LTE, se encuentra el aumento de las velocidades de transmisión de datos en la interfaz aérea, esto gracias a la implementación de nuevos tipos de acceso en el *uplink* como en el *downlink*, junto con la incorporación de la técnica de acceso con múltiples antenas en el receptor y transmisor (*MIMO*).

El objetivo general de esta tecnología es proporcionar un rendimiento extremadamente alto en el acceso de radio con movilidad total y a velocidad vehicular. El estándar LTE, introduce por primera vez, todos los servicios, incluida la voz sobre el protocolo IP (*Internet Protocol*) o sea que LTE es una tecnología totalmente basada en Internet, de ahí el concepto de AIPN o sea "*All Internet Protocol Network*". Lo anterior significa que en lugar de usar canales específicos de voz, datos y control por separado, toda la información se transmite a través de los protocolos de Internet, lo cual es una gran ventaja, debido a que permite tener varios servicios funcionando a la vez, por ejemplo se podría estar viendo la televisión en un recuadro, mientras se navega en Internet.

Con respecto al espectro, LTE provee flexibilidad o escalabilidad entre bandas de frecuencia. Además es capaz de operar en múltiples bandas, incluyendo las ocupadas por 2G y 3G.

LTE tiene la capacidad de solucionar los problemas de la red de forma autónoma, ya que posee un sistema de auto-optimización y auto-reparación mediante el seguimiento de indicadores en la red junto con la medición de los datos en los terminales. También tiene configuración automática "*Plug and Play*" al momento de incorporar nuevos elementos a la red, logrando una fácil actualización de *hardware* en el sistema. El comportamiento autónomo de la red permite bajar los costos de mantención y actualización.

Otra de las mejoras que entrega LTE es el ahorro de energía. LTE incorpora una nueva configuración para el control de recursos de energía denominado RRC (*Radio Resource Control*), el cual permite en estados de inactividad "*Idle*" del terminal reducir el flujo de información pero manteniendo la movilidad. De esta forma se logra reducir el consumo energético del terminal móvil, estaciones bases y en el núcleo de la red. [11]

2.2 Requisitos del sistema LTE.

LTE se ha especificado en base a una serie de requisitos en cuanto a la velocidad de datos, la capacidad, la eficiencia espectral y la latencia. Con el fin de cumplir con estos requisitos, LTE se basa en un nuevo esquema de acceso múltiple en la interfaz aire: *Orthogonal Frequency Division Múltiple Access* (OFDMA) en enlace descendente o *Downlink* (DL) y *Single Carrier-Frequency División Múltiple Access* (SC-FDMA) en enlace ascendente o *Uplink* (UL). Además, la incorporación de esquemas *Múltiple-Input Múltiple-Output* (MIMO) es una parte esencial de las mejoras que LTE aporta a los estándares del 3GPP. En cuanto a la arquitectura, LTE incorpora algunos cambios importantes a los conceptos de protocolos existentes en UMTS, con el fin de simplificar la arquitectura general de la red de acceso de radio y el núcleo de la red. LTE incluye tanto un modo de operación duplexado por división en frecuencia o *Frequency Division Duplexing* (FDD) como un modo duplexado por división en tiempo o *Time Division Duplexing* (TDD).

Al inicio del proceso de normalización de LTE se identificaron los requisitos principales para el diseño de un sistema de estas características, estos requisitos pueden resumirse como siguen:

- 1. Velocidad de datos:** Objetivo de 100 Mbps en tasas de transmisión de pico en enlace descendente y de 50 Mbps en enlace ascendente, en 20 MHz de ancho de banda, asumiendo terminales con 2 antenas en recepción y una en transmisión. Estas tasas de transmisión son casi 7 veces las tasas de transmisión de HSDPA *Release 6* en el sentido descendente y casi 8 veces a HSUPA en el sentido ascendente.
- 2. Eficiencia espectral:** En las mismas condiciones del punto anterior, 20 MHz de ancho de banda, la eficiencia espectral requerida es de 5 bits/s/Hz en DL y 2.5 bits/s/Hz en UL, cifras que están entre 3 y 4 veces por encima de las de *Release 6* en DL (HSDPA) y de 2 a 3 veces mejor que en *Release 6* en el enlace ascendente.
- 3. Rendimiento:** El rendimiento (*throughput*) medio por usuario y MHz en enlace descendente debe ser entre 3 y 4 veces superior al de *Release 6* y de 2 a 3 veces mejor que en *Release 6* en el enlace ascendente.
- 4. Latencia:** La latencia en el plano de usuario se refiere al tiempo de tránsito unidireccional de un paquete desde que está disponible en la capa IP en el terminal y la disponibilidad de este paquete en la capa IP de un nodo en la red de acceso de radio, o viceversa, será inferior a 5 ms. También se reducirá el tiempo de latencia en plano de control para permitir tiempos de transición de menos de 100 ms en un terminal desde el estado *camped* al estado *active*.

5. **Ancho de banda:** deben soportarse anchos de banda escalables de 5, 10, 15 y 20 MHz. También se soportarán anchos de bandas menores que 5 MHz para mayor flexibilidad, en particular, 1.4 MHz y 3MHz.
6. **Asignación de espectro:** Posibilidad de uso de banda pareada (modo FDD) y banda no pareada (TDD), como se muestra en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3.

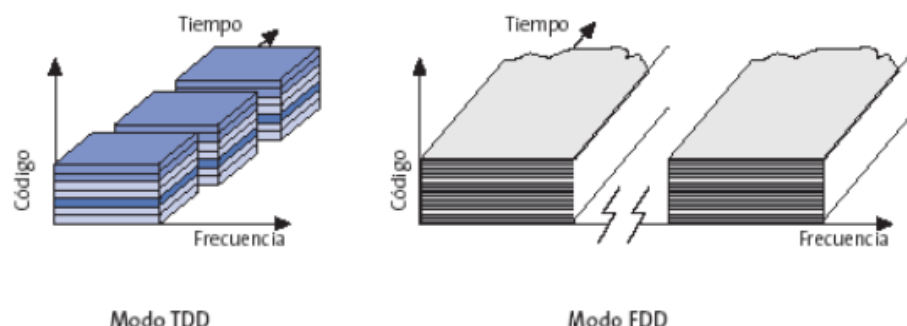


Fig. 2.1. Modo TDD y FDD en LTE.

Banda número	Uplink (UL)	Downlink (DL)	Separación Duplex
	$F_{UL, low} - F_{UL, high}$	$F_{DL, low} - F_{DL, high}$	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	190 MHz
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	80 MHz
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	95 MHz
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	400 MHz
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	45 MHz
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	45 MHz
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	120 MHz
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	45 MHz
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	95 MHz
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	400 MHz
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	48 MHz
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	30 MHz
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	31 MHz
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	30 MHz
15	Reservada	Reservada	
16	Reservada	Reservada	
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	30 MHz
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	45 MHz
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	45 MHz
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	31 MHz
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	48 MHz
22	3410 MHz – 3490 MHz	3510 MHz – 3590 MHz	100 MHz
23	2000 MHz – 2020 MHz	2180 MHz – 2200 MHz	80 MHz
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	101 MHz
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	80 MHz

Fig. 2.2. Bandas LTE con FDD.

Banda número	$F_{UL_low} - F_{UL_high}$
33	1900 MHz – 1920 MHz
34	2010 MHz – 2025 MHz
35	1850 MHz – 1910 MHz
36	1930 MHz – 1990 MHz
37	1910 MHz – 1930 MHz
38	2570 MHz – 2620 MHz
39	1880 MHz – 1920 MHz
40	2300 MHz – 2400 MHz
41	2496 MHz – 2690 MHz
42	3400 MHz – 3600 MHz
43	3600 MHz – 3800 MHz

Fig. 2.3. Bandas LTE con TDD.

7. Interconexión: Debe garantizarse la interconexión con los sistemas existentes del 3GPP y otros sistemas no-3GPP. [11]

2.3 Mecanismo de acceso.

El sistema LTE se caracteriza por ofrecer una canalización flexible que permite alcanzar altas velocidades de transmisión y facilitar la migración gradual hacia LTE de bandas espectrales ocupadas por 2G y 3G. En este sentido, las posibles canalizaciones son: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz y 20 MHz, siendo esta última la considerada para alcanzar velocidades de transmisión en el orden de 100 Mbps en el *downlink*. Además de la canalización flexible, LTE permite trabajar en bandas pareadas con FDD y no pareadas con TDD. [14]

En vista de que el ancho de banda de 20 MHz introduciría elevadas distorsiones debido a la interferencia intersímbolo (ISI) ocasionada por la propagación multicamino, se adoptó la técnica de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el *downlink* que permite dividir el espectro en múltiples portadoras de banda estrecha ortogonales entre sí con una separación fija de 15 KHz. Para obtener los distintos anchos de banda mencionados se varía el número de sub-portadoras, manteniendo la separación entre ellas constante. Incluso utilizando OFDMA queda presente cierta interferencia, por lo tanto se emplea un prefijo cíclico que permite eliminar la ISI ofreciendo de esta manera una gran eficiencia espectral. [8]

OFDMA permite realizar planificación de frecuencia oportunista, que consiste en que, con periodicidad de un TTI, se asigna cada sub-banda (grupo de sub-portadoras) del espectro disponible a aquel usuario cuyo canal presente mejor SNR en esa sub-banda. De esta forma se

maximiza el *throughput* global de la célula. Para usar este tipo de planificación en enlace ascendente se requiere, sin embargo, que la estación base conozca el canal de cada móvil en toda la banda disponible, para lo cual éste debería transmitir periódicamente símbolos piloto en toda la banda y no solo en la banda estrecha que tiene asignada para transmitir datos. En enlace descendente los terminales también miden el canal en banda ancha usando los pilotos transmitidos por la estación base y generan informes llamados indicador de calidad del canal o *Channel Quality Indicator* (CQI) que envían a la base para que esta pueda realizar la planificación en enlace descendente. [15]

Gracias al *scheduler* empleado en OFDMA se pueden asignar las portadoras eficientemente a los usuarios dependiendo de las condiciones del canal y los requisitos de los servicios de cada uno de ellos, concediendo más o menos portadoras a cada usuario según el caso y ofreciendo diversidad de frecuencia al asignar portadoras no contiguas a un mismo usuario. Por otro lado, la implementación de esta técnica se hace sencilla en el dominio digital gracias a la implementación de los procesos de FFT (*Fast Fourier Transform*) e IFFT (*Inverse FFT*). [14]

En el enlace ascendente, se requiere una modulación/acceso múltiple que simplifique al máximo el transmisor, manteniendo la ortogonalidad entre transmisores de diferentes usuarios, la posibilidad de ecualización en el dominio de la frecuencia y la compatibilidad con técnicas MIMO. La modulación SC-FDMA cumple con estos objetivos y, además, permite utilizar bloques de procesamiento comunes con el enlace descendente, así como la misma estructura de subdivisión de recursos en tiempo y frecuencia [13]. En la figura 2.4 se muestran las tecnologías de acceso múltiple en LTE.

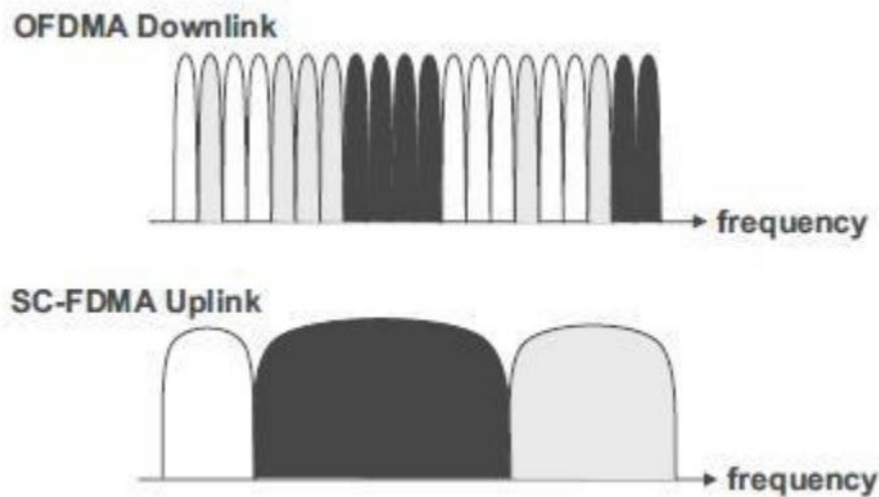


Fig. 2.4. Dominio de la frecuencia de las tecnologías de acceso múltiple de LTE. (Fuente: [16])

2.4 Arquitectura global del sistema.

Para poder conocer la red en su conjunto es importante conocer la arquitectura del sistema. Se llama arquitectura del sistema al conjunto de nodos e interfaces que hacen posible la comunicación entre una estación base y un terminal móvil. Su arquitectura se divide en 2 partes: la red de acceso de radio o *Radio Access Network* (RAN) y el núcleo de la red o *Core Network* (CN). A la red de acceso de radio de LTE se le conoce como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), y al núcleo de la red como *Evolved Packet Core* (EPC).

La filosofía de diseño de la arquitectura del sistema es minimizar el número de nodos y encontrar una solución donde la RAN esté formada por un solo nodo. Por su parte, la filosofía del CN es que sea lo más independiente posible de la RAN.

La reducción el número de nodos en la E-UTRAN ha conducido hacia la implantación de un único nodo más complicado que el NodeB de UMTS, llamado *evolved NodeB* (eNodeB), el cual tiene como principal función la gestión de recursos de radio y la conexión de los terminales móviles de una célula a otra.

LTE es un nuevo sistema en sí mismo y tanto su red de acceso como su núcleo de red son novedosos, a continuación podemos analizar algunas de las principales diferencias que podemos encontrar frente a UMTS/HSPA:

- La simplicidad en la operación y mantención de la red.
- LTE es concebida como una red todo-IP en la que desaparece el dominio conmutación de circuitos o *Circuit Switched* (CS). De este modo, servicios como la voz, basados tradicionalmente en CS, deberán ofrecerse haciendo uso del dominio conmutación de paquetes o *Packet Switched* (PS). Una solución natural sería utilizar el subsistema IP multimedia o *IP Multimedia Subsystem* (IMS), que además del servicio de voz permite otras comunicaciones multimedia. Tras una señalización inicial en LTE, el equipo de usuario o *User Equipment* (UE) sería traspasado al dominio CS de estas redes. Como en el nuevo sistema no existen equipos controladores de la red de acceso similares a la *Radio Network Controller* (RNC) de UMTS, existe una solución que requiere la introducción de un nuevo elemento en LTE, es decir, un controlador de red de acceso encargado de encaminar el tráfico hacia el dominio correspondiente.
- Reducción de latencia debido a un único nodo en la interfaz aérea.

- En UMTS, debido a la naturaleza CDMA del sistema y la ortogonalidad no perfecta de los códigos en recepción, el control de potencia es uno de los procedimientos de gestión de recursos de radio *Radio Resource Management* (RRM) más importantes. También es uno de los procesos con mayor carga computacional, con un envío de 1500 comandos/s. En LTE, la ortogonalidad intrínseca de los usuarios intra-célula relaja este requisito y la transmisión se adapta al canal mediante variaciones de tasa y no de potencia. Eventualmente sí se pueden utilizar variaciones de potencia, pero para conseguir una reducción de la interferencia inter-célula. Por otro lado, reaparecen las correcciones por *timing advance*, que en UMTS se habían abandonado por innecesarias.
- Mejor calidad de servicios debido a la simplicidad del núcleo.

La arquitectura de red LTE está formada por los siguientes bloques:

- UE: *User Equipment* (Equipo de usuario).
- eNB: *Evolved Node-B* (Nodo-B evolucionado).
- MME: *Mobility Management Entity* (Entidad de gestión de movilidad).
- GW: *Gateway* (Puerto de enlace).

A su vez el subsistema *Gateway* (GW) está formado por 2 bloques: el *Serving-Gateway* (SGW) y el *Packet Data Network Gateway* (PGW), como se muestra en la figura 2.5.

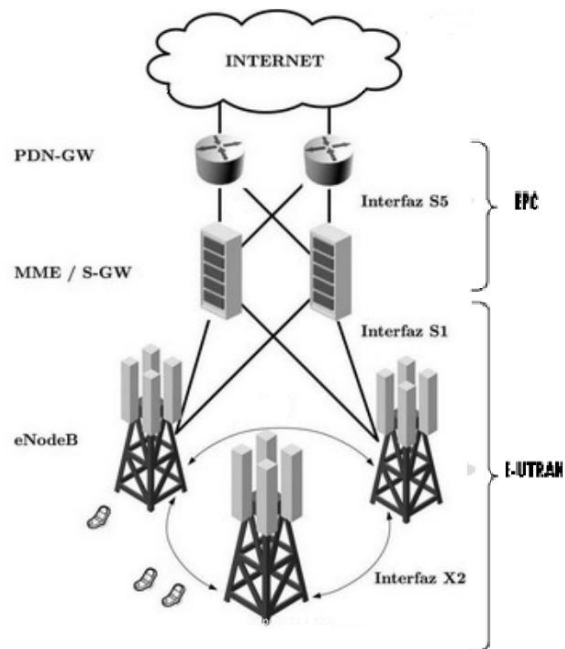


Figura 2.5. Arquitectura del sistema LTE. (Fuente: [13])

El conjunto de estaciones base eNB corresponde a la red de acceso de radio E-UTRAN (*Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network*). Mientras que el conjunto de MME y GW interconectados corresponde al núcleo de red EPC (*Evolved Packet Core*). La interfaz X2 permite la interconexión uno a uno entre eNB. Mientras que la interfaz S1 logra la conexión de varios eNBs a MME o SGW. La conexión entre estaciones bases eNBs ya no se realiza a través de un controlador de radio (RNC) como en UMTS. Todas las funciones del RNC se incorporan al eNB. De esta forma el control de los recursos de radio y la comunicación entre eNB cercanas es mucho más directa.

