

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**PROPUESTA DE REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS DE LA
TECNOLOGÍA GSM 1900 (BANDA B), PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UNA SEGUNDA PORTADORA LTE PARA
LA PARROQUIA DE SANGOLQUÍ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

JORGE LUIS BENAVIDEZ SANMARTIN

DIRECTOR:

ING. RAMIRO MOREJON, MSc

Quito, Febrero del 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Luis Benavidez Sanmartin, bajo mi supervisión.

ING. RAMIRO MOREJON, MSc
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Jorge Luis Benavidez Sanmartin, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jorge Luis Benavidez Sanmartin

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas importantes en mi vida.

A mi padre, que con sus bendiciones, consejos, ejemplo, esfuerzo y sacrificio supo guiarme por el camino del bien, permitiéndome formar en una universidad fuera de mi ciudad Machala.

A mi madre Lupe, que siempre estuvo pendiente de mí, guiándome con sus consejos, bendiciones.

A mi hermana, que siempre me ayudo en los momentos difíciles.

A mi hermano, que en paz descanse por estar a mi lado.

A mi familia Sánchez Valdivieso, Mariana, Willper, Estefany y Jesusito por abrirme las puertas de su hogar, permitiéndome empezar mis estudios en la Politécnica Nacional y sobre todo a mi mama Mariana por sus consejos, su cariño y sus bendiciones que han sido fundamental en mi preparación profesional.

A mi familia Domínguez Sánchez, Rosita, Alberto, Andrés y Laura por abrirme las puertas de su hogar y ser un apoyo incondicional para mí. Sobre todo mi mama Rosita que con su cariño, consejos y bendiciones que han sido fundamental en mi preparación formación profesional.

A mi esposa Roció Ñacato y a mis hijos Jorge Benavidez, Alan Benavidez y Paula Benavidez por ser mi inspiración y razón de seguir a delante día a día.

A mi amigo y compadre Javier Arévalo, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme estar vivo, por permitir tener a mi familia, por la bendición de mis hijos y por permitirme alcanzar esta meta. Agradezco a mi familia natural y adoptiva que siempre ha estado pendiente de mí, apoyándome en todo momento. Agradezco a los amigos que supieron ayudarme en los momentos más difíciles. También agradezco a los profesores que con sus consejos brindados en clases fueron guías en mi proceso de aprendizaje y en especial a mi director el Ingeniero Andrés Reyes, por el apoyo, su paciencia y su ayuda condicional para la realización de este proyecto.

1.3.7.3	Equipo de usuario	16
1.3.7.4	Interfaz aire	17
1.3.7.5	Nodo B evolucionado (eNodeB, <i>Evolved NodeB</i>).....	18
1.3.7.6	Evolved Packet Core (EPC)	18
1.3.8	Aspectos de planificación de la red.....	20
1.3.8.1	Red de frecuencia única.....	20
1.3.9	Software de simulación ATOLL [20].....	21
1.3.10	Definiciones comunes a emplearse.....	22
1.3.10.1	Antena	22
1.3.10.2	Rango de frecuencias	22
1.3.10.3	Polarización	22
1.3.10.4	Inclinación eléctrica.....	22
1.3.10.5	Anchura del haz	23
2	METODOLOGÍA.....	24
2.1	Recursos para obtención y análisis de datos en la red GSM 1900 actual	24
2.1.1	Área de interés (Parroquia de Sangolquí).....	24
2.1.2	Recolección de datos de una red celular GSM 1900 desplegada en área de interés.....	25
2.1.2.1	Equipo de medición.....	26
2.1.2.2	Configuración de tarea.	26
2.1.2.3	Ruta de evaluación.....	27
2.1.3	Presentación de datos recolectados	27
2.1.3.1	SwissQualNetQual NQDI.....	28
2.1.3.2	Mapinfo profesional	28
2.1.3.3	Google Earth	30
2.2	Diseño de red LTE	30
2.2.1	Dimensionamiento de red LTE	31
2.2.1.1	Inserción (participación de mercado) de un operador celular.....	31
2.2.1.2	Usuarios a los que se ofrecerá el servicio.....	32
2.2.1.3	Modelo de tráfico a usar.	33
2.2.2	Banda de frecuencias a reusar.	38
2.2.3	Equipos de radio a emplear	39
2.2.3.1	Unidad de Radio Remota	39
2.2.3.2	Antena	39