Las redes LTE separan en dos planos la transferencia de datos de usuario y de control en la interfaz de radio. En el plano de usuario circulan los datos del usuario, permitiendo la distribución y procesamiento de los servicios y aplicaciones en el terminal móvil. Mientras que en el plano de control se distribuye y procesa la información de control propia del sistema, permitiendo la supervisión de la red. Esta separación entrega un mayor control de los datos y una mejor calidad de tráfico cuando la red está congestionada. Cada uno de estos planos posee una pila de protocolos que permite realizar las diversas funciones de cada bloque de la arquitectura de red.

En la figura 2.6 se muestra la separación funcional entre el E-UTRAN y el EPC. Los cuadros amarillos representan los bloques de la red, los blancos las funciones de cada bloque en el plano de control y en azul se muestra la capa de protocolos de radio. [11]

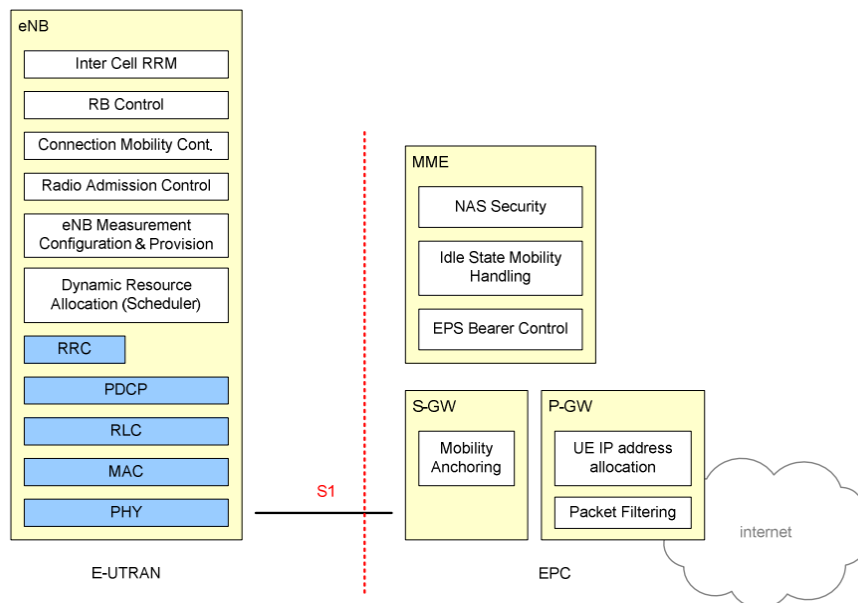


Fig. 2.6. Separación funcional entre el eNB, MME, SGW y PGW.

2.4.1 Arquitectura de la E-UTRAN

La E-UTRAN LTE consiste simplemente en una red de *evolved NodeB (eNodeB)*. No existe ningún nodo central, por lo que se dice que tiene una estructura plana. Esto contrasta con el resto de redes de acceso estandarizadas por el *Third Generation Partnership Project (3GPP)*, aunque se continúa con la tendencia de simplificación de la red.

El eNB realiza las mismas funciones que los Nodos-B de UMTS. Al incorporar las funciones del RNC, permite la total autonomía de los eNB lo que se traduce en una mayor eficiencia para la movilidad (*handover*).

Entre sus funciones se encuentran:

- Manejo de recursos de radio: control de portadoras de radio, control de admisión, control de movilidad de conexión, asignación dinámica de recursos para el enlace ascendente y descendente, control de potencia, control de congestión de células.
- Compresión de la información IP de cabecera, el cifrado, reensamble y envío confiable de los paquetes al UE.
- Selección del MME cuando el enrutamiento no se puede realizar con la información entregada por el UE.
- Enrutamiento de datos del plano de usuario hacia el SGW.
- Programación y transmisión de mensajes *paging* (originados por el MME).
- Programación y transmisión de información *broadcast* (originados por el MME).
- Medición y emisión de reportes de configuración de la movilidad y programación.

El *paging* corresponde a un proceso de solicitud de una conexión NAS (*Non-Access Stratum*). La transmisión *broadcast* es una transmisión desde la red a todos los terminales que están conectados sin saber quien la recibe.

Un esquema de la red puede verse en la figura 2.7, donde los eNodeB pueden comunicarse entre ellos por medio de la interfaz X2 y hacia el EPC con la interfaz S1, de manera más explícita hacia la entidad de control de la movilidad o *Movility Management Entity (MME)* mediante la interfaz S1-MME y hacia el *Serving Gateway (S-GW)* mediante la interfaz S1-U. Los protocolos que se utilizan entre equipos de usuario o *User Equipments (UE)* y los eNodeB se conocen como protocolos del estrato de acceso o *Access Stratum (AS)*.

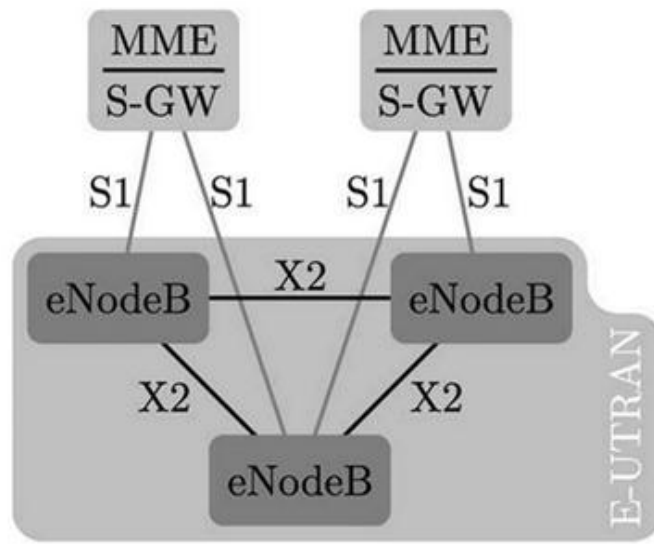


Figura 2.7. Arquitectura del sistema LTE. (Fuente: [13])

Al carecer una entidad central, a la hora de gestionar la movilidad de los UE, es necesario transferir de un eNodeB a otro toda la información relacionada con los UE, es decir, el contexto del UE, junto con todos los datos almacenados en buffers. Es indispensable definir mecanismos capaces de realizar esta transmisión de información evitando pérdidas. Esta es una de las principales funciones de la interfaz X2.

Una característica importante de la interfaz S1 es lo que se conoce como S1-flex. Por este se entiende el hecho de que múltiples nodos MME/S-GW del EPC puedan servir a la misma área geográfica. De esta forma, un eNodeB puede estar siendo servido por varios MME/S-GW, como es el caso del eNodeB central. El conjunto de nodos MME/S-GW que sirven a una misma área se le conoce como MME/S-GW pool, y al área cubierta por ellos como un pool área. Una ventaja de esta característica de la interfaz S1, es que un mismo UE servido por un eNodeB puede compartirse entre varios nodos del EPC para dividir la carga entre ellos y eliminar puntos críticos de fallos. Normalmente, el contenido del UE se mantiene en el mismo MME mientras el UE se mantenga dentro del área de acceso. [11]

2.4.2 Núcleo de la red

El núcleo de red, o *Core Network*, incorpora funciones de transporte e inteligencia. Las funciones de transporte soportan la transmisión de la información de tráfico y señalización, incluida la función de conmutación de llamadas. Las funciones de inteligencia incluyen aspectos tales como el

encaminamiento, la gestión de movilidad, el control de los servicios ofrecidos y la calidad de los mismos.

A través del núcleo de la red, el sistema LTE se conecta con otras redes de telecomunicaciones, de forma que sea posible establecer la comunicación no solo entre usuarios móviles 3GPP, sino también con otros terminales que se encuentren conectados a otras redes.

El núcleo de la red LTE también se conoce como *Evolved Packet Core* (EPC) y representa la culminación en la evolución de las redes 3GPP hacia la desaparición del modo de conmutación de circuitos en beneficio de un único dominio de paquetes, basado exclusivamente en el protocolo TCP/IP, dando lugar a lo que se conoce como solución "todo IP", *all IP*.

A continuación se describen las principales entidades funcionales que constituyen el núcleo de red.

Equipment Identity Register (EIR).

El EIR almacena los números de identificación de los equipos terminales de los usuarios de la red en distintas listas que indican las condiciones de operación de dichos terminales. En concreto, existen tres listas: la blanca, la gris y la negra. La lista blanca contiene los identificadores de los terminales que pueden operar en la red con total normalidad, la gris identifica a aquellos que tienen alguna restricción asociada, mientras que la negra almacena los identificadores de los terminales que tienen prohibido el acceso a la red.

Entidad de gestión de movilidad (MME: *Mobility Management Entity*).

MME es una entidad de señalización (opera en el plano de control) la cual se encarga de todas las tareas de control del núcleo de la red. Las principales funciones del MME son dar soporte a la señalización estrato de no acceso o *Non Access Stratum* (NAS), entendiéndose esta como la señalización propia entre el núcleo de red y el terminal móvil que se lleva a cabo en procesos como la conexión a la red o el establecimiento de un contexto *Packet Data Protocol* (PDD) para la transmisión de datos. Gestiona también la movilidad durante una sesión activa, de manera que se transfiera el contexto del usuario a la red destino, ya sea en caso de traspaso a redes de Segunda Generación Móvil (2G) o Tercera Generación Móvil (3G) o al nodo MME destino. Realiza la autenticación de los usuarios a través de una comunicación directa con el HSS. Esta entidad posee un sistema de control de Portadoras-EPS que permite gestionar el tráfico estableciendo un enlace, entregando mayor prioridad a los servicios que requieren de cierto ordenamiento en el envío de paquetes (como la voz, video conferencia).

Una de las ventajas de tener una entidad de señalización independiente es que la capacidad de la red y el tráfico pueden crecer de forma autónoma.

Sus funciones se resumen a continuación:

- NAS de señalización.
- Accesibilidad al modo “Idle” del UE.
- Manejo de Portadora-EPS.
- Seguimiento de la ubicación del UE.
- Selección del PGW y SGW.
- Selección de un nuevo MME para cambio de zona.
- Selección de SGSN. Permite movilidad con redes 2G y 3G.
- *Roaming*.
- Autenticación (con el HSS).
- Recolección de cobro.

Puerto de Enlace de Servicio (SGW: *Serving Gateway*).

Este bloque es similar al SGSN de UMTS, es decir, es el encargado de enrutar todos los paquetes de datos. El SGW es un equipo del plano de usuario (datos de usuario) que es controlado por el MME. Actúa como un anclaje de movilidad local reenviando y recibiendo los paquetes al eNB y entregando cobertura al UE. Permite la movilidad con las redes GSM, UMTS. En el modo “Idle” del UE, el SGW permite liberar la ruta de datos del enlace descendente, permitiendo el re-uso de ancho de banda disponible. Además el SGW gestiona y almacena información del UE como la del servicio transmitido y la del enrutamiento.

Sus funciones se resumen a continuación:

- Punto de anclaje para *handover* entre eNBs.
- Anclaje de movilidad para redes 3GPP.
- Enrutamiento y envío de paquetes de datos al eNB.
- Liberación de ruta de datos del *downlink* en modo “Idle” del UE.
- Transporte y contabilidad de información de UE conectado.

Puerto de Enlace hacia Red de Paquetes de Datos (PGW: *PDN Gateway*).

El PGW incorpora las funciones del GGSN de UMTS. Es la interfaz que se conecta con las redes externas de paquetes de datos (*Packet Data Network* - PDN), como Internet e IMS. Tiene un

importante rol en el control de la movilidad del UE ya que asigna la dirección IP, realiza aplicación de políticas de seguridad, filtrado de paquetes y enrutamiento.

Sus funciones se resumen a continuación:

- Filtrado de paquetes por usuario (inspección de paquetes).
- Asignación de dirección IP al UE.
- Enrutamiento de paquetes.
- Servicio de Carga, bloqueo y cumplimiento de tráfico en ambos enlaces.

PCRF.

La entidad PCRF es responsable de dos funciones e incluye por tanto dos entidades funcionales: la entidad *Policy Decision Function* (PDF) y la función de reglas de tarificación o *Charging Rules Function* (CRF). La entidad PDF es la encargada de decidir qué política de asignación de recursos y calidad de servicios seguir. En el proceso de negociación llevado a cabo mediante IMS, la entidad PDF recibe una solicitud de requisitos de establecimiento de la conexión a la que deberá dar respuesta en función de las políticas implementadas por el operador. Esta decisión consistirá en:

- Permitir o rechazar una solicitud de servicio.
- Definir un contexto PDP nuevo o uno ya establecido para el servicio en cuestión.
- Comprobar que los recursos solicitados no exceden los máximos autorizados al usuario.

Servidor de suscriptores abonados (HSS: *Home Subscriber Server*).

El HSS es equivalente al HLR UMTS. Al igual que en el IMS almacena y administra todo lo relativo a los datos de suscripción de los usuarios. Se conecta directamente con el MME que realiza la autenticación. [11]

2.5 LTE-ADVANCED.

LTE se concibió como el punto de inicio para una transición suave hacia el acceso de radio 4G (IMT-*Advanced*), sentando las bases su estructura de red, en otras palabras, LTE-Avanzado es la evolución de LTE. En este sentido, LTE- Avanzado debe asegurar toda una serie de requisitos en relación a la compatibilidad hacia atrás con LTE (*Release 8 y 9*). En cuanto a compatibilidad espectral, LTE-Avanzado deberá poderse desplegar en bandas ocupadas por LTE. Así mismo, el equipamiento LTE deberá poder incorporar las funcionalidades LTE-Avanzado con una complejidad y costos razonablemente bajos. [11]

Los requerimientos de LTE-Avanzado establecen diferentes categorías generales:

- Capacidades (Velocidad de transmisión pico, latencias).
- Prestaciones del sistema (Eficiencia espectral, flujo de transmisión, rendimiento en el extremo de la célula, movilidad, cobertura).
- Despliegue (espectro, coexistencia e interoperación).
- Arquitectura E-UTRAN.
- Migración.
- Complejidad.
- Costo.

Para satisfacer los requerimientos establecidos, debe soportar velocidades pico de hasta 1Gbps en la bajada (*downlink*) y de 500 Mbps en la subida (*uplink*). Para lograr esos requisitos son necesarias una serie de mejoras técnicas con respecto a LTE. Algunas de las principales componentes técnicas de LTE-Avanzado son: [11]

- Ancho de banda de hasta 100 MHz, por ejemplo a partir de agregar cinco componentes de 20 MHz puede alcanzar un ancho de banda de 100 MHz y así proporcionar las velocidades de transmisión pico más elevadas previstas en los requerimientos.
- Soluciones multiantenas MIMO, con hasta 8 niveles en la bajada (*downlink*) y 4 niveles en la subida (*uplink*), para incrementar las velocidades de transmisión alcanzables sobre el enlace.
- Uso de CoMP (*Coordinated multipoint transmission and reception*), que permite mejorar las prestaciones observables en el extremo de la célula a través de efectuar la transmisión/recepción desde distintas células. CoMP es un término relativamente general, que incluye diferentes tipos de coordinación (*packet scheduling* [Planificación en el envío de paquetes], modelación del haz de radiación "beam-forming") entre transceptores separados geográficamente.
- Repetidores, como mecanismo para mejorar la cobertura y reducir el costo de despliegue.

LTE Avanzado introduce grandes cambios en relación con los sistemas de comunicaciones móviles anteriores, sin embargo existen un aspecto relevante a destacar, este es que las velocidades pico de la interfaz de radio se sitúan en el rango de 100 Mbps a 1 Gbps, muy superiores a las conseguidas en los sistemas predecesores. Se espera que con estas velocidades de transmisión de LTE Avanzado puedan romper finalmente y definitivamente las barreras que impedían la consecución plena de una movilidad con capacidad multimedia. Lo que sería equivalente a afirmar que con la aparición de LTE Avanzado, los usuarios que lo deseen ya no

tendrán que verse penalizados en su capacidad de comunicación por el hecho de ser móviles en lugar de fijos.

Por todas las ventajas de LTE Avanzado, los operadores líderes, los fabricantes de dispositivos e infraestructura, así como los proveedores de soporte escogieron a LTE Avanzado como la tecnología móvil del futuro. Se incluyen los principales operadores GSM-HSPA y CDMA EV-DO, así como los operadores con licencias nuevas y los de WiMAX, estas son decisiones estratégicas a largo plazo para las redes LTE Avanzadas. Con LTE-Avanzado ha surgido la oportunidad de crear una única tecnología estándar global de 4G, lo que no se pudo lograr ni en 2G, ni en 3G.

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) considera que LTE-Avanzado es la primera tecnología 4G y la denominó como "IMT-Advanced". [11]

La tecnología LTE-Avanzada ofrece muchos beneficios importantes tanto para los usuarios como para los proveedores, uno de ellos es que cuenta con una arquitectura de red de paquetes IP optimizada (Con dominio de paquetes conmutados), además de soportar anchos de banda escalables en los canales de radio entre 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz y puede llegar hasta 100 MHz empleando cinco módulos de 20 MHz de Ancho de Banda. Esta tecnología emplea OFDM, con dos variantes OFDMA en la bajada y SC-FDMA en la subida. Emplea la tecnología MIMO con hasta 4 antenas en la subida (Sistema 4x4) y Hasta 8 antenas en la bajada (Sistema 8x8). Posee arreglo de antenas inteligentes en las estaciones bases que permiten el acceso múltiple por división de espacio (SDMA) y la conformación del haz de radiación (*Beam forming*). Permite interoperabilidad con 2G /3G y con sistemas no especificados por 3GPP (Wi-Fi, Wimax y otras). Su eficiencia espectral mejora de 2 a 4 veces respecto a la revisión 6 de HSPA. Reduce la latencia a valores por debajo de 10 ms en la RAN (Red de Acceso de Radio). Soporta tanto FDD (Espectro de frecuencia pareado para la transmisión dúplex) como TDD (Espectro de frecuencia único para la transmisión dúplex).