2.2.3.3	Cables y conectores	40
2.3	Planificación de red LTE en ATOLL	41
2.3.1	Creación del nuevo proyecto	42
2.3.2	Configuración de parámetros de red.....	43
2.3.2.1	Parámetros de tráfico	43
2.3.2.3.	Ajuste de red de radio.	45
2.3.2.4	Banda de frecuencia	47
2.3.3	Equipos de red de radio.....	48
2.3.3.1	Antenas	48
2.3.3.2	Añadir elementos de red.....	49
2.3.3.3	Configuración de elementos de red	50
2.3.3.4	Configuración de celdas.	51
2.3.3.5	Predicción de cobertura a nivel de señal	55
3	PRUEBAS Y RESULTADOS	56
3.1	Pruebas de drive test realizado a la red GSM 1900	56
3.1.1	Tecnología a evaluar	57
3.1.2	Niveles de cobertura (RxLev)	57
3.1.3	Esquema de Modulación y Codificación (MCS).	59
3.1.4	Tasa de datos efectiva (Throughput)	60
3.1.5	Distribución de servidores (BCCH).	61
3.2	Simulación de la red GSM 1900 actual en ATOLL	62
3.2.1	Niveles de cobertura (RxLev)	62
3.2.2	Esquema de Modulación y Codificación (MCS)	63
3.2.3	Tasa de datos efectiva (Throughput)	64
3.2.4	Distribución de servidores (BCCH)	65
3.3	Comparación de resultados entre el drive test y las simulaciones de la red GSM 1900	66
3.3.1	Cobertura (RxLev)	66
3.3.2	Tasa de datos efectiva (Throughput)	67
3.4	Simulaciones obtenidas en el diseño de la red LTE	69
3.4.1	Niveles de cobertura (RSRP).....	69
3.4.2	Calidad de señal (C/(I+N))	70
3.4.3	Tasa de datos efectiva (Throughput)	71
3.4.4	Distribución de sectores (PCI)	72

3.5	Comparación entre la simulación de la nueva red LTE y el drive test GSM 1900.....	73
3.5.1	Nivel de señal (RSRP).....	73
3.5.2	Rendimiento de la red (Throughput)	74
3.6	Análisis del efecto de eliminar una portadora GSM 1900.	75
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
4.1	Conclusiones	77
4.2	Recomendaciones	78
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	79
6.	ANEXOS.....	83
	ORDEN DE EMPASTADO.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Límites del cantón Rumiñahui y la parroquia de Sangolquí [9]	5
Figura 1.2 Imagen satelital de la parroquia de Sangolquí [12]	6
Figura 1.3 Evolución de las redes de telefonía móvil celular [13]	6
Figura 1.4 Rango de frecuencias para la banda primaria en GSM [15]	8
Figura 1.5 Arquitectura GSM.....	9
Figura 1.6 BSC Nokia modelo BSC3i [16]	10
Figura 1.7 Conexión en un sistema de conmutación de circuitos	11
Figura 1.8 Transmisión de datos en base a conmutación de paquetes [15]	12
Figura 1.9 Modulación GMSK (GSM, GPRS) y 8 PSK (EDGE) [15]	13
Figura 1.10 Comparativa entre las velocidades de transmisión de las tecnologías GSM, GPRS y, EDGE [15]	14
Figura 1.11 Arquitectura LTE [15].....	16
Figura 1.12 Subportadoras en LTE [18].....	17
Figura 1.13 Elementos E-UTRAN [18].....	18
Figura 1.14 Elementos dentro del EPC [19]	19
Figura 1.15 Interfaz de ATOLL [21]	21
Figura 1.16 Efecto de disminuir la inclinación eléctrica en una antena [24]	23
Figura 1.17 Ancho del haz, horizontal (azul) y vertical (rojo) para un rango de frecuencias de 790 – 960 MHz [26]	23
Figura 2.1 Toma satelital de la parroquia de Sangolquí, el polígono de color rojo indica el área de interés.....	25
Figura 2.2 Imagen de aplicación SwissqualQualipocAndroid en móvil Samsung S5.....	26
Figura 2.3 Configuración de tarea de descarga de un archivo HTTP	26
Figura 2.4 Ruta sugerida para realizar pruebas de datos en la parroquia de Sangolquí	27
Figura 2.5 Imagen de la información de throughput obtenida después de procesar uno de los logs de las pruebas realizadas en el drive test.	28
Figura 2.6 Imagen de servidores radiando en la parroquia de Sangolquí.	29
Figura 2.7 Imagen de los niveles de <i>RxLev</i> de la red GSM 1900 encontrados en la parroquia de Sangolquí exportado desde Mapinfo a Google Earth.....	30
Figura 2.8 Imagen de la configuración del Operador 1.	32