Con LTE-Avanzado se puede lograr velocidades de transmisión picos nunca antes alcanzadas por un sistema móvil de radio, por ejemplo se pueden lograr velocidades pico de 1.2 Gbps en la bajada y 568 Mbps en la subida con una configuración de un arreglo de antenas MIMO 8x8 en la bajada y 4x4 en la subida con un ancho de banda de 20/20 MHz y con modulación 64 QAM en la bajada y en la subida.

Capítulo 3: HERRAMIENTA DE SIMULACION ATOLL

Las simulaciones de sistemas utilizando equipos informáticos son en la actualidad de gran aplicación en el ámbito de la ingeniería. En ellas se puede observar la evolución del sistema, sus características y propiedades, existiendo únicamente en la memoria de una computadora. El objetivo que busca todo simulador es recrear un modelo lo más fiable posible a la realidad, al menos en cuanto a las características a estudiar, para poder extrapolar los resultados obtenidos mediante la simulación. En el campo de las redes de telecomunicaciones se ha experimentado un crecimiento exponencial a nivel mundial, esto ha dado lugar a la necesidad de su sofisticación. Por ello se prioriza disponer de un simulador de red que ofrezca herramientas potentes con el objetivo de diseñar modelos, simular datos y analizar la redes.

El siguiente capítulo hace un estudio de la herramienta de simulación Atoll, donde se analizan las características del mismo y se explican los pasos para el diseño de la red LTE que se analizan en el próximo capítulo.

3.1 Descripción de la herramienta

Atoll es un *software* profesional multiplataforma, de la empresa francesa Forsk, para el diseño y optimización de redes inalámbricas desde su diseño hasta su densificación y optimización. A partir del año 2008 Atoll cuenta con el módulo LTE, el primero en el mercado, que permite implementar con gran precisión las características de una red *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (EUTRAN), es decir, una red LTE. Con la versión 3.1.2, este software, ofrece la posibilidad de crear redes avanzadas de múltiples tecnologías (GSM/UMTS/LTE, CDMA2000/LTE) algo muy útil para aquellos operadores que necesitan migrar sus redes hacia LTE.

3.1.1 Ambiente de trabajo

Atoll utiliza elementos familiares de la interfaz de Windows, con la capacidad de tener varias ventanas de documentos abiertos al mismo tiempo, soporte para arrastrar y soltar, menús contextuales, y el apoyo a los accesos directos estándar de Windows, por ejemplo, para cortar y pegar. Este ambiente es a la vez potente y flexible. Proporciona un conjunto completo e integrado de herramientas (búsqueda para localizar ya sea un sitio, un punto en el mapa, o un vector) y funciones que permiten crear y definir un proyecto de planificación de radio en una sola aplicación. También ofrece una amplia gama de opciones para la creación y exportación de resultados en función del proyecto existente.

La ventana de exploración contiene la mayor parte de los objetos en un documento organizado en carpetas. Utilizando esta se puede administrar todos los objetos del documento Atoll como sitios,

transmisores, cálculos, así como datos geográficos, tales como el modelo digital del terreno (DTM), mapas de tráfico, y las distintas clases de uso del terreno (*clutter*). Puede, por ejemplo, definir diversas predicciones de cobertura o configurar los parámetros de visualización de los objetos de datos. Los mapas, bases de datos y los resultados de los cálculos se agrupan en archivos llamados “proyectos”.

El contenido de las carpetas en la ventana de exploración se puede mostrar en tablas, lo que permite manejar grandes cantidades de datos, ordenarlos y filtrarlos, o cambiar la vista de estos. La función de tabla es utilizada también para introducir grandes cantidades de información mediante la importación de datos o cortando y pegando los datos desde cualquier hoja de cálculo de Windows en la tabla. [17]

3.1.2 Principales características

Las principales características de Atoll son las siguientes:

- Propiedades avanzadas en el diseño de redes: es una herramienta de cálculo de propagaciones de altas prestaciones, soporta redes multicapas y jerárquicas, modelado de tráfico, planificación automática de frecuencias y códigos y optimización de red. Soporta tecnologías GSM/TDMA, GPRS-EDGE, CDMA IS95, W-CDMA / UMTS, CDMA 2000, LTE. Permite planificación de redes de tecnologías híbridas (GSM/UMTS, GSM/GPRS, CDMA/CDMA 2000).
- Arquitectura abierta y flexible: soporta entornos multiusuarios gracias a una arquitectura de bases de datos innovadora, que permite compartir datos, gestionar la integridad de dichos datos y una sencilla integración con otros sistemas de telecomunicaciones. Permite la integración de módulos propietarios (modelos de propagación y planificación automática de frecuencias AFP) gracias a un conjunto de interfaces de programación (API).
- Cálculos distribuidos y paralelos: permite el reparto de la computación entre distintas estaciones de trabajo y soporta cálculos en paralelo en servidores multiprocesador, reduciendo significativamente los tiempos de simulación y de predicción, sacando el máximo partido del hardware disponible.
- GIS (*Geographic Information System*) de última generación: soporta datos geográficos multiformato y multiresolución y la integración con herramientas GIS. Permite cargar complejas bases de datos con información geográfica y mostrarlas de manera interactiva con múltiples capas, incluyendo las de los estudios de ingeniería y predicción. Incluye editor de raster y vectorial. [18]

3.1.3 Definiciones de Atoll

A continuación se brinda una descripción de algunos términos y definiciones referentes al programa Atoll. [5]

- Plantilla (*Station Template*): en ella se establecen una serie de parámetros de las eNB, de forma que al agregar nuevas estaciones todas sean configuradas según la plantilla seleccionada.
- Emplazamiento (*Site*): es el punto geográfico donde uno o más transmisores están ubicados.
- Célula (*Cell*): hace referencia a las características del canal RF asociado a un transmisor.
- Estación base (*Base Station*): hace referencia al emplazamiento y sus transmisores en conjunto con sus antenas, equipos asociados y células.
- TMA: *Tower-Mounted Amplifier* o amplificador de bajo ruido.
- Zona de Cómputo (*Computation Zone*): es usada para definir el área donde Atoll realiza los cálculos. A la hora de efectuar los cálculos toma en consideración las estaciones bases tanto externas como internas a la zona de cómputo, siempre y cuando estas afecten los resultados dentro de la zona.
- Usuario (*User*): término general aplicable para un suscriptor, terminal y receptor.
- Suscriptor: usuarios con coordenadas geográficas fijas.
- Móvil (*Mobile*): usuarios generados y distribuidos durante simulaciones. Estos usuarios poseen, entre otros parámetros, servicios definidos, tipos de terminal, y tipos de movilidad asignados durante la simulación.
- Radio *Bearer* (RB): un esquema de modulación/codificación (MCS) usado para cargar los datos a través del canal.
- Umbrales de selección de RB (*Bearer Selection Thresholds*): un radio *bearer* particular es seleccionado para la transferencia de datos en un determinado píxel si la relación $C/(I+N)$ para dicho píxel es superior al valor del umbral de selección que hace referencia.
- Tipo de terreno (*Clutter Classes*): describe el tipo de terreno según su uso.
- Cargas de tráfico (*Traffic Loads*): son porcentajes de las tramas *uplink* y *downlink* asignadas para el tráfico ascendente y descendente respectivamente. Puede ser definido por el usuario o como un resultado de las simulaciones de Monte Carlo.
- Carga de tráfico máxima (*Max traffic load*): es el tráfico en el enlace descendente o ascendente que no puede ser excedido. Este límite es tomado en cuenta durante las

simulaciones de Monte Carlo. Si el tráfico de la célula está limitado por este valor, entonces la célula no podrá tener una carga de tráfico superior a este máximo.

- Lista de suscriptores (*Subscriber List*): gracias a un módulo de LTE es posible modelar una distribución fija de usuarios en una red utilizando la lista de suscriptores.
- Algoritmo de Monte Carlo: algoritmo empleado para generar la distribución de usuarios para cada simulación.
- Tipo de movilidad (*Mobility Type*): en LTE la información acerca de la movilidad del receptor es requerida para determinar la selección de los umbrales de *bearer* y las gráficas de calidad (*quality graphs*) a utilizar proveniente del equipo de recepción definido para el terminal o célula. Móviles usados a altas velocidades y a bajas velocidades no tienen las mismas características de calidad. Los requisitos de $C/(I+N)$ para los diferentes radio *bearers* dependen en gran medida de la velocidad de los móviles.
- Perfil de usuario (*User Profile*): modela el comportamiento de diferentes categorías de usuarios. Cada perfil es definido por una lista de servicios que a su vez está definida por el terminal utilizado, las llamadas por hora, y la duración (para llamadas tipo voz) o el volumen ascendente y descendente (para llamadas tipo datos).
- Interferencia Co-canal (*Co-channel interference*): las células que utilizan las mismas frecuencias se denominan células co-canales, y la interferencia que causan los usuarios de una célula sobre las otras células co-canales se denomina interferencias co-canal.
- Interferencia de Canal Adyacente (*Adjacent-channel interference*): es otro tipo de interferencia que resulta como consecuencia de filtros imperfectos de los receptores, ya que permiten a las frecuencias vecinas interferir con la frecuencia usada por el canal en cuestión.
- *Uplink Noise Rise*: es una medida de la interferencia presente en el *uplink* con respecto al ruido del mismo enlace ($I+N/N$). La razón por la cual en Atoll se representa a la interferencia en términos de incremento en vez de factor de carga (load factor en %) es que el factor de carga varía casi exponencialmente con el incremento de la interferencia.
- *Max UL Noise Rise*: es el límite superior en ambos valores de *noise rise*, es decir, el *UL noise rise* y el *ICIC UL noise rise*. Es usado para el control durante las simulaciones de Monte Carlo. Este parámetro representa la máxima interferencia tolerable que una célula puede soportar en el enlace ascendente.
- *Schedulers*: son los encargados de efectuar la selección de usuarios para la asignación de recursos y su administración según las clases de QoS de los servicios que estén siendo usados por los usuarios elegidos.

- *Peak RLC Throughput*: es el máximo *throughput* bruto de la capa RLC (usuario o canal) que puede ser logrado en una determinada localidad usando el *bearer* más alto disponible. Este *throughput* no toma en cuenta los efectos de retransmisión debido a errores, ni la codificación y encriptación de las capas superiores.
- *Application Throughput*: es el *throughput* de la capa aplicación (usuario o canal) que puede lograrse en una determinada localidad usando el *bearer* más alto disponible calculado, teniendo en cuenta la reducción de velocidad dada por información de cabecera PDU/SDU, relleno, cifrado, codificación y otros tipos de overhead.
- *Aggregate Throughput*: es la suma del *Peak*, *Effective* o *Application Throughput* de todos los usuarios, puede definirse según la dirección del enlace, *site*, célula o tipo de servicio.
- *Point Analysis*: es una herramienta de Atoll que permite realizar: estudios de recepción o interferencia a lo largo del perfil del terreno entre un transmisor y un usuario, y evaluar los niveles de señales recibidas por distintos transmisores en un determinado punto.
- *Physical cell ID*: es un entero del 0 al 503. Los *physical cell IDs* están definidos en las especificaciones del 3GPP. Existen 504 identificadores únicos de la capa física. Los *physical cell IDs* están agrupados en 168 grupos de *cell ID* únicos (llamados SSS IDs en Atoll), cada grupo contiene 3 identidades únicas (denominadas PSS IDs en Atoll). Un SSS ID es entonces único y está definido por un número entre 0 y 167, y un PSS ID es definido por un número del 0 al 2. Cada señal de referencia de la célula transmite una secuencia pseudo-aleatoria correspondiente con el *physical cell ID* que tenga.
- Margen RSRP: establece un margen de histéresis entre la zona de cobertura de la célula servidora y las células vecinas. Utilizado en el cálculo de células vecinas.
- AFP (*Automatic Frequency Planner*): permite a los ingenieros radio a la hora de diseñar redes LTE configurar automáticamente parámetros como canales de frecuencias y *physical cell IDs*.
- *Clutter Class*: se trata de un mapa que muestra los diferentes tipos de zona que se componen la zona total, como por ejemplo, si es zona rural, bosque, zona urbana, etc.
- *Clutter Height*: se trata de un mapa que se superpone al mapa de altimetría y que define la altura de los edificios de una zona del *Clutter Class*.
- Mapa de carreteras: se trata de un fichero de datos vectoriales en el que se definen las carreteras, vías, aeropuertos, etc.

3.1.4 Plantillas disponibles en el programa

Atoll posee una serie de plantillas con cada una de las tecnologías que dispone.

GSM/GPRS/EGPRS: esta plantilla se usa para modelar telecomunicaciones de móviles de segunda generación (2G) usando tecnología TDMA (*Time Division Multiple Access*). Puede ser usada para modelar las siguientes tecnologías:

- GSM (*Global System for Mobile Communication*): 2G basada en TDMA.
- GPRS (*General Packet Radio Service*): tecnología de conmutación de paquetes que activa aplicaciones de paquetes en redes GSM. Tecnología 2.5G.
- EDGE (*Enhanced Data for Global Evolution*): Triplica la tasa de datos de redes GSM/GPRS.
- EGRPS (*GPRS operating over EDGE*): Es GPRS pero operando sobre EDGE para tasas de datos mejoradas.

CDMA2000 1xRTT 1xEV-DO: Esta plantilla puede ser usada para modelar 3G basada en tecnología CDMA2000. CDMA2000 es una evolución de CDMA (*Code Division Multiple Access*, Acceso múltiple por división de código). Se puede usar en las siguientes tecnologías:

- 1xRTT (*1 Radio Transmission Technology*): ofrece capacidad de voz incrementada. Se considera 2.5G.
- 1xEV-DO (*1 x Evolution - Data Only*): Evolución de CDMA2000 que proporciona tasas de datos diez veces mayor que 1xRTT. Es considerada 3G.

UMTS/HSPA: UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), comúnmente referida como HSPA, son sistemas de telecomunicaciones de tercera generación basadas en tecnología WCDMA (*Widwband Code Division Multiple Access*). Además WCDMA y CDMA son compatibles. UMTS y HSPA son generalmente implementadas sobre redes GSM.

TD-SCDMA: TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*) es un sistema de comunicaciones 3G basado en el modo TDD. TD-SCDMA), donde las transmisiones del enlace ascendente y del descendente son transportadas en la misma banda de frecuencia en diferentes ranuras de tiempo.

WiMAX: soporta IEEE 802.16e.

Wi-Fi: Permite el modelado de redes de área local inalámbricas (WLAN) y el estudio del tráfico de descarga de las redes Wi-Fi.

LTE: Esta plantilla puede ser usada para modelar 4G basada en tecnología OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales) la cual permite dividir el espectro en múltiples portadoras de banda estrecha ortogonales entre sí en enlace descendente y para el enlace ascendente una variante de OFDMA llamada SC-FDMA (*Single Carrier- Frequency Division Multiple Access*, FDMA con Portadora Simple), esta presenta una significativa reducción de la relación entre la potencia instantánea transmitida y la potencia media.

3GPP Multi-RAT: Esta plantilla puede ser usada para modelar los proyectos multitecnología más comunes. Permite seleccionar cuales tecnología de radio se modelaran en el mismo proyecto: GSM, UMTS y LTE. [17]

3.1.5 Formato de los mapas

Para realizar sus simulaciones, Atoll se apoya en mapas estructurados en capas con diversos formatos. La siguiente lista muestra todos los formatos que pueden ser utilizados por el programa:

- ❖ *Configuration Files (*.cfg)*
- ❖ *Geo data sets (*.geo)*
- ❖ *Connection to a Web Map Services server... DXF Files (*.dxf)*
- ❖ *Atoll Geographic Data Files (*.agd)*
- ❖ *ArcView Files (*.shp)*
- ❖ *MapInfo Files (*.mif, *.tab)*
- ❖ *Multi-import Files (*.ami)*
- ❖ *Planet ® data files (*.index)*
- ❖ *Planet database® Planet ® MW antenna files (*.index)*
- ❖ *BMP Files (*.bmp)*
- ❖ *PGN Files (*.png)*
- ❖ *ArcView Grid Files (*.txt)*
- ❖ *TIFF Files (*.tif)*
- ❖ *BIL Files (*.bil)*
- ❖ *ERDAS Files (*.img)*
- ❖ *JPEG 2000 Files (*.jp2)*
- ❖ *ECW Files (*.ecw)*
- ❖ *Vertical Mapper Files (*.grd, *.grc)*

3.1.6 Modelos de propagación

Atoll contiene una serie de modelos de propagación, los cuales pone a disposición del usuario en dependencia de las condiciones, frecuencias y el sistema que se quiera diseñar, los mismos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Modelos de propagación que ofrece Atoll. (Fuente: [17]).

Modelo de propagación	Rango de frecuencia	Datos geográficos a tener en cuenta	Usos recomendados
ITU 370-7 Vienna 93 ITU 1546	100 – 400 MHz	Perfil del terreno	d > 10 Km Bajas frecuencias
	30 – 3000 MHz	Perfil del terreno	1 < d < 1000 Km Terrestre y marítimo, difusión
ITU 526-5 (teórico) WLL	30 – 10000 MHz	Perfil del terreno	Receptores fijos WLL
	30 – 10000 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> determinístico	Receptores fijos WLL, enlaces microrondas, WiMAX
Okumura – Hata (Calibración automática disponible)	150 – 1000 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico (en el receptor)	1 < d < 20 Km GSM 900, CDMA2000, LTE
Cost – Hata (Calibración automática disponible)	1500 – 2000 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico (en el receptor)	1 < d < 20 Km GSM 1800, UMTS, CDMA2000, LTE
ITU 529-3	300 – 1500 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico (en el receptor)	1 < d < 100 Km GSM 900, CDMA2000, LTE
Standard Propagation Model (Calibración automática disponible)	150 – 3500 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico	1 < d < 20 Km GSM, UMTS, CDMA2000, WiMAX, LTE
Erceg Greenstein (SUI)	1900 – 6000 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico (en el receptor)	Áreas urbanas y suburbanas 100 m < d < 8 Km WiMAX fijo
Sakagami Extended (Calibración automática disponible)	3000 – 8000 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico	1 < d < 20 Km WiMAX
CroosWave Model	200 – 5000 MHz	Perfil del terreno <i>Clutter</i> estadístico o determinístico de edificaciones en 3D y línea de vectores (opcional) Morfología específica, facetas y archivos de datos gráficos (opcional)	Cualquier estructura (micro, mini, pequeña o macro células) GSM, UMTS, CDMA2000, WiMAX, LTE

3.1.7 Predicciones de cobertura disponibles

En Atoll existen dos tipos de predicciones de cobertura, unas que permiten analizar los niveles de señal y otras que permiten analizar la calidad de la señal como se muestra en la tabla 3.2. Las primeras no dependen de las condiciones de carga de la red ni de las

interferencias, mientras que las segundas sí. En las predicciones, cada píxel del mapa es considerado como un usuario no interferente con un servicio, movilidad y terminal específico que se definen al momento de realizar la predicción.

Tabla 3.2. Predicciones de cobertura disponibles en ATOLL. (Fuente: [17]).

Clasificación	Nombre	Descripción
Por nivel de señal	<i>Coverage by Signal level</i>	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa.
	<i>Coverage by Transmitter</i>	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor
	<i>Overlapping Zones</i>	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.
	<i>Effective Signal Analysis</i>	Permite calcular los niveles de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH).
Por calidad de señal	<i>Coverage by C/(I+N) Level</i>	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido C/(I+N) para cada píxel del mapa.
	<i>Service Area Analysis</i>	Permite calcular y mostrar los mejores <i>Radio Bearers</i> disponibles para cada píxel del mapa basados en las C/(I+N) de los mismos.
	<i>Effective Service Area Analysis</i>	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible tanto en el DL como en el UL.
	<i>Coverage by Throughput</i>	Permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa los <i>Channel Throughputs</i> y <i>Cell Capacities</i> basados en los niveles de C/(I+N) y en los <i>Radios Bearers</i> disponibles. Además permite mostrar el <i>Aggregate Cell Throughput</i> para resultados de simulaciones.
	<i>Coverage by Quality Indicator</i>	Permite calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, VER, etc.) basados en los <i>Radios Bearers</i> y en los niveles de C/(I+N) de los mismos.

Las predicciones de calidad de señal se basan en los valores de (*DL Traffic Load*) y (*UL Noise Rise*) establecidos en la tabla de células (*Cells Table*) o calculados por simulaciones Monte Carlo para calcular la relación portadora a interferencia más ruido, C/(I+N), en cada píxel del mapa. Para realizar predicciones de cobertura avanzadas es necesaria la información de cargas de tráfico de las células que conforman la red, porque a medida que la carga de una célula se incrementa, se reduce el área de cobertura que ésta ofrece. Para ello pueden realizarse simulaciones Monte Carlo, basadas en los mapas de tráfico o en listas de subscriptores, o se

pueden definir los valores manualmente para cada célula. Las predicciones en este punto se calculan en base a la calidad de la señal recibida tomando en cuenta las interferencias y comprenden el estudio de nivel portadora a interferencia, área de servicio de las células, cobertura por *throughput* o indicadores de calidad. [4]

3.1.8 Simulaciones Monte Carlo

Una de las técnicas estadísticas más usadas en simulación es el método de Monte Carlo, empleado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas con exactitud. Es un método no determinístico o estadístico numérico. La simulación de Monte Carlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental. [19]

Las simulaciones de Atoll corresponden a una foto instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Las principales salidas de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las células.

Los resultados de dichas simulaciones pueden ser observados en el mapa así como en tablas que muestran las estadísticas de las simulaciones y los datos relacionados a los sitios, células y móviles.

3.2 Metodología para el diseño de una red LTE

En la tabla 3.3 y en la figura 3.1 se muestran la metodología de diseño y el diagrama de flujo de la red LTE.

Tabla 3.3. Metodología de diseño de una red LTE en la ciudad Santiago de Cuba.

①	El primer paso para cualquier proyecto de planificación radio es recopilar la información necesaria en cuanto a los equipos radio (p. ej. emplazamientos, transmisores, antenas, etc.), información de la tecnología radio (bandas de frecuencias y otros parámetros específicos de la tecnología a implementar) e información geográfica (p. ej. <i>clutter classes</i> , <i>clutter heights</i> , mapas de tráfico, etc.) que se utilizará en el despliegue.
②	En el segundo paso se debe abrir o crear un nuevo proyecto, para esto ATOLL tiene definido unas plantillas (<i>Templates</i>) con parámetros específicos a cada tecnología, en este caso el <i>Template LTE</i> es seleccionado para modelar la red según las especificaciones de la 3GPP.
③	El tercer paso consiste en la configuración de la red agregando los mapas del terreno, emplazamientos (<i>Sites</i>), transmisores (<i>Transmitters</i>), células (<i>Cells</i>) y todos aquellos parámetros de la red que fueron recopilados en el primer paso.

④	Para el cuarto paso se realizan las predicciones básicas de cobertura por nivel de señal recibida sin tomar en cuenta las interferencias. Estas predicciones comprenden estudios del nivel de señal recibido de distintas señales LTE en cada píxel del mapa, coberturas por transmisor, estudios de solapamiento y análisis de señal efectiva que permiten estudiar la configuración inicial de la red sin tomar en cuenta datos de tráfico.
⑤	Como quinto paso se propone calcular y establecer los vecinos de cada célula.
⑥	En un sexto paso se realiza la asignación de las frecuencias en base a las vecindades establecidas evitando en la mayor medida las interferencias.
⑦	Posteriormente en el séptimo paso se realiza una asignación de los <i>Physical Cell IDs</i> para facilitar el procedimiento de selección de células. ATOLL permite que los pasos 5,6 y 7 puedan llevarse a cabo de forma manual o automática.
⑧	En el octavo paso se definen los parámetros que permiten realizar predicciones de cobertura avanzadas, por lo cual es necesaria la información de cargas de tráfico de las células que conforman la red, porque a medida que la carga de una célula se incrementa, se reduce el área de cobertura que ésta ofrece. Para ello pueden realizarse simulaciones Monte Carlo (8a), basadas en los mapas de tráfico o en las listas de suscriptores, o se pueden definir los valores manualmente para cada célula (8b).
⑨	Las predicciones de cobertura en el noveno paso se calculan en base a la calidad de la señal recibida tomando en cuenta las interferencias y comprenden el estudio de nivel portadora a interferencia, predicción de servicios portadores y el análisis del área de servicio de las células,
⑩	En el paso diez se analizan los resultados de las simulaciones y las predicciones de cobertura por calidad de señal para realizar modificaciones, si es necesario, en los parámetros configurados al inicio. Si se realizan modificaciones deben realizarse nuevamente los pasos 8 y 9.

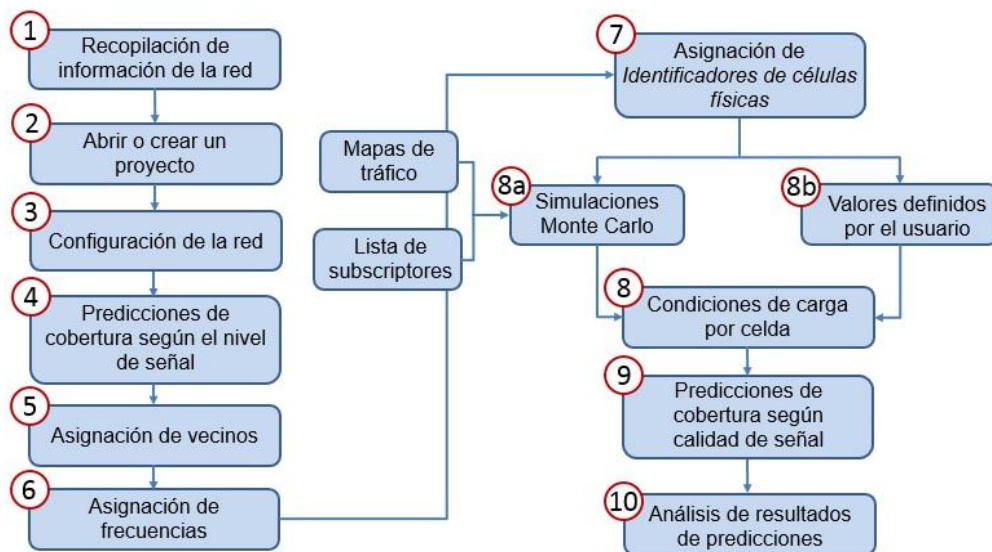


Figura 3.1: Diagrama de flujo del diseño de la red LTE en ATOLL.

Capítulo 4: SIMULACIÓN DE UNA RED LTE EN LA CIUDAD SANTIAGO DE CUBA EMPLEANDO EL SOTWARE ATOLL

En este capítulo se realiza la planificación de una red LTE en la ciudad Santiago de Cuba empleando la herramienta de simulación Atoll, basándose en la metodología de diseño expuesta en el capítulo anterior.

4.1 Planificación de una red LTE en la ciudad de Santiago de Cuba

Para comenzar el proyecto se recopiló toda la información necesaria en cuanto a los equipos de radio, la tecnología de radio y datos geográficos necesarios para el despliegue de la red, la cual fue proporcionada por el Departamento de Servicios Móviles de ETECSA.

Lo primero que se realizó fue seleccionar el tipo de tecnología a utilizar, como se muestra en la figura 4.1, para ello el programa cuenta con una serie de plantillas de múltiples tecnologías de comunicaciones móviles, en este caso se creó un nuevo proyecto de tipo LTE.

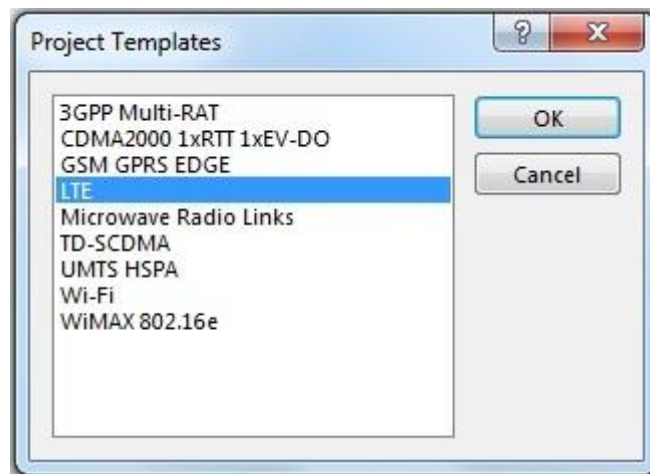


Fig. 4.1. Plantillas disponibles en Atoll.

Se importaron los mapas de la ciudad de Santiago de Cuba, seleccionando los archivos (*.index) de las distintas carpetas en las que se encuentran agrupados: *Heights* (proporciona información de altitudes), *Clutter* (proporciona información geográfica del tipo *clutter classes* y *clutter heights*) y *Vector* (muestra objetos lineales como carreteras, vías de tren, aeropuertos). Los mapas utilizados tienen una resolución de 20 m.

En la figura 4.2 se muestra el mapa de la ciudad Santiago de Cuba con sus características de relieve, tipos de zonas y objetos lineales.

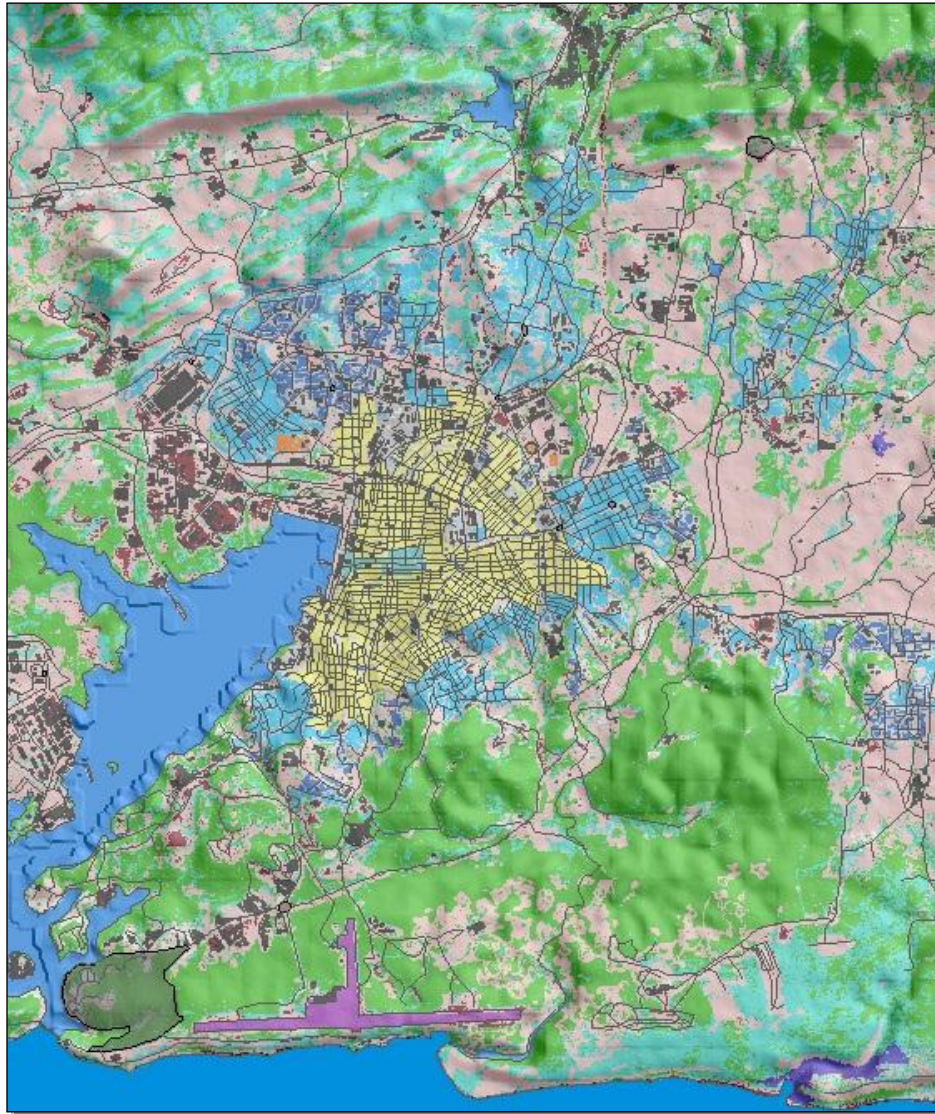


Fig. 4.2. Mapa del escenario de trabajo – Ciudad de Santiago de Cuba.

En este proyecto, la ubicación de las estaciones base (emplazamientos, transmisores y células) fue importada de documentos proporcionados por el Departamento de Servicios Móviles de ETECSA. Se colocaron un total de 12 estaciones bases eNB cuya posición fue la más cercana a la realidad posible, estas cuentan con 3 transmisores por cada emplazamiento, teniendo una célula por cada transmisor, las diferentes características de las estaciones base se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de las estaciones base.

Sitio	Ubicación Geográfica	Azimut			Altura de torre	Altura de antena en torre	Altura total
		Sector 1	Sector 2	Sector 3			
Versalles CT	19°59'44.19"N 75°50'14.23"W	50°	210°	350°	15	12	16.5
Santiago CT	20°01'18.64"N 75°49'37.82"W	90°	220°	340°	3	4	35
Vista Alegre CT	20° 1'43.20"N 75°48'23.74"W	50°	190°	300°	21	19	23
Quintero	20° 3'18.38"N 75°48'58.16"W	40°	180°	270°	30	27	30
Boniato	20° 5'58.25"N 75°49'46.13"W	2°	75°	210°	47	26	47
MICONS	20°01'26.00"N 75°49'15.81"W	0°	90°	180°	12	10	30
Aeropuerto	19°58'20.13"N 75°50'24.56"W	70°	290°	-	12	6	14
Santiago III.1	20° 1'38.61"N 75°47'49.74"W	17°	154°	249°	18	12	18
D.J.Martí	20° 2'16.74"N 75°50'12.94"W	120°	240°	360°	27	25	29
Abel S.María CT	20° 0'32.44"N 75°46'8.56"W	20°	180°	290°	21	19	23
Caney	20°03'27.78"N 75°46'20.40"W	80°	190°	280°	15	13	17
Barrio Técnico	19°58'49.10"N 75°52'13.45"W	10°	120°	220°	21	20	21

Posteriormente se estableció una zona de cómputo a la cual se limitan todas las predicciones y simulaciones, como se muestra en la figura 4.3.