Figura 2.9 Cable de Radio Frecuencia [33].	40
Figura 2.12 Conector para cable coaxial.	41
Figura 2.13 Adaptación de diagrama de flujo recomendado por ATOLL [34].	41
Figura 2.14 Creación de un nuevo proyecto.	42
Figura 2.15 Información topográfica	43
Figura 2.16 Propiedades de servicio de Web.	44
Figura 2.17 Plantilla de estación pre-configurada	49
Figura 2.18 Ubicación de e-NodeB en área de interés.	49
Figura 2.19 División de entornos de la parroquia de Sangolquí.	55
Figura 3.1 Tecnología evaluada GSM 1900	57
Figura 3.2 Niveles de cobertura (<i>RxLev</i>).	58
Figura 3.3 Esquema de Modulación y Codificación (<i>MCS</i>)	59
Figura 3.4 Tasa de datos efectiva (<i>Throughput</i>).	60
Figura 3.5 Distribución de servidores (<i>BCCH</i>).	61
Figura 3.6 Simulación de los niveles de cobertura (<i>RxLev</i>).	62
Figura 3.7 Estadísticas de niveles de cobertura (<i>RxLev</i>).	63
Figura 3.8 Simulación de esquema de modulación (<i>MCS</i>).	63
Figura 3.9 Estadísticas de esquema de codificación de modulación.	64
Figura 3.10 Simulación de tasa de datos efectiva (<i>throughput</i>)	64
Figura 3.11 Estadísticas de tasa de datos efectiva (<i>throughput</i>).	65
Figura 3.12 Simulación de la distribución de servidores (<i>BCCH</i>).	65
Figura 3.13 Análisis de cobertura entre drive test realizado y simulación en ATOLL.	66
Figura 3.14 Comparación entre rangos de <i>RxLev</i> .	67
Figura 3.15 Análisis de rendimiento entre drive test realizado y simulación en ATOLL.	68
Figura 3.16 Comparación entre rangos de <i>throughput</i> .	68
Figura 3.17 Simulación de <i>RSRP</i> para la nueva red LTE.	69
Figura 3.18 Estadísticas de niveles de cobertura (<i>RSRP</i>).	70
Figura 3.19 Simulación de la calidad de señal ($C/(I+N)$).	70
Figura 3.20 Estadísticas de calidad de señal ($C/(I+N)$).	71
Figura 3.21 Simulación de la tasa de datos efectiva (<i>throughput</i>).	71
Figura 3.22 Estadísticas de la tasa de datos efectiva (<i>throughput</i>).	72

Figura 3.23 Distribución de sectores (PCI).	72
Figura 3.24 Comparación entre cobertura GSM 1900 y LTE 1900	73
Figura 3.25 Comparación entre throughput GSM 1900 y LTE 1900	74
Figura 3.26 Líneas activas por tecnología.	75
Figura 3.27 Porcentajes de usuarios de operador celular.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Velocidades máximas alcanzadas por tecnología [14]	7
Tabla 1.2	Bandas de operación en GSM [15]	8
Tabla 1.3	Esquemas de modulación y codificación (MCS) en EDGE [15].....	14
Tabla 1.4	Categoría de los dispositivos móviles LTE [17]	16
Tabla 1.5	Parámetros del enlace descendente de LTE [18].....	18
Tabla 2.1	Penetración de operadores celulares en el país [29].....	31
Tabla 2.2	Modelo de tráfico de servicio descendente [30].....	33
Tabla 2.3	Modelo de tráfico de servicio ascendente [30]	33
Tabla 2.4	Modelo de tráfico de servicios para ambiente Urbano Denso [30].....	34
Tabla 2.5	Volumen de datos por sesión.....	35
Tabla 2.6	Throughput por usuario.....	36
Tabla 2.7	Porcentajes de la relación pico – por entorno social [30].....	36
Tabla 2.8	Tabla de throughput en función del SINR [30].....	37
Tabla 2.9	Configuración de radio de sector LTE.....	37
Tabla 2.10	Resultados obtenidos de la simulación de sector LTE.....	37
Tabla 2.11	Banda de frecuencia a reusar.....	39
Tabla 2.12	Características de Unidad de Radio Remoto a usar [31].....	39
Tabla 2.13	Características de antena celular [32]	40
Tabla 2.14	Tabla de atenuación en función de la frecuencia de operación [33].....	40
Tabla 2.15	Tabla de usuario estándar	44
Tabla 2.16	Tabla de usuario de negocios.....	45
Tabla 2.17	Parámetros a configurar en plantilla de estación.....	46
Tabla 2.18	Configuración de banda de frecuencia a usar.....	48
Tabla 2.19	Antena HBXX-6516.....	48
Tabla 2.20	Parámetros de Radio Frecuencia.....	50
Tabla 2.21	Asignación de PCI por celda parte1.....	51
Tabla 2.22	Asignación de PCI por celda parte 2.....	52
Tabla 2.23	Modelo de tráfico basado en tráfico de transmisor y tráfico de servicios para el enlace ascendente (UL).....	53
Tabla 2.24	Modelo de tráfico basado en tráfico de transmisor y tráfico de servicios para el enlace descendente (DL).....	54
Tabla 2.25	Temáticos a utilizar en la presentación de las simulaciones	55

Tabla 3.1 Cálculo del porcentaje de afectación al retirar del aire la red GSM 1900.

.....76

RESUMEN

El presente Trabajo de Titulación es una propuesta en la reutilización de frecuencias para una operadora celular con un reducido espectro de frecuencias, en la cual, se ha diseñado una red LTE con un ancho de banda de 5MHz. El objetivo de la presente, es implementar una segunda portadora LTE para la parroquia de Sangolquí, que permita incrementar la tasa de datos por parte de las operadoras telefónicas.

La estructura del trabajo se compone de cuatro secciones divididas de la siguiente manera: la primera sección muestra el marco teórico y se establecen los conceptos que intervienen en el diseño de una red GSM y LTE. Así también los conceptos de Radio Frecuencia necesarios para el desarrollo del presente Trabajo de Titulación.