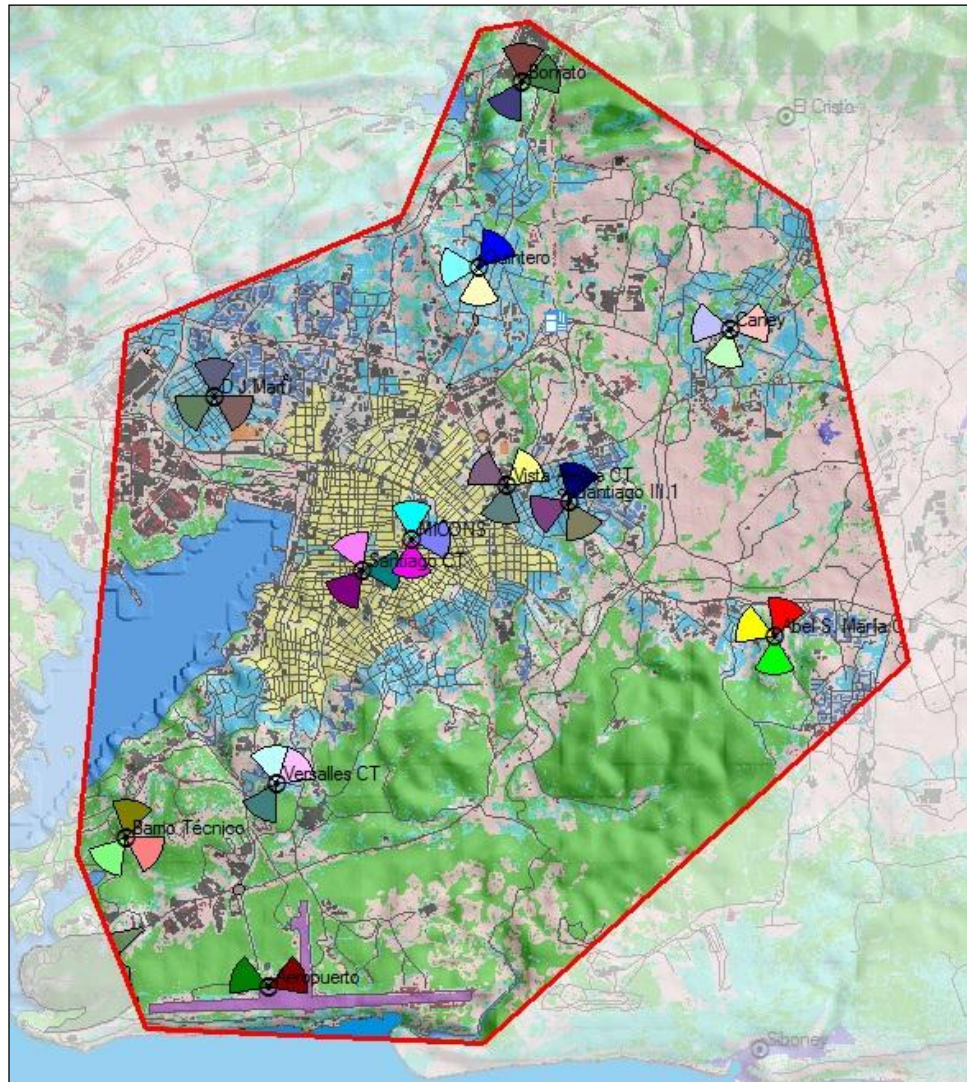


Fig. 4.3. Área de cómputo.

4.1.1 Elección del modelo de propagación

Luego de analizar los diferentes modelos de propagación que brinda Atoll se ha seleccionado el *Estandar Propagation model (SPM)*. El SPM es un modelo (deducido a partir de la fórmula de Hata) especialmente indicado para las predicciones en frecuencias que oscilan entre 150 MHz y 3500 MHz para distancias entre 1 y 20 Km. Además, diversos estudios corroboran que es adecuado para GSM900/1800, UMTS, CDMA2000, WiMAX, LTE. Este modelo utiliza el perfil del terreno, los mecanismos de difracción (calculados de varias maneras) y tiene en cuenta las clases de ocupación del suelo (Clutter) y las alturas efectivas de las antenas con el fin de calcular la pérdida de trayectoria (*path loss*). Por lo tanto, es el modelo idóneo para la realización de este proyecto. Las propiedades de este modelo se exponen en la figura 4.3.

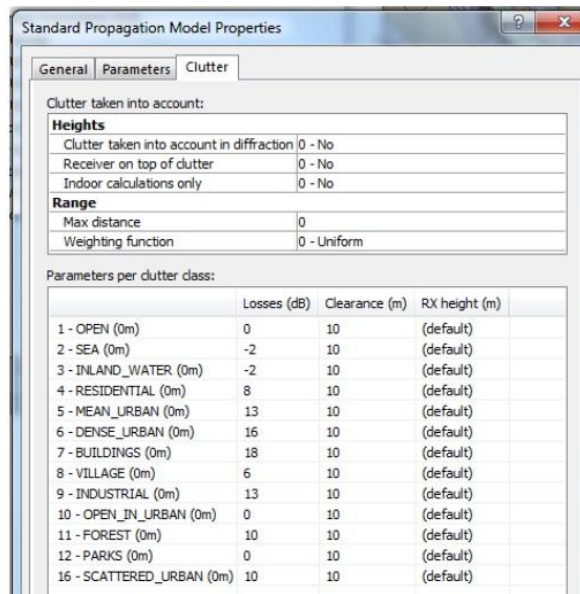


Fig. 4.3. Propiedades del Modelo de Propagación Estándar.

4.1.2 Configuración de la red.

Para comenzar la configuración de la red se seleccionó la banda de frecuencia a utilizar, en este caso la banda 1 de LTE. La banda 1 tiene las siguientes frecuencias 1920-1980 MHz y 2110-2170 MHz para el enlace ascendente y descendente respectivamente, con un ancho de banda del canal de 10 MHz y el modo que utiliza es FDD. La configuración de la banda de frecuencia es la mostrada en la figura 4.4.

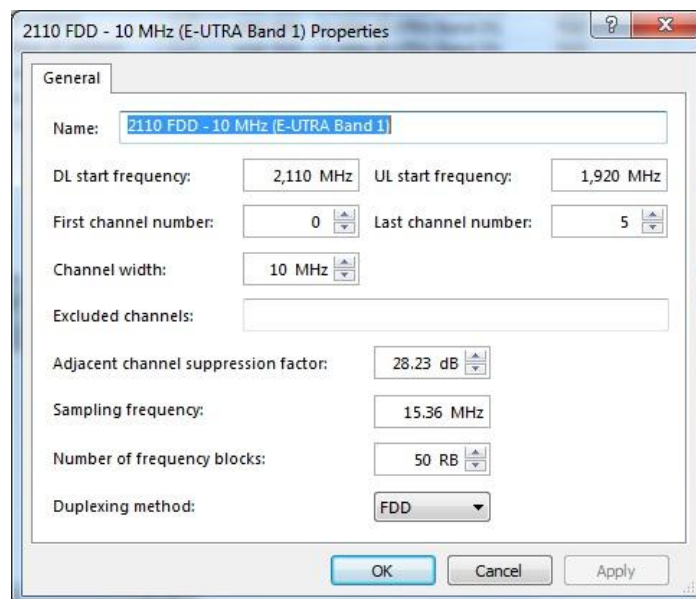


Fig. 4.4. Propiedades de la banda 1 de LTE.

En la figura 4.4 puede observarse además que se tienen 6 canales (*First channel number: 0* y *Last channel number: 5*), de los cuales solo se dispone del canal 0 para el estudio de cobertura de la red, debido a que el número de canales del que se disponga no afecta los resultados de la cobertura.

Posteriormente se realizó la elección de la antena, en este caso la antena que se seleccionó es de tipo xPol o polarización cruzada. La polarización cruzada es la polarización ortogonal a la polarización que este siendo discutida. Por ejemplo, si los campos de una antena presentan polarización horizontal, la polarización cruzada en este caso es la polarización vertical.

Este término surge porque una antena nunca esta polarizada 100% en un modo simple (lineal, horizontal). Por lo tanto, en ocasiones se presentan dos patrones de radiación de una antena, el de la co-pol (componente de polarización deseada) y el de la xPol (componente de polarización ortogonal a la deseada). La figura 4.5 muestra las características de la antena escogida.

Las ventajas para los operadores de redes de instalar estas antenas de doble polarización ($\pm 45^\circ$) en un sitio completo es, que de seis o nueve antenas polarizadas verticalmente que se instalaban inicialmente ahora solo hacen falta tres. Algunas ventajas de las xPol sobre las antenas de circuito impreso son las que se muestran a continuación:

1. Excelente razón de polarización cruzada sobre azimut

El diseño del dipolo entrega una notable razón de polarización cruzada no solo en la dirección principal sino también sobre el sector completo.

2. Bajo producto de intermodulación

A diferencia de las antenas de circuitos impresos, el producto de intermodulación es típicamente -150 dBc (2X25 watts).

3. Bajas pérdidas internas

El cable de arnés proporciona una baja distribución de pérdidas de potencia el cual permite una corta longitud de la antena.

4. Constante rendimiento eléctrico bajo malas condiciones climáticas

Debido al diseño del dipolo, la lluvia, el hielo y la nieve tienen pequeños efectos en los parámetros eléctricos tales como ROE y el aislamiento.

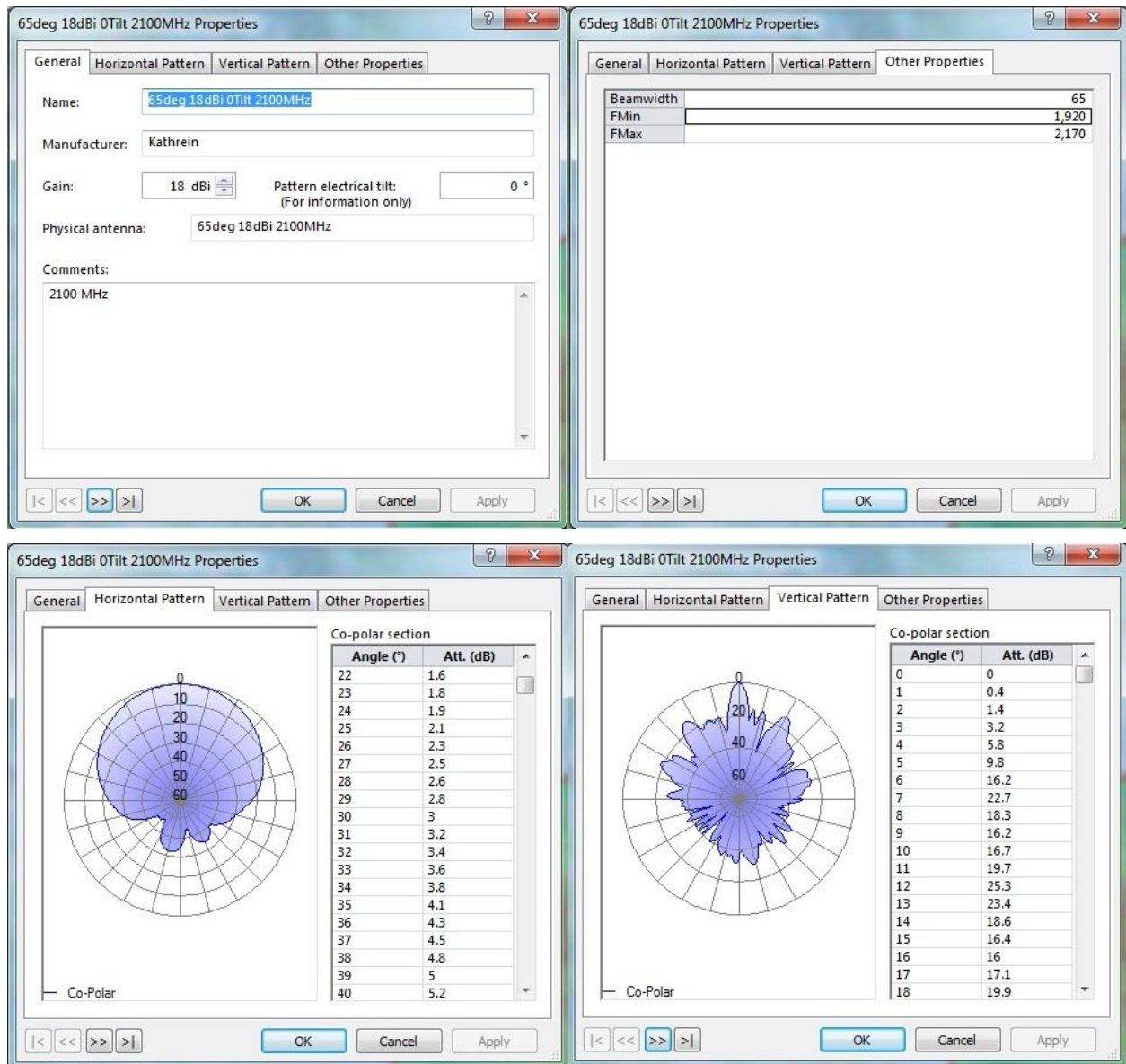


Fig. 4.5. Propiedades de la antena utilizada.

Posteriormente se creó la plantilla LTE con las características globales que tendrán todos los transmisores de la red, la cual se muestra en la tabla 4.2. Se definió una altura para las antenas de 30 m, aunque se configuró el valor real para cada transmisor, se tendrán 3 sectores por sitio, la potencia del transmisor máxima será de 40 dBm. El scheduler seleccionado fue el *Proportional Fair*, mediante el cual se busca aprovechar las condiciones del canal para aumentar el desempeño de la red pero asegurándose que todos los usuarios tengan en promedio una misma cantidad de recursos asignados.

Tabla 4.2. Configuración de la Plantilla LTE.

	Parámetro	Valor
General	Sectors	3
	Hexagon radius	0 m
	1st sector azimuth	0°
	Height/ground	30 m
	Mechanical downtilt	0°
	Additional electrical downtilt	0°
	Main antenna model	65deg 18dBi 0tilt 2100 MHz
	Number of antenna ports (transmission)	1
	Number of antenna ports (reception)	1
	Main propagation model	Standard Propagation Model
	Main radius	4000 m
	Main resolution	20 m
Transmitter	TMA	Default TMA Equipment
	Feeder	1/2" at 2100 MHz
	Transmitter equipment	Default eNode-B Equipment
	Feeder length (transmission)	5 m
	Feeder length (reception)	5 m
	Miscellaneous losses (transmission)	0 dB
	Miscellaneous losses (reception)	0 dB
	Total losses (transmission)	1.51 dB
	Total losses (reception)	-2.09 dB
Noise figure	4 dB	
LTE	Max. Power	40 dBm
	SS, PBCH, PDCCH, PDSCH offsets	0 dB
	Frequency band	2110 FDD-10 MHz (E-UTRA Band 1)
	Reception equipment	Default Cell Equipment
	Scheduler	Proportional Fair
	Min. RSRP	-140 dBm
	DL traffic load	100 %
	Max DL traffic load	100 %
UL traffic load	100 %	
Max UL traffic load	100 %	
Neighbors	Max number of neighbors (intra-technology)	22
	Max number of neighbors (inter-technology)	22

4.1.3 Configuración de los parámetros de tráfico.

Se definen una serie de parámetros que indican el tráfico que genera el usuario con cada servicio. Para ello se mantienen por defecto los servicios que están definidos en la platilla LTE (*FTP Download, Web Browsing Video Conferencing, VoIP*). La tabla 4.3 muestra los servicios de la red LTE.

Tabla 4.3. Configuración de los servicios de la red LTE.

	<i>FTP Download</i>	<i>Web Browsing</i>	<i>Video conferencing</i>	<i>VoIP</i>
<i>Type</i>	Dato	Dato	Voz	Voz
<i>Priority</i>	0	1	2	3
<i>Activity factor (DL)</i>	1	1	0.5	0.6
<i>Activity Factor (UL)</i>	1	1	0.5	0.6
<i>Average request throughput (DL)</i>	256 kbps	64 kbps	64 kbps	12.2 kbps
<i>Average request throughput (UL)</i>	32 kbps	32 kbps	64kbps	12.2 kbps
<i>Highest bearer (DL)</i>	15	15	15	15
<i>Highest bearer (UL)</i>	15	15	15	15
<i>Lowest bearer (DL)</i>	1	1	1	1
<i>Lowest bearer (UL)</i>	1	1	1	1
<i>Max throughput demand (DL)</i>	1024 kbps	128 kbps	64 kbps	12.2 kbps
<i>Max throughput demand (UL)</i>	128 kbps	64 kbps	64 kbps	12.2 kbps
<i>Min throughput demand (DL)</i>	0	64 kbps	64 kbps	12.2 kbps
<i>Min throughput demand (UL)</i>	0	32 kbps	64 kbps	12.2 kbps
<i>Scaling Factor</i>	95%	95%	95 %	95 %
<i>Offset</i>	0 kbps	0 kbps	0 kbps	0 kbps
<i>Body Loss</i>	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB

Los terminales que pueden disponer de estos servicios son el terminal móvil y el terminal MIMO, los cuales mantienen sus características estándar y no ha sido necesario modificarlos, como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Características de los terminales de la red LTE.

	Terminal Móvil	Terminal MIMO
<i>Min power</i>	-40 dBm	-40 dBm
<i>Max power</i>	23 dBm	23 dBm
<i>Noise figure</i>	8 dB	8 dB
<i>Losses</i>	0 dB	0 dB
<i>LTE equipment</i>	Default UE equipment	Default UE equipment
<i>UE category</i>	UE Category 5	UE Category 5
<i>Antena model</i>	Omni 11 dBi 0Tilt 2100Mhz	Omni 11 dBi 0Tilt 2100Mhz
<i>Diversity support</i>	None	MIMO
<i>MIMO number of transmission antenna ports</i>	-	2
<i>MIMO number of reception antenna ports</i>	-	2

Se creó un nuevo perfil de usuario llamado *Residential User*. Este tipo de usuario es el que está en su domicilio y solo hace uso del servicio de voz y datos de forma puntual, debido a que puede hacer uso de la telefonía fija para evitar gastos.

Se tienen dos tipos más de usuarios, que proporciona Atoll y que se han dejado con sus parámetros por defecto. Estos son el *Business User* y el *Standard User*.

Business User son aquellos usuarios que disponen de un terminal MIMO de todos los servicios definidos que ofrece la red (en este caso: VoIP, Navegación web, Video conferencias y Descargas FTP) y que hacen un uso de la red más elevado al resto de usuarios.

Standard User son aquellos usuarios que tienen un terminal móvil normal y hacen uso de los servicios de VoIP y de navegación web que es ligeramente inferior al de los *Business User*. En la tabla 4.5 se muestran las características de los perfiles de usuarios de la red LTE.

Tabla 4.5. Características de los perfiles de usuarios de la red LTE.

	<i>Service</i>	<i>Terminal</i>	<i>Call/ hour</i>	<i>Duration (sec.)</i>	<i>UL Volumen (KBytes)</i>	<i>DL Volumen (KBytes)</i>
<i>Business User</i>	<i>FTP Download</i>	MIMO	0.01		2000	15000
	<i>Video Conferencing</i>	MIMO	0.01	600		
	<i>VoIP</i>	Mobile	0.2	240		
	<i>Web Browsing</i>	MIMO	0.1		700	4500
<i>Standar User</i>	<i>Web Browsing</i>	MIMO	0.1		700	4500
	<i>VoIP</i>	Mobile	0.2	240		
<i>Residential User</i>	<i>VoIP</i>	Mobile	0.1	60		

Para realizar posteriormente simulaciones de tráfico se han de definir los denominados *Environments*. Existen cuatro tipos por defecto: *Dense Urban*, *Urban*, *Suburban* y *Rural*. Estos son entornos que se consideran en el despliegue de la red. Cada entorno, además de estar formado por diferentes tipos de usuarios con movibilidades y densidades, también está formado por diferentes tipos de zonas definidas por el mapa de *Clutters* de tal forma que por ejemplo, en un *Environment* urbano se puede tener desde zona urbana hasta parques. Esta configuración de los *Environments* depende del criterio escogido por el usuario y pueden definirse nuevos *Environments* si se desea.

Se ha considerado *Dense Urban* al centro de Santiago de Cuba, así como *Environment Urban* a las zonas aledañas a este. El área restante ha sido considerada como *Rural* exceptuando la zona del aeropuerto que se ha definido como *Suburban*.

Para finalizar la configuración de tráfico se crea un mapa de tráfico, el cual señala a qué tipo de usuario corresponde cada pixel del mapa. El mapa utilizado es el mostrado en la figura 4.7.

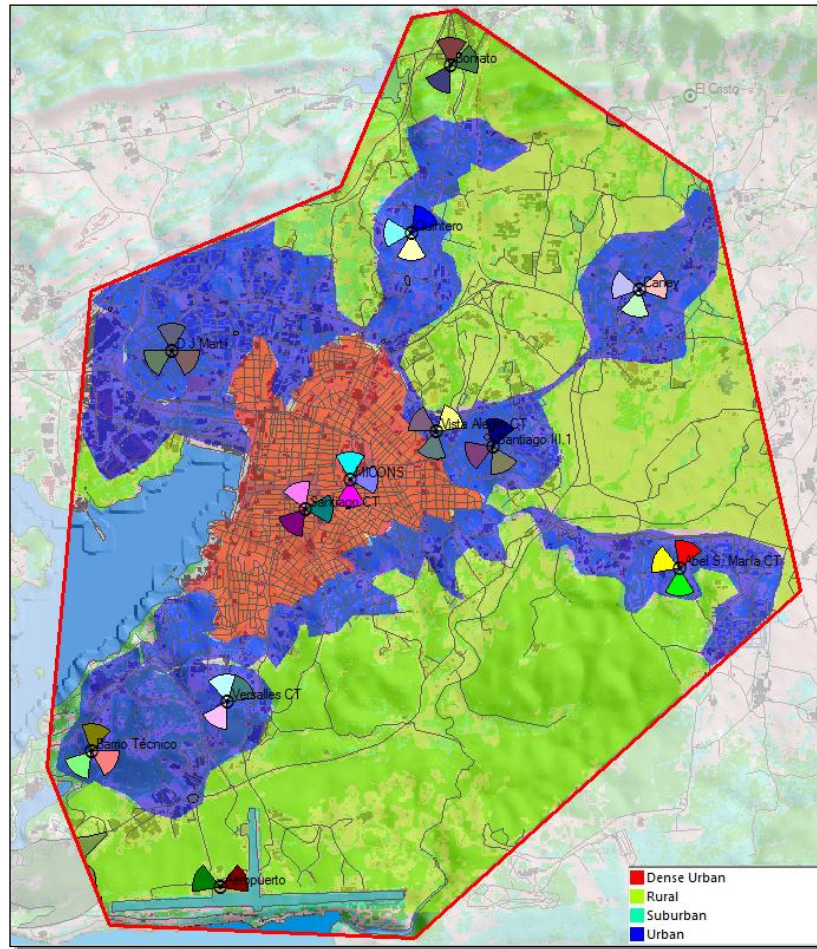


Fig. 4.7. Mapa de tráfico.

4.1.4 Predicciones de cobertura según el nivel de señal

Para la verificación de la cobertura en la zona de cómputo se realizaron tres tipos de predicciones independientes de la carga de tráfico, las cuales proporcionan información de las condiciones de propagación de la red en todas las localizaciones del área objetivo, las cuales se exponen en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Predicciones de cobertura según el nivel de señal.

Tipo de Predicción	Condiciones		
	Signal Level	Server	Shadowing
Coverage by Signal Level	≥-105 dBm	All	80%
Coverage by Transmitter		Best Server	
Overlapping Zones		All	

En la figura 4.8 se puede observar la predicción de cobertura por nivel de señal, la cual es una predicción idónea para visualizar si hay zonas del mapa que no tienen señal o esta es insuficiente. Este tipo de predicciones muestra la cantidad de potencia que hay en cada pixel del mapa, sin tener en cuenta a qué transmisor pertenece. El menor nivel de señal de los transmisores se estableció en -105 dBm, por encima de este valor será más rojiza la zona del mapa mientras el nivel de señal aumente y será más azul cuando esté más cerca de este umbral.

Realizado este estudio se pudo observar que los niveles de las señales de referencia recibidas dentro de la zona de estudio eran en su mayoría superiores a -95 dBm, los cuales son niveles de señal suficientes para el funcionamiento correcto de LTE aunque se observa que hay zonas donde el terminal UE puede perder la conexión dado que esta fuera del radio de alcance de cualquier estación base.

En la predicción 2 se visualizan las zonas de cobertura de cada transmisor, asignando un color diferente a cada uno. La figura 4.9 muestra el resultado de esta predicción.

Seguidamente se realizó un análisis de las zonas solapadas. Este tipo de predicciones muestran el número de transmisores que están proporcionando nivel de señal en una determinada zona, por lo cual, en cada pixel del mapa se tendrá un color que indicará el número de transmisores que proporcionan señal en ese pixel. Cuanto más rojizo sea ese color, más transmisores proporcionan señal a ese pixel y cuanto más azul sea, menos. Con esto, se puede hacer una idea de si se tendrán muchos interferentes o no en una determinada zona. Las áreas donde el móvil se encuentra conectado a más de una estación base favorecen el proceso de *soft handover*, pero si este número de estaciones base pasan de cuatro se estaría desaprovechando el alcance de los transmisores en regiones que ya poseen servicio.

Como se puede apreciar en la figura 4.10 existen muy pocas zonas en el área de estudio que poseen cobertura de más de cuatro transmisores, como es el caso del Distrito José Martí y algunas áreas del centro de la ciudad, lo cual no constituye un problema debido a la posible ocurrencia de interferentes que impidan el correcto funcionamiento de la red.

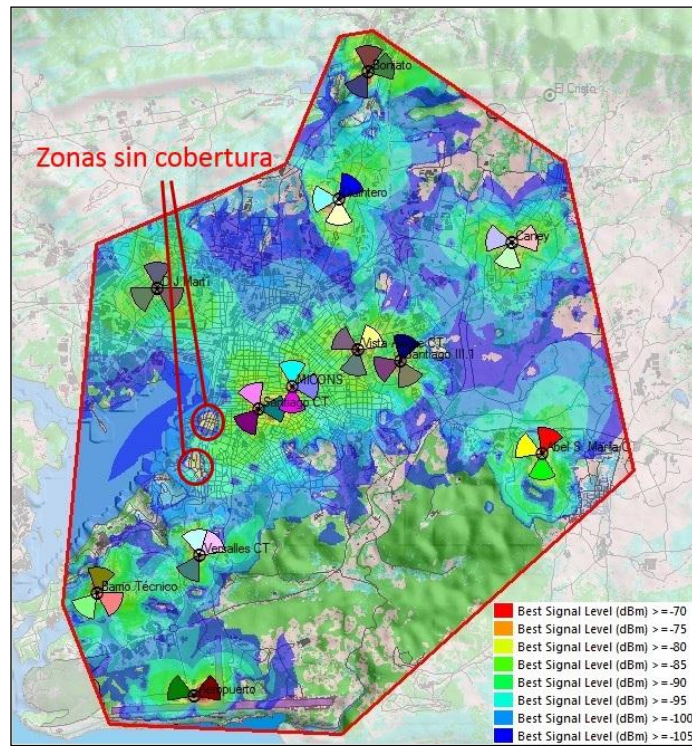


Fig. 4.8. Predicción de cobertura por nivel de señal.

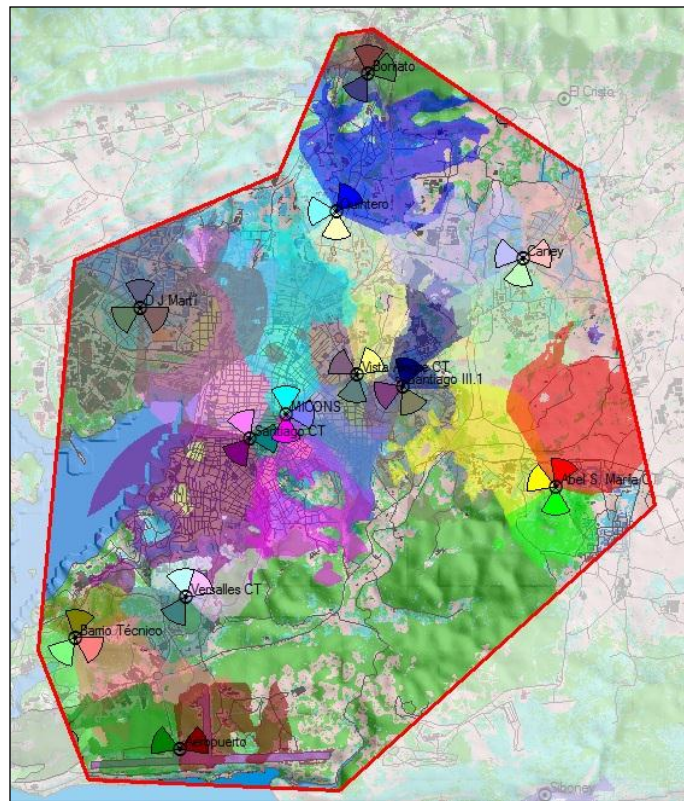


Fig. 4.9. Predicción de cobertura por transmisor.

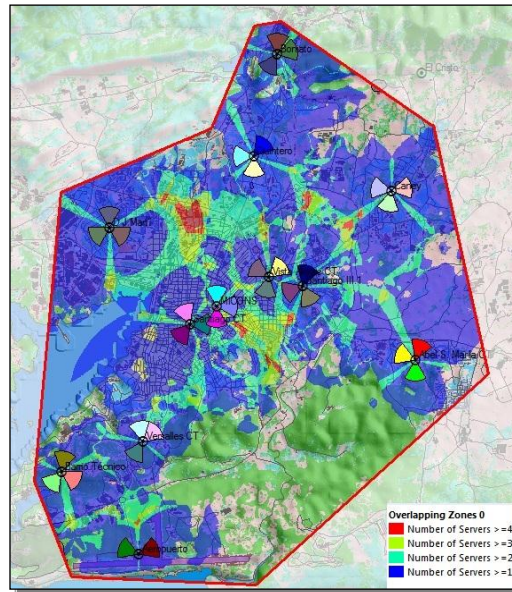


Fig. 4.10. Predicción de zonas solapadas.

Posteriormente se realizaron estudios del nivel de señal efectivo de los canales físicos de tráfico en LTE PUSCH y PDSCH (los cuales también son independientes de la carga de tráfico). Se optó por analizar el comportamiento del PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) debido a que es una señal de vital importancia ya que transporta datos de usuario y puede transportar información de aviso por parte de la red. Por otro lado, el PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) realiza las mismas funciones pero para el enlace ascendente y el PUCCH transmite información de control del usuario si este no tiene datos a transmitir.

Dentro de las condiciones de cada predicción, se configuró el tipo de terminal, tipo de servicio y movilidad, ya que para generar los cálculos Atoll coloca un terminal de prueba (con el servicio y la movilidad definida) en cada pixel, siguiendo la misma escala de colores que se ha usado en los casos anteriores, cuanto más rojo más potencia y cuanto más azul menos. La tabla 4.7 muestra las condiciones y campo de estudio de las predicciones de nivel de señal PDSCH y PUSCH.

Tabla 4.7. Predicciones de nivel de señal PDSCH y PUSCH.

Tipo de predicción	Condiciones			Campo de estudio
	Terminal	Servicio	Movilidad	
Effective Signal Analysis (DL)	Móvil	FTP Download	peatonal	Best PDSCH Signal Level (DL)
				PDSCH C/N Level (DL)
Effective Signal Analysis (UL)	Móvil	FTP Download	peatonal	PUSCH y PUCCH Signal Level (UL)
				PUSCH y PUCCH C/N Level (UL)

En la figura 4.11 se visualiza una predicción del nivel de potencia del PDSCH. Este tipo de predicción muestra la cantidad de potencia, de la señal en cuestión, que llega a cada pixel del mapa. Como se puede observar alrededor del 90% de la ciudad es de un color verde, es decir, que la mayoría de las zonas del mapa tendrán niveles de potencia para el PDSCH, superiores a -90 dBm. Con estos resultados se puede concluir que el enlace descendente no debe tener problemas en términos de recepción de potencia debido a que en las áreas de cobertura se obtienen valores superiores a -90 dBm, los cuales son valores suficientes para el correcto funcionamiento del sistema LTE.

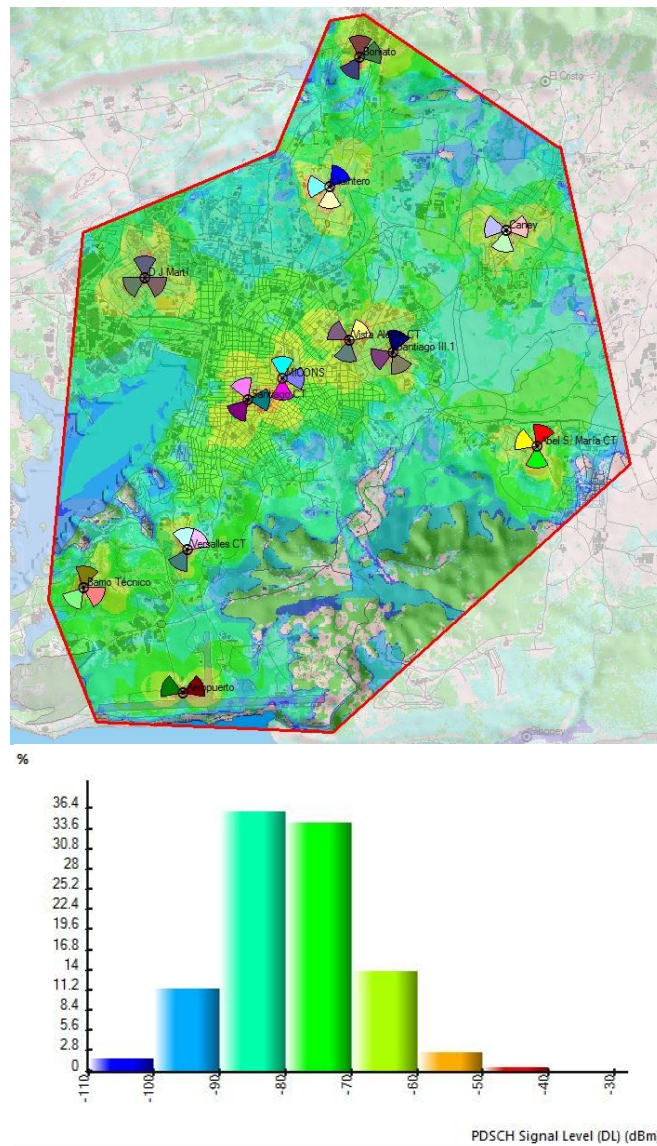


Fig. 4.11. Predicción de nivel de potencia del PDSCH en DL.

En la figura 4.12 se analiza el nivel de potencia de los canales PUSCH y PUCCH en el enlace ascendente con el fin de visualizar su comportamiento y ser capaz posteriormente de comparar ambos enlaces.