La segunda sección describe los recursos necesarios para la realización (herramienta computacional para realizar pruebas de drive test) y proceso de obtención de resultados (herramientas computacionales para procesar información obtenida durante la evaluación en campo) obtenidos producto de la realización de un drive test en la Parroquia de Sangolquí, para determinar la tasa de datos real que reciben los usuarios de un operador celular través de la red GSM 1900. Luego se presentan los pasos para realizar el diseño de una red LTE con ancho de banda 5MHz.

Continuando con la tercera sección que procede con la configuración de la herramienta computacional ATOLL para realizar la Planificación de Radio Frecuencia de la red LTE, donde se definen servicios a brindar, perfiles de usuario, potencias de transmisión, tipos de antenas, inclinación eléctrica de antenas, inclinación mecánica de antenas, banda de frecuencia entre otras.

Además, se obtendrá las simulaciones de la red LTE diseñada, así también, las simulaciones de la red GSM 1900 existente, para luego realizar las respectivas comparaciones entre los resultados obtenidos del drive test y las simulaciones GSM. Asimismo, se realiza la comparación entre los resultados obtenidos en el drive test realizado y los resultados obtenidos en las simulaciones de la red LTE.

Finalizando con la última sección donde se presentarán las conclusiones y recomendaciones del presente estudio.

Palabras claves: Red, GSM, LTE, ATOLL, Drive test, Radio Frecuencia.

ABSTRACT

The present Degree Work is a proposal in the reuse of frequencies for a cellular operator with a reduced frequency spectrum, in which, an LTE network with a bandwidth of 5MHz has been designed. The objective of this is to implement a second LTE operator for the parish of Sangolquí, which allows increasing the data service by telephone operators.

The structure of the work is composed of four sections divided as follows: the first section shows the theoretical framework and establishes the concepts involved in the design of a GSM and LTE network. Also the Radio Frequency concepts necessary for the development of the present Titration Work.

The second section describes the necessary resources for the realization (computational tool to carry out test drive tests) and the process of obtaining results (Computational tools to process information obtained during the field evaluation) obtained as a result of a drive test in Sangolquí Parish, to determine the actual data rate received by users of a cellular operator through the GSM 1900 network. Then, the steps to design an LTE network with 5MHz bandwidth are presented.

Continuing with the third section that proceeds with the configuration of the ATOLL computational tool to perform the Radio Frequency Planning of the LTE network, where services to be provided are defined, user profiles, transmission powers, types of antennas, electrical antenna tilt, mechanical inclination of antennas, and frequency band among others.

In addition, simulations of the designed LTE network will be obtained, as well as the simulations of the existing GSM 1900 network, to then make the respective comparisons between the results obtained from the drive test and the GSM simulations. Likewise, a comparison is made between the results obtained in the drive test performed and the results obtained in the simulations of the LTE network.

Finalizing with the last section where the conclusions and recommendations of the present study will be presented.

KEYWORDS:

Network, GSM, LTE, ATOLL, Drive test, Radio Frequency.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de las redes celulares ha incentivado el uso de dispositivos móviles en la sociedad actual. Según el resumen ejecutivo del Observatorio Móvil de América Latina [1], para el 2011, el acceso a internet móvil mediante la banda ancha móvil, superó a la banda ancha fija tradicional como primera forma de acceder al internet en América Latina, Otra manera de observar estos cambios es mediante la penetración de la telefonía móvil a nivel mundial, con un 17%, en el 2003, a un 47% para el (2008) y, se estima que para el año 2020 alcance el 56% de penetración móvil [2].

El sistema móvil celular tiene un impacto directo en la generación de empleos. Su contribución en el año 2013 fue de 10.5 millones de empleos y se estima que para el año 2020 su incremento ascenderá a 15.4 millones a nivel mundial. América Latina también sigue los pasos de la tendencia mundial, siendo así que en el año 2015 los servicios móviles generaron el 5% del PIB, esto representaría un aporte de 250 mil millones de dólares y para el año 2020 se prevé que se recaudará 315 mil millones de dólares lo cual significaría un incremento en el PIB del 5.5% [3].

Además, esta nueva evolución de las redes móviles ha permitido que empresas nacientes (*start-ups*) y empresas multinacionales hagan uso de los sistemas móviles celulares para vender sus productos mediante aplicativos diseñados para terminales móviles [3]. Por ejemplo, la cadena FOX hoy promociona su aplicativo para móviles *App&TV*.

Todo esto no podía ser posible sin la evolución de la red móvil celular hacia 4G, siendo sus principales características una alta velocidad (1 Gbps, en escenarios controlados) comparada con su antecesor 3G y su baja latencia, lo que hace de esta nueva red el mejor aliado para las empresas que desean llegar a una gran cantidad de usuarios.

Al igual que las tecnologías anteriores en sus inicios, 4G se encuentra en su etapa de expansión, siendo así que para el año 2016 se tenía una cobertura del 60% de la población y para el año 2017 se espera una cobertura del 80% de la población en América Latina [3].

Según el Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información del Ecuador 2016-2021 emitido por el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, la meta para el año 2021 es contar con una cobertura 4G del 80% a nivel nacional, tomando como referencia un punto de partida del 32% en el año 2014 [4].

Actualmente en el país, se tiene asignado a cada operadora (OTECEL, CNT, CONECEL) un rango del espectro para su funcionamiento, el mismo que debe ser usado de manera adecuada conforme al Plan Nacional de Telecomunicaciones.

Por lo anteriormente citado, y para ayudar a dar cumplimiento a la meta propuesta en el Plan Nacional de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información, se propone el diseño de una segunda portadora en la tecnología 4G mediante el uso del espectro de frecuencias de la Banda B de 1900MHz, que actualmente brinda el servicio de voz y datos en la tecnología GSM 1900.

El trabajo de titulación utilizará el software computacional ATOLL, este programa permite realizar predicciones sobre algunos eventos o escenarios que se pueden encontrar en el diseño de una red LTE, por ejemplo: la cobertura en una zona determinada y la capacidad entregada por el sistema en su conjunto. Este programa usa parámetros de radiofrecuencia como pérdidas en los cables, ganancias de las antenas, potencia de transmisor, entre otros, para realizar sus predicciones. La zona contemplada para realizar el diseño es la parroquia de Sangolquí del cantón Rumiñahui.

1.1 Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de titulación es: realizar un estudio para la reutilización de frecuencias usadas por la tecnología GSM 1900 (banda B), para la implementación de una segunda portadora LTE para la parroquia de Sangolquí.

Los objetivos específicos de este Trabajo de titulación son:

- Realizar una revisión de los conceptos de la tecnología GSM y LTE, enfocados al servicio de datos.
- Determinar la tasa de datos que actualmente entrega un operador celular a través de la tecnología GSM (EDGE), mediante pruebas de Drive Test y simulaciones.
- Realizar la planificación de Radiofrecuencia para la segunda portadora LTE en el área de estudio.
- A partir de simulaciones determinar la tasa de datos LTE que se ofrecerá utilizando la segunda portadora.
- Comparar los resultados obtenidos del drive test de datos GSM, simulaciones de capacidad obtenidas en simulaciones GSM y simulaciones de capacidad ofrecidas por una segunda portadora en LTE.

1.2 Alcance

Se dimensionará la capacidad de la banda B, para ser usada por una red LTE con un ancho de banda de 5MHz, que actualmente es utilizado por la red GSM.

A partir de la información estadística disponible, ver [5], se analizará el impacto de eliminar la portadora de 1900MHz en la red GSM para ofrecer datos a través de una segunda portadora LTE.

Se realizará la planificación de Radiofrecuencia (Azimuth, EDT, MDT, PCI, etc) de una red LTE con ancho de banda de 5MHz propuesta según el dimensionamiento de capacidad anteriormente indicado.

Mediante la utilización del software de planificación ATOLL, se presentarán las simulaciones de cobertura y capacidad de la red LTE planificada; así como también las simulaciones correspondientes a la red a la red GSM 1900 que se pretende reusar.

Se realizarán pruebas de drive test para determinar la tasa real de datos que ofrece la red GSM 1900 actualmente.

Finalmente, se realizará una comparación entre la cobertura, calidad y capacidad de la red LTE propuesta y la red GSM que se pretende reemplazar.

1.3 Marco Teórico

En el marco teórico, se describirán los conceptos más importantes que serán tratados a lo largo del desarrollo del trabajo de titulación. A continuación, se presenta los temas a tratar:

- Estudios previos.
- Ubicación geográfica de la parroquia de Sangolquí.
- Breve reseña de las comunicaciones celulares.
- Servicio de datos en GSM, GPRS y EDGE.
- Servicio de datos en LTE.
- Software de simulación ATOLL.

1.3.1 Estudios previos

Los estudios previos permiten consolidar ideas con respecto al trabajo de titulación actual que se está tratando, por cuanto mediante estos estudios se consiguen similitudes y diferencias que fortalecerán al desarrollo del trabajo de titulación a presentar. A continuación, se presentan tres casos de estudios los cuales servirán como un referente para este trabajo de titulación técnico:

Para el primer estudio referente, según [6], se tiene como similitud la planificación y el diseño de la ampliación de la cobertura de una red celular, este estudio se enfoca en la tecnología GSM; la diferencia entre el estudio citado y el presente trabajo radica en la tecnología en la cual se va a realizar la planificación y diseño de la cobertura de la red celular, en este trabajo de titulación se realizará para la tecnología LTE.

En cuanto a [7], se realiza el cálculo para determinar la capacidad aproximada de una portadora LTE teórica y experimentalmente, siendo el cálculo de la capacidad de una portadora LTE la similitud con el presente trabajo de titulación; la diferencia con este estudio se encuentra principalmente en la portadora a diseñar el proyecto, por cuanto en el proyecto se trabajará con una portadora comercial y no experimental.

Por último, en lo que respecta a [8], se definen cambios físicos y lógicos para optimizar un cluster en la ciudad de Quito D. M, en el presente trabajo se presentará la planificación de Radio Frecuencia, donde se definirán parámetros físicos (alturas de las antenas, inclinación mecánica de una antena, inclinación eléctrica de un antena etc.) con los cuales podría implementarse (si alguna operadora consideraría necesario).

1.3.2 Parroquia de Sangolquí

El escenario para el cual se diseñará el presente trabajo de titulación, será la parroquia de Sangolquí, su ubicación se detalla a continuación [9]:

- País: Ecuador
- Provincia: Pichincha
- Cantón: Rumiñahui

La parroquia de Sangolquí se encuentra dentro del cantón Rumiñahui, siendo esta parroquia la cabecera cantonal. Los límites del cantón Rumiñahui son los siguientes [6]:

- Norte: D. M Quito
- Sur: Cantón Mejía

- Este: D. M Quito
- Oeste: D. M Quito y cantón Mejía

La parroquia de Sangolquí tiene un área de 57.5 Km² y se encuentra a 2800 metros sobre el nivel del mar [9]; en la Figura 1.1 se muestran los límites del cantón Rumiñahui y la parroquia de Sangolquí.

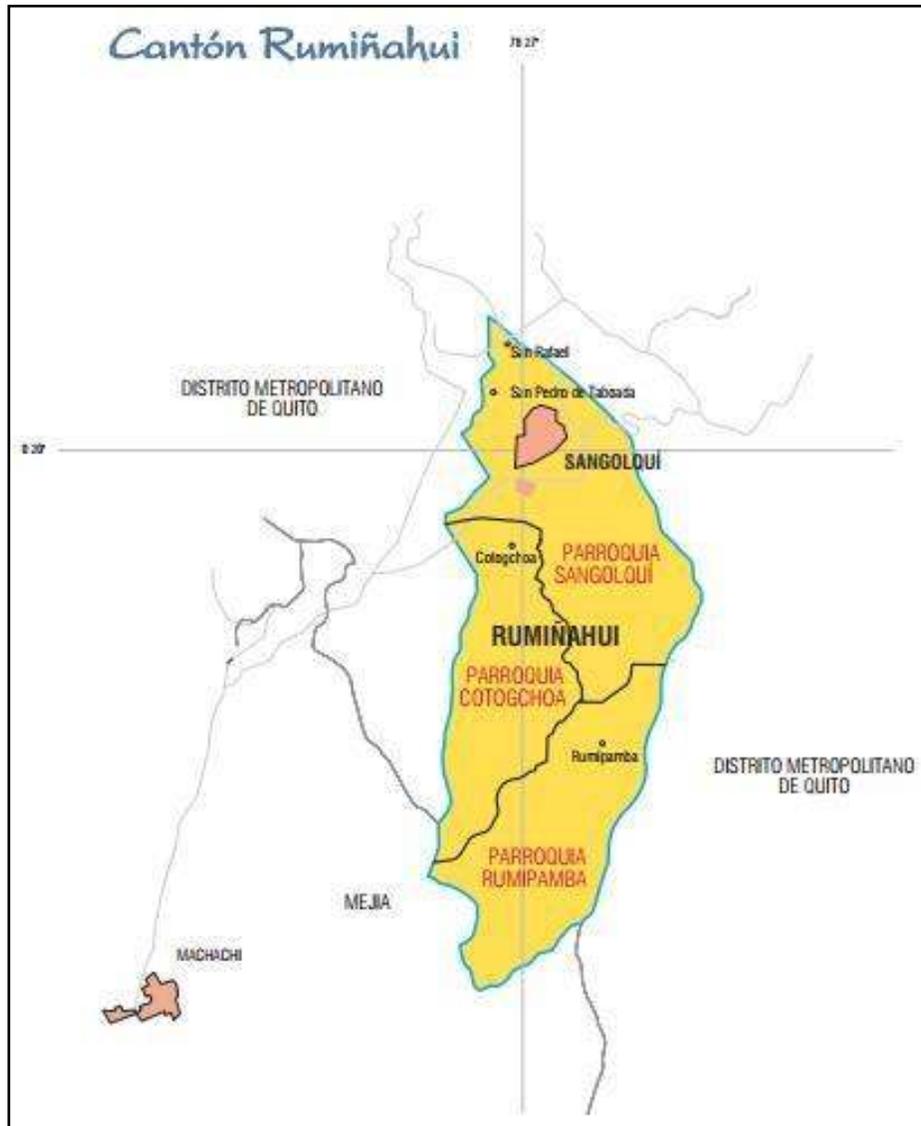


Figura 1.1 Límites del cantón Rumiñahui y la parroquia de Sangolquí [9]

La población del cantón Rumiñahui según el censo realizado en el año 2010 por parte del Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (INEC) dio un total de 85.852 habitantes [10]. Por otro lado el INEC proyecta para el año 2017 una población de 107.043 habitantes y para el 2020 se tendría una población de 115.433 habitantes [11]. En la Figura 1.2 se

presenta la imagen satelital de la parroquia de Sangolquí. Como se puede observar la parroquia de Sangolquí se encuentra en una zona urbana.



Figura 1.2 Imagen satelital de la parroquia de Sangolquí [12]

1.3.3 Breve reseña de las comunicaciones celulares

Las redes de telefonía móvil han sufrido grandes cambios desde sus inicios, asimismo esta evolución se ve plasmada en las capacidades que actualmente entregan estas redes. En la Figura 1.3, se presenta en forma breve la evolución de la telefonía móvil celular.

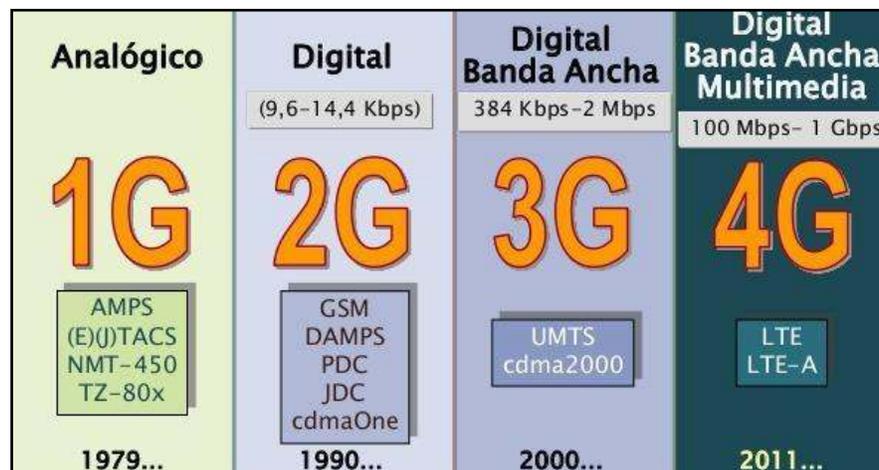


Figura 1.3 Evolución de las redes de telefonía móvil celular [13]

Por otro lado, la comunicación mediante las redes de telefonía celular empezó haciendo uso de técnicas totalmente analógicas, en la actualidad estos sistemas son completamente digitales. Esto permite que las velocidades de transmisión de datos también se incrementen; sin embargo, esto tiene un costo, el cual es el ancho de banda

utilizado. En la Tabla 1.1, se presentan las velocidades máximas alcanzadas y el ancho de banda necesario para brindar los diferentes tipos de tecnologías.

Tabla 1.1 Velocidades máximas alcanzadas por tecnología [14]

Fecha	Sistema	Máxima velocidad de datos	Ancho de banda	Reuso de frecuencias	Máxima eficiencia espectral	Eficiencia normalizada
1985	AMPS	9.6Kbps	30KHz	7 / 21	0.015	1
1992	GSM	9.6-14,4Kbps	200KHz	4 / 12	0.032-0.048	2.1-3.2
1997	GPRS	171Kbps	200KHz	4/ 12	0.07	4.7
2000	EDGE	474Kbps	200KHz	4 / 12	0.2	13.3
2003	W-CDMA	2Mbps	5MHz	1	0.4	26.6
2006	HSDPA	14Mbps	5MHz	1	2.8	187
2009	HSDPA+	42Mbps	5MHz	1	8.4	560
	64 QAM & MIMO					
2011	LTE	100Mbps	20MHz	1	5	333
2012	LTE MIMO 2x2	172.8Mbps	20MHz	1	8.6	576
2013	LTE MIMO4x4	326.4Mbps	20MHz	1	16.3	1087
2015	IMT-AVANZADO	1Gbps	100MHz	1	10	667

Finalmente, al comparar los sistemas GSM y LTE es notable la diferencia entre las velocidades de transmisión alcanzadas por cada una de estas tecnologías; no obstante, en la actualidad aún se utiliza a GSM en una forma amplia por algunos operadores de telefonía móvil por la cobertura que esta red alcanzó en zonas rurales para brindar el servicio de voz.

1.3.4 Sistema GSM [15]

A principios de los años 90's aparecen los Sistemas Globales para Comunicaciones Móviles (GSM, *Global Systemfor Mobile Communications*). Este sistema nace para incrementar la capacidad de usuarios que soportaban los sistemas celulares anteriores, esto hizo que GSM se vuelva la nueva tecnología celular predominante a nivel mundial.

En la actualidad GSM cuenta con cuatro bandas de operación, la primera banda asignada a este sistema se la denominó banda primaria (operando en los 900 MHz), posteriormente se asignaron las siguientes tres bandas de operación, previo a las tres bandas existió una extensión para la banda primaria a la cual se la llamó GSM 900 *extended* o GSM 900 extendida. A continuación, en la Tabla 1.2 se presentan las bandas de operación presentes en GSM.

Tabla 1.2 Bandas de operación en GSM [15]

Bandas	ARFCN	Enlace de subida	Enlace de bajada (MHz)
GSM 900 (primaria)	0-124	890-915	935-960
GSM 900 (extendida)	975-1023, 0-124	880-915	925-960
GSM 1800	512-885	1710-1785	1805-1880
GSM 1900 (Norte América)	512-810	1850-1910	1930-1990
GSM 850 (Norte América)	128-251	824-849	869-894

GSM, divide el ancho de banda asignado en canales de 200 kHz cada uno y el canal de subida se encuentra separado 45 MHz de su correspondiente canal de bajada, a este proceso de asignación de un par de canales se ha denominado el ARFCN¹. Por ejemplo, la banda primaria tiene un ancho de banda de 25 MHz en cualquiera de los dos enlaces y al dividir para los 200 kHz de cada canal, se tendrá un total de 125 canales en cada sentido. En la Figura 1.4, se presenta este ejemplo de asignación de frecuencias para la banda primaria.

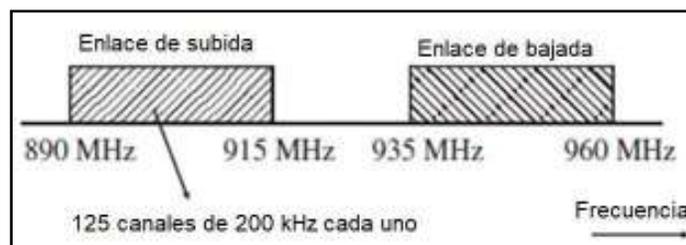


Figura 1.4 Rango de frecuencias para la banda primaria en GSM [15]

GSM al igual que otros sistemas está soportado o estructurado mediante una arquitectura. A continuación, se presenta en forma breve la arquitectura en GSM.

1.3.4.1 Arquitectura GSM [15]

El uso eficiente del espectro asignado en los sistemas de comunicaciones móviles ha sido un gran reto a resolver para los operadores móviles. Con la finalidad de solucionar estos inconvenientes, se crea una estructura mediante la cual se llevaría a cabo los servicios que las operadoras podrían brindar, a esta estructura se la denomina arquitectura GSM. A continuación, en la Figura 1.5 se presenta la arquitectura GSM simplificada.

¹Absolute Radio Frequency Channel Number o Números de Canales de Radio Frecuencia Absoluto (ARFCN): este parámetro denota un par de canales tanto al enlace de subida como de bajada, los cuales se encuentran separados 45 MHz.

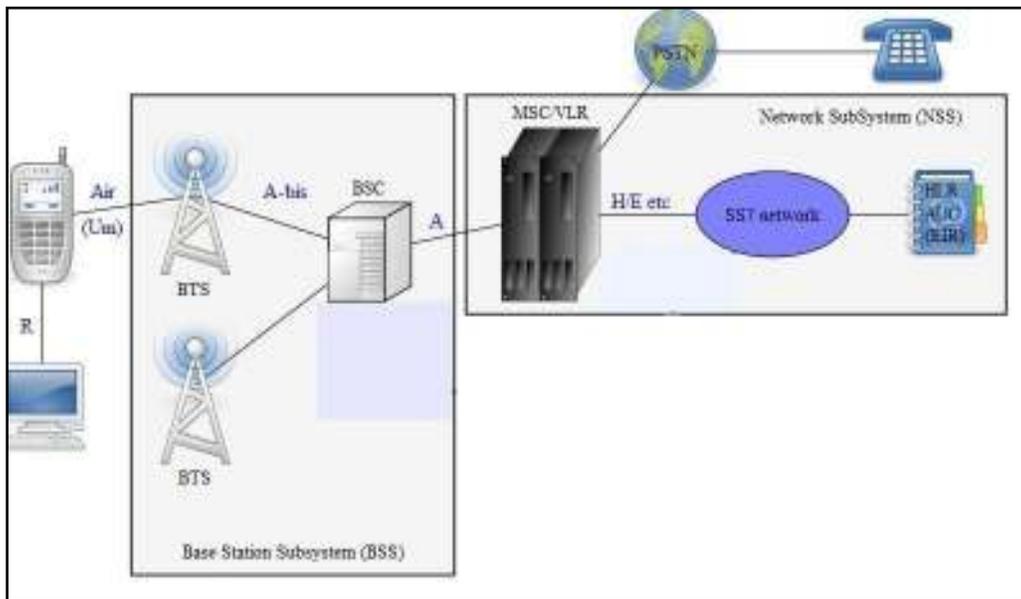


Figura 1.5 Arquitectura GSM

En GSM se encuentran dos componentes esenciales, los cuales son:

- Suscriptores móviles
- Infraestructura instalada fija

A su vez, la infraestructura instalada fija se divide en tres subsistemas que son:

- Subsistema de estación base (BSS, *Base StationSubsystem*)
- Subsistema de red (NSS, *Network Subsystem*)
- Subsistema de red inteligente (IN, *Intelligent Network Subsystem*)

1.3.4.2 Subsistema de estación base (BSS, *Base StationSubsystem*) [15]

Este subsistema también es denominado red de radio, contiene todas las BTSs y funcionalidades que son necesarias para conectar