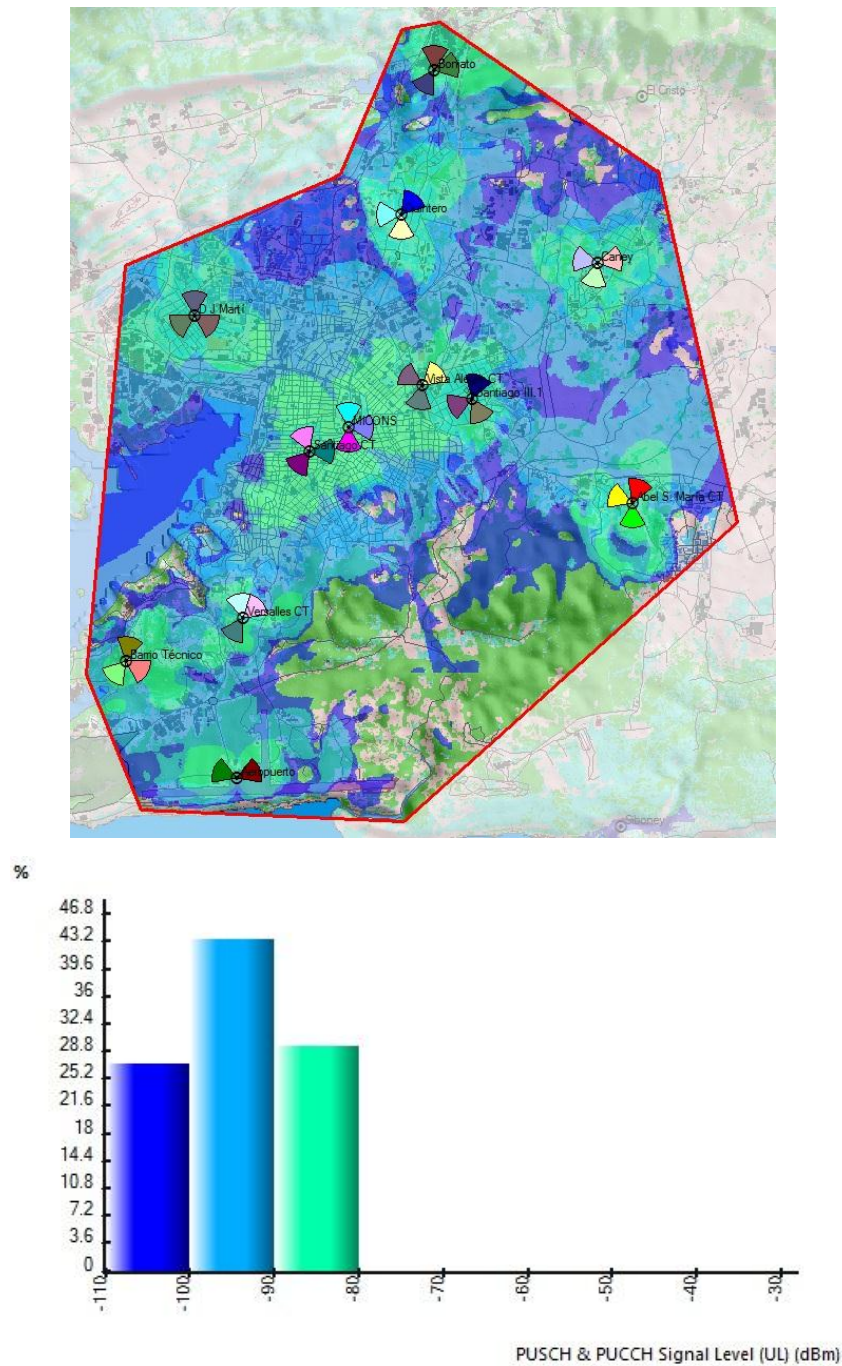


Fig. 4.12. Predicción de nivel de potencia del PUSCH y PUCCH en UL.

Como se puede observar, en las zonas cercanas a las estaciones base se obtienen valores de potencia superiores a -100 dBm, los cuales son resultados positivos, no obstante se tienen zonas con niveles de potencia entre -100 y -110 dBm en las cuales el canal puede tener un comportamiento atípico.

Con estos resultados se puede comprobar que el enlace descendente tiene un mejor comportamiento ya que logra alcanzar valores superiores a -90 dBm en la mayor parte de la zona de estudio, sin embargo el enlace ascendente solo tendrá un comportamiento adecuado en las zonas cercanas a las estaciones base.

Posteriormente se realizan predicciones de tipo portadora a ruido (C/N), las cuales muestran en cada pixel del mapa, la relación señal a ruido de los canales en cuestión. En este tipo de predicciones se utilizan las figuras de ruido definidas en las propiedades de los terminales y los transmisores con el fin de calcular el ruido total en los enlaces descendentes y ascendentes respectivamente.

La figura 4.13 muestra la predicción de C/N del PDSCH y en la figura 4.14 la predicción C/N del PUSCH.

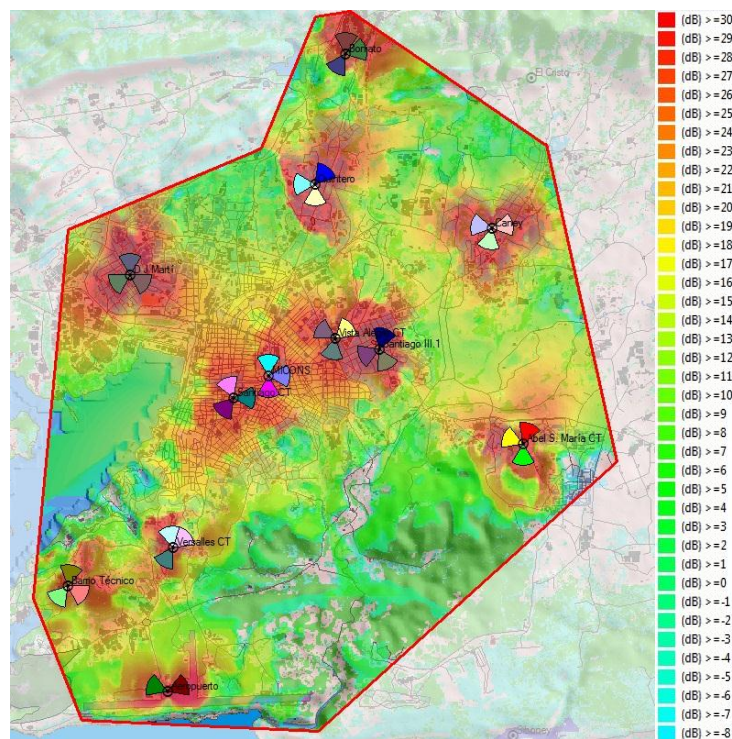


Fig. 4.13. Predicción de C/N del PDSCH.

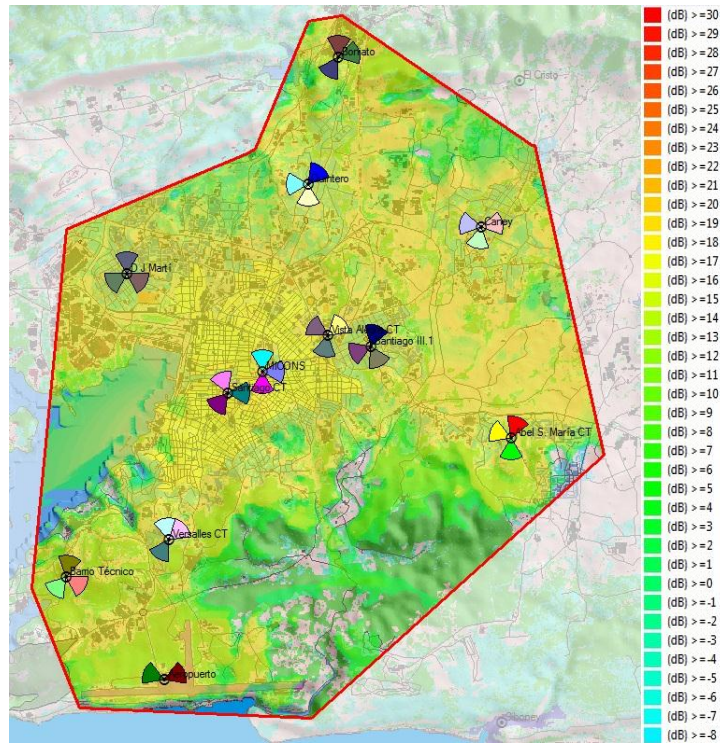


Fig. 4.14. Predicción de C/N del PUSCH y PUCCH.

Se realizó una comparación del C/N de los enlaces descendente y ascendente a través de la herramienta *histogram* con los valores en dB de la señal recibida por porcentaje de área cubierta, con el objetivo de definir el enlace que limita la cobertura, cuyo resultado se muestra en la figura 4.15.

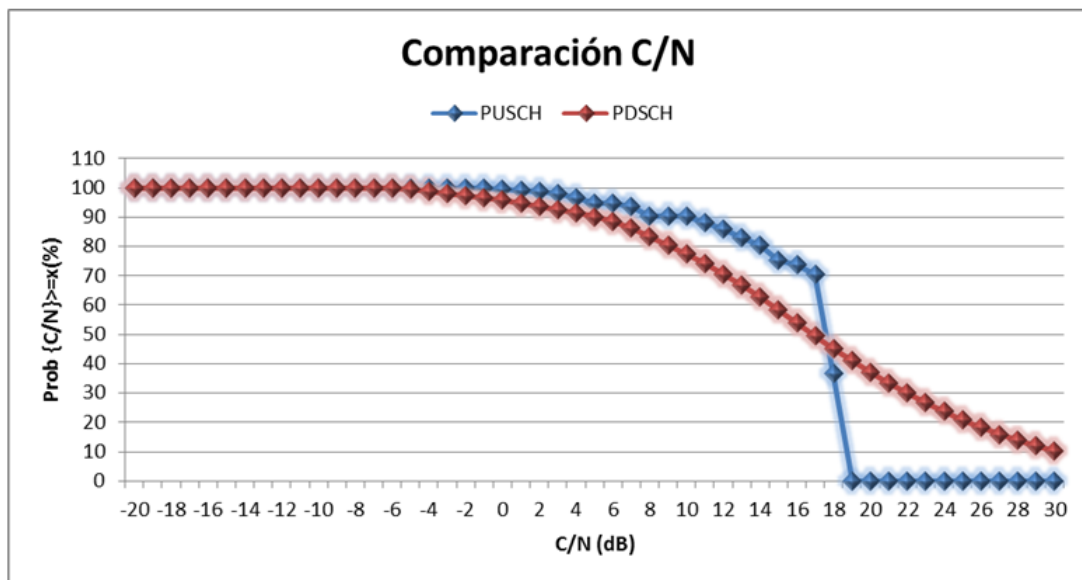


Fig. 4.15. Comparación de C/N en los enlaces ascendente y descendente

Se puede visualizar que el enlace descendente presenta una relación C/N levemente inferior al enlace ascendente en alrededor del 70 % de los puntos del mapa, motivo por el cual se puede concluir que el PDSCH es el que limita la cobertura del despliegue.

4.1.5 Asignación de vecinos.

Atoll permite el establecimiento de vecindades de forma automática a través de la herramienta ANP (*Automatic Neighbour Planning*), imponiendo una serie de restricciones sobre las células que pueden formar parte de una vecindad. Una vez establecidas las relaciones de vecindad, Atoll facilita la visualización de células vecinas sobre el mapa, lo que posibilita una cómoda gestión.

Se realizó una asignación automática de vecinos estableciendo un número máximo de 22 vecinos para la misma tecnología (*Intra-technology*) con una distancia máxima entre vecinos de 4.000 m. Se consideró un *shadowing* para una probabilidad de cobertura del 85% en el borde de la célula y un porcentaje del 10 % de solapamiento (*% Min Covered Area*) entre las células servidora y vecina para ser consideradas vecinas.

4.1.6 Asignación de frecuencias.

Con el objetivo de reducir la interferencia inter-celular de la red, la herramienta de asignación automática de frecuencias tiene en cuenta matrices de interferencia y distancias de reuso para determinar la asignación de frecuencias así como la lista de colindancias (vecinos) por cada célula. Se realizó una planificación automática de frecuencias tomando en cuenta la asignación de los vecinos realizada previamente manteniendo el canal '0' como canal asignado para todas las celdas como estaba establecido inicialmente.

4.1.7 Asignación de identificadores de células físicas.

En LTE, existen 504 identificadores de células físicas disponibles, numerados de 0 a 503. Los identificadores de célula física se agrupan en grupos de 168 ID de célula únicos (llamados identificadores de SSS en Atoll), conteniendo cada grupo 3 identidades únicas (llamados identificadores de PSS en Atoll). Un ID de SSS se define así únicamente por un número en el rango de 0 a 167, y un ID de PSS se define por un número en el rango de 0 a 2.

Se realizó una asignación automática del *Physical Cell ID* para cada célula tomando en consideración los vecinos definidos en el punto anterior y permitiendo asignar ID dentro del dominio completo del 0 al 503. Se estableció como restricción forzar que todas las células de un mismo Sitio obtuvieran el mismo SSS ID para facilitar la búsqueda a los terminales.

4.1.8 Simulación.

En Atoll, una simulación se basa en una distribución realista de los usuarios en un punto dado en el tiempo. La distribución de los usuarios en un momento dado se conoce como una instantánea. Sobre la base de esta instantánea, Atoll calcula varios parámetros de red, como carga de tráfico en el enlace descendente y ascendente, el aumento del ruido del enlace ascendente.

Se puede crear una simulación o un grupo de simulaciones que se realizarán de forma secuencial. Se debe tener al menos un mapa de tráfico o una lista de suscriptores en el documento para poder realizar dichas simulaciones.

En este caso se realizó una simulación de Monte Carlo la cual se denominó con el nombre de 'Stgo', la cual analiza el estado de conexión, en la que se visualizan los usuarios activos en DL+UL, UL y DL, los usuarios inactivos, así como los usuarios rechazos por insuficiente cobertura o ausencia del servicio que solicita, también detecta si existe saturación de los recursos disponibles. La figura 4.16 muestra el resultado de la simulación del estado de conexión.

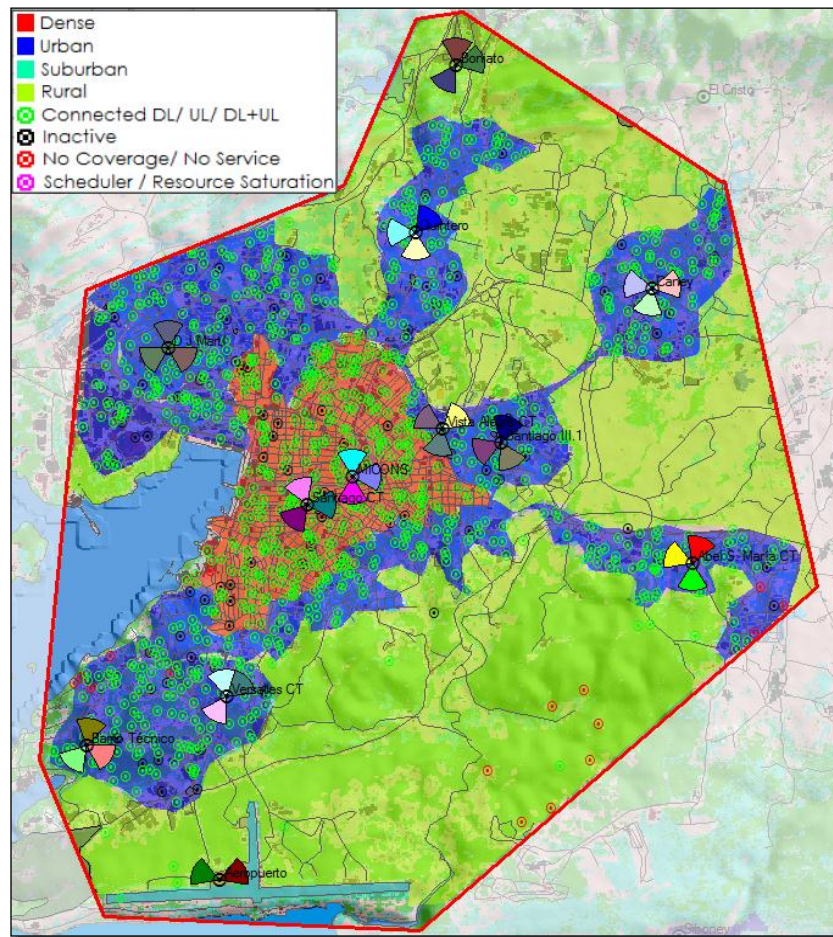


Fig. 4.16. Simulación del estado de conexión.

La tabla 4.8 muestra en cifras el resultado de la simulación, en la cual se obtuvo resultados satisfactorios ya que de un total de 1072 usuarios que intentaron conectarse a la red solo fueron rechazados 16, de ellos se rechazaron 15 debido a insuficiente cobertura en el área que se encontraban, además de un usuario que fue rechazado debido a que no pudo obtener el servicio solicitado representando solo el 1.5% del total.

Tabla 4.8. Resultados de la simulación.

Servicios	Usuarios	Activo			Inactivo
		DL	UL	DL+UL	
FTP Download	44	21	23	0	0
Video Conferencing	27	8	5	8	6
VoIP	364	88	98	131	47
Web Browsing	621	430	188	3	0

4.1.9 Predicciones de cobertura según la calidad de la señal.

Las predicciones de calidad de señal son dependientes del tráfico y sirven para analizar la capacidad de la red y su funcionamiento. En este caso la interferencia es el principal factor limitante en el rendimiento de las redes LTE, se ha reconocido como el principal cuello de botella en la capacidad de red y es a menudo responsable de la degradación de las prestaciones. Por tal motivo el siguiente paso es evaluar el comportamiento de la red a través de predicciones de nivel de portadora a ruido más interferencia ($C/I+N$) basadas en la simulación anterior, las cuales se muestran en la tabla 4.8 y cuyos resultados son representados en la figura 4.17. La tabla 4.9 muestra las predicciones de calidad de señal del PDSCH y PUSCH.

Tabla 4.9. Predicciones de Calidad de señal PDSCH y PUSCH

Predicción	Condición de carga
Coverage by $C/(I+N)$ Level (DL)	Stgo
Coverage by $C/(I+N)$ Level (UL)	Stgo

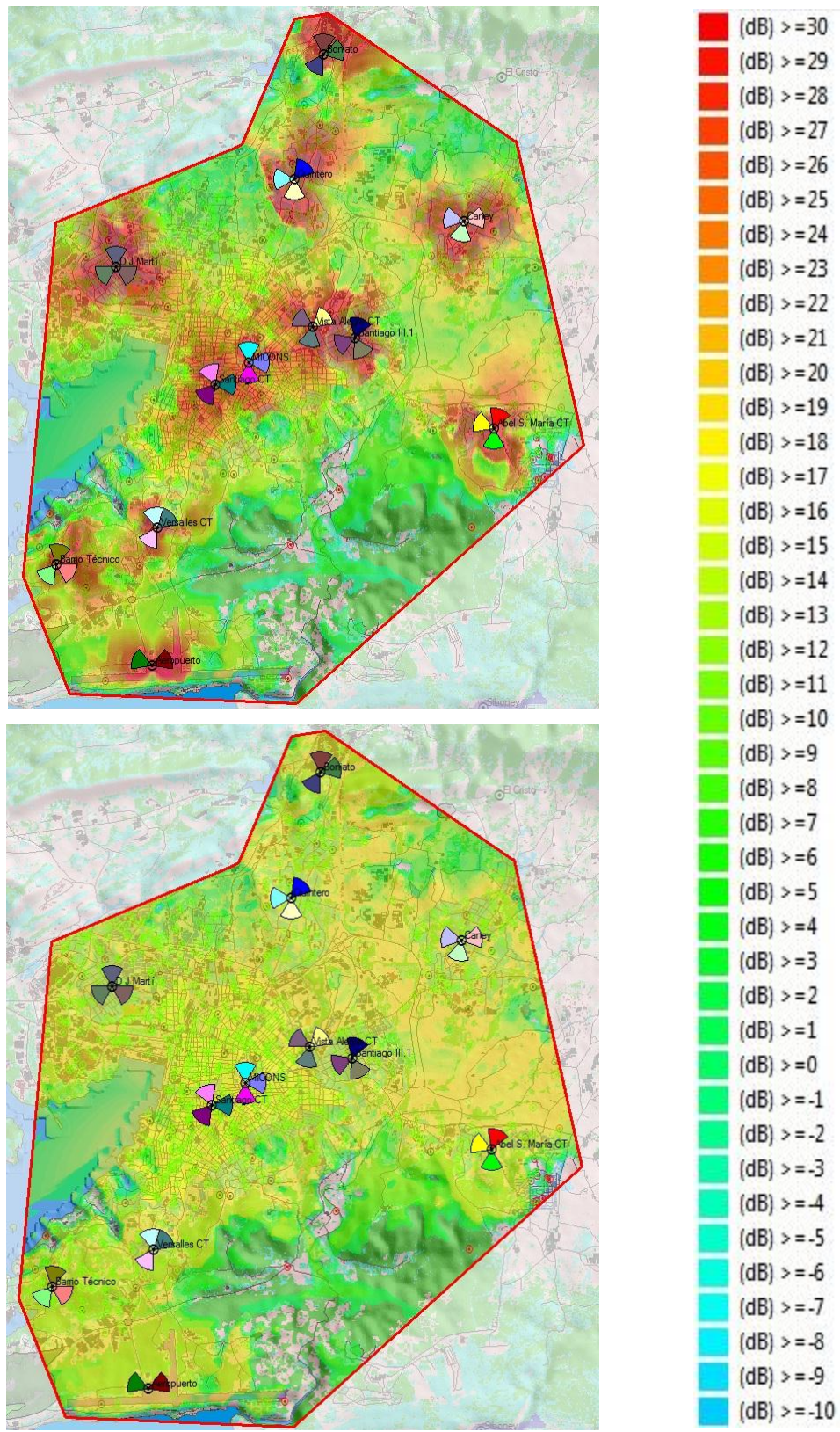


Fig. 4.17. Predicción de $C/(I+N)$ del PDSCH (arriba) y $C/(I+N)$ del PUSCH y PUCCH (abajo).

De las predicciones anteriores se obtuvo una huella de cobertura suficientemente amplia como para abarcar casi en su totalidad la zona de estudio en ambos enlaces, lo cual resulta ser un resultado satisfactorio para el correcto funcionamiento del sistema LTE.

Posteriormente se realizaron predicciones de los mejores servicios portadores disponibles en función de la $C/(I+N)$. Un *Radio Bearer* es un esquema de modulación/codificación usado para transmitir los datos a través del canal, y se representa en el mapa con un color diferente según el tipo de servicio portador que se puede tener, como se muestra en la figura 4.18.

Se observa que cuanto más cerca se está del transmisor mejor servicio portador se va a tener, es decir, se podrá utilizar una modulación espectralmente más eficiente pero menos robusta, en este caso QAM, lo cual favorecerá en gran medida la velocidad de bajada y de subida máximas que se puedan alcanzar.

También existen zonas en las que no se ofrece *Radio Bearers* ya que la relación $C/(I+N)$ puede ser mala debido a la presencia abundante de interferentes. El enlace ascendente ofrece servicios portadores en puntos en los que para el descendente no son posibles, por lo cual presenta mayor calidad del canal, debido a que el servicio de acceso a Internet presenta más demanda en el enlace descendente y menos en el ascendente.

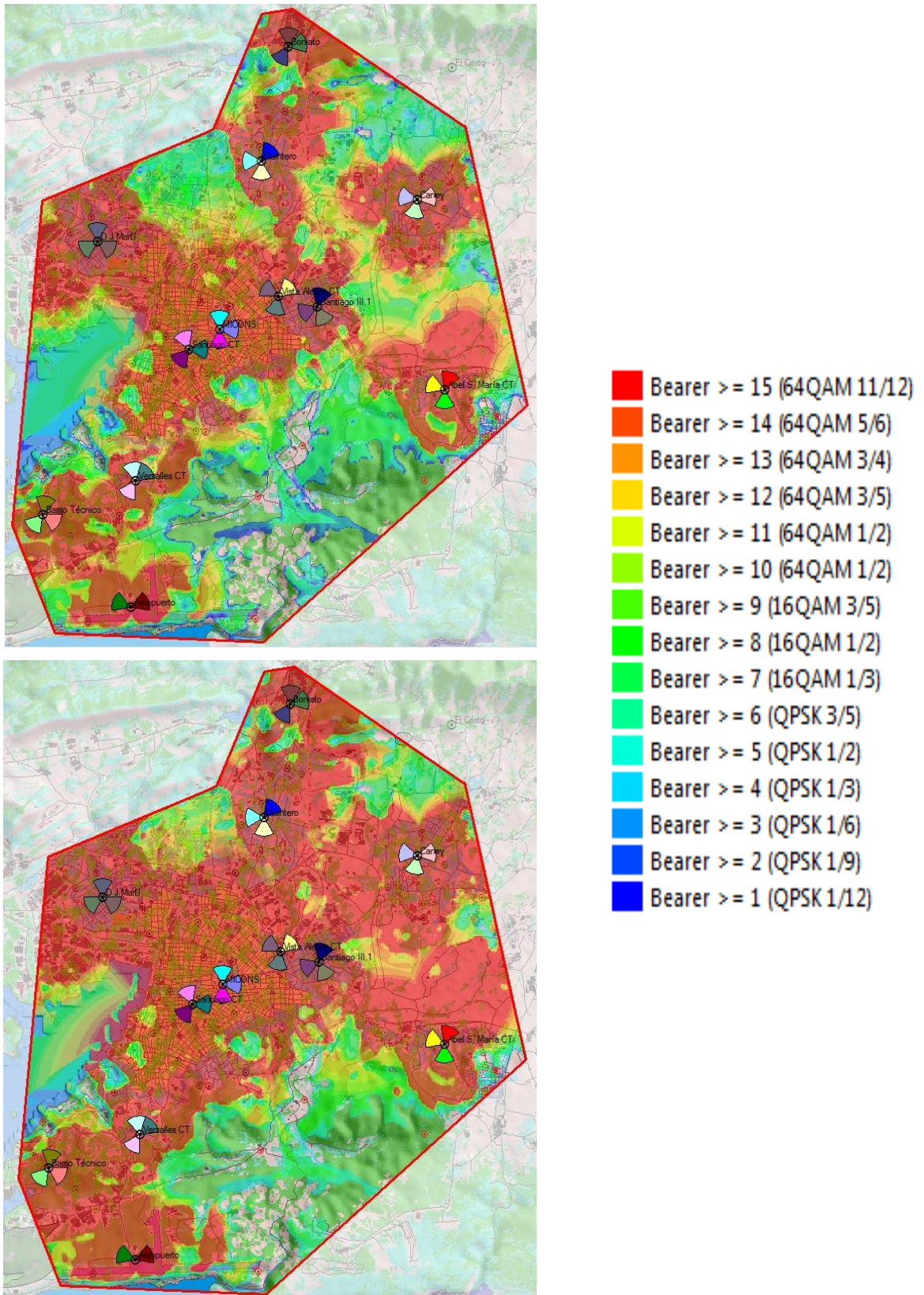


Fig. 4.18. Predicción de servicios portadores del PDSCH (arriba) y PUSCH y PUCCH (abajo).

Finalmente se realizó el análisis del área de servicio efectiva, la cual es la intersección de las áreas de servicio de los enlaces ascendentes y descendentes, es decir, el *software* calcula el área en la cual un servicio estará disponible.

Se puede observar que el área de servicio ocupa alrededor del 90% de la zona de estudio, siendo un resultado positivo aunque podría mejorarse buscando las zonas donde hay cobertura de más de cuatro transmisores y modificar los parámetros de estos, tales como: el azimut (permite cambiar la zona donde da cobertura cada transmisor), la altura y el *tilt* o ángulo de inclinación de la antena y se podrían ubicar las estaciones bases suficientes para dar cobertura a la zona donde no se brindan servicios. La figura 4.19 muestra los resultados de la predicción del área de servicio efectiva.

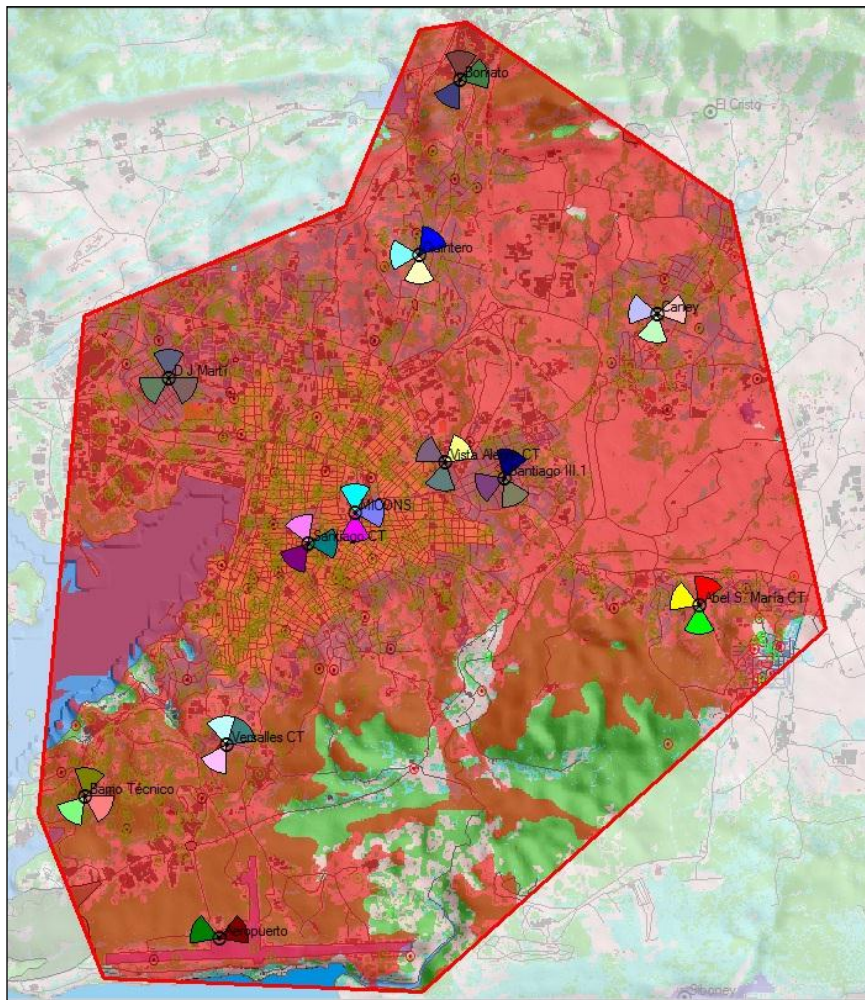


Fig. 4.19. Predicción del área de servicio efectiva.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Tras el análisis de los estudios anteriores se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Se simuló una red LTE en Santiago de Cuba, empleando el *software* Atoll, teniendo en cuenta los sitios actuales (tecnología UMTS y GSM) que dispone ETECSA para minimizar los costos, licencias de construcción, tiempos de implementación favoreciendo así la viabilidad del proyecto.
2. Se demostró que se tiene una cobertura apropiada en la zona de estudio y niveles de potencia idóneos para el correcto funcionamiento de la red LTE realizando el análisis de cobertura por nivel de señal.
3. Se realizó una simulación de Monte Carlo donde se pudo analizar el comportamiento de la red en un instante determinado de tiempo, lo cual permitió estudiar el acceso de los usuarios a los servicios brindados por la red.
4. Se comprobó que se ofrece servicio de mayor calidad en las zonas cercanas a los transmisores.

Recomendaciones

1. Realizar el dimensionado de la red y de esta manera rectificar los errores encontrados en su estructura.
2. Realizar la misma investigación para la banda de frecuencia de 900 MHz, comparar ambos resultados y sobre la base de los mismos decidir qué variante aplicar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. I. Mena y D. A. Pérez, Planificación de una red de comunicaciones móviles LTE empleando el programa Atoll, 2013.
- [2] M. Gorricho y J. L. Gorricho, Comunicaciones móviles, Barcelona: UPC, 2002.
- [3] J. Tecuanhuehue, Sistemas CDMA: cdmaOne, cdma2000, Cholula, México, 2006.
- [4] C. E. Guinand Salas, Planificación de una red LTE con la herramienta Atoll y análisis del impacto de las estrategias de Packet Scheduling, 2012.
- [5] O. Sallent, J. L. valenzuela y R. Agustí, Principios de comunicaciones móviles, barcelona: UPC, 2003.
- [6] B. Walke, P. Seidenberg y M. P. Althoff, UMTS. The Fundamentals., Chichester: Wiley, 2003.
- [7] J. korhonen, Introduction to 3G Mobile Communications, Norwood: Artech House, 2003.
- [8] S. Lingyang y S. Jia, Evolved Cellular Network Planning and Optimisation for UMTS and LTE, Boca Ratón: CRC Press, 2011.
- [9] A. Cruz Torres, Modelación de un entorno 3G/UMTS en la red celular de ETECSA, 2012.
- [10] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold y P. Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, San Diego: Academic Press, 2007.
- [11] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2011, pp. 1-412.
- [12] Agilent: 3GPP Long Term Evolution - System Overview, Product Development, and Test Challenges, 2009.
- [13] 3GPP TSG RAN TR 25.912 v7.2.0. Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)..

- [14] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez y O. Sallent, *Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*, Barcelona: Fundación Vodafone España, 2010.
- [15] C. Peñuelas, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Barcelona, 2011.
- [16] S. Sesia, I. Toufik y M. Baker, *LTE- The UMTS Long Term Evolution: From theory to Practice*, Chichester: Wiley, 2009.
- [17] Forsk, *Atoll 3.1.2 User Manual Radio E1*.
- [18] A. Álvarez Pérez, *Planificación radioeléctrica con Atoll de una red UMTS par la ciudad de Sevilla*, 2007.
- [19] R. L. Mieres y E. E. Gonzáles, *Análisis de una red UMTS mediante el programa Atoll*, 2014.

ANEXOS

Anexo I

Modelo de propagación.

El Standard Propagation model está basado en la siguiente formula:

$$L_{model} = K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{Txeff}) + K_4 \times DiffractionLoss + K_5 \log(d) \times \log(H_{Txeff}) + K_6(H_{Rxeff}) + K_7 \log(H_{Rxeff}) + K_{clutter} f(clutter)$$

Siendo:

K1: Constante Offset (dB)

K2: Factor multiplicador del log (d)

d: Distancia entre el transmisor y el receptor (m)

K3: Factor multiplicador del log (Htxeff)

Htxeff: Altura efectiva de la antenna transmisora (m)

K4: Factor multiplicador para el cálculo de la difracción (Tiene que ser un número positivo)

Diffraction Loss: Pérdidas debido a las difracciones sobre un camino obstruido (dB)

K5: Factor multiplicador de log (d) x log (Htxeff)

K6: Factor multiplicador de

K7: Factor multiplicador de log (Hrxeff)

Hrxeff: Altura efectiva de la antenna del móvil (m)

Kclutter: Factor multiplicador de f (clutter)

F (*clutter*): Promedio ponderado de las pérdidas debido a las clases de zonas (*clutter*).

Notas:

1. Existen 4 tipos de valores para K1 y K2, dependiendo de la distancia entre el transmisor y el receptor (cercano o alejados) y si se encuentran en línea de vista o no. El término "línea de vista"

se refiere a que en el trayecto directo de propagación entre el transmisor y receptor no existe ninguna obstrucción

2. Para los cálculos se mantuvieron los valores por defecto definidos por ATOLL, en los cuales no se consideran la altura de la antena del móvil ni el promedio ponderado de pérdidas debido a las clases de zonas, por lo que $K_6=K_7=K_{clutter}=0$.

3. Las pérdidas debido a las clases de zona (clutter class) son tomados en cuenta en el cálculo de la difracción, el cual está descrito en las recomendaciones ITU 526-5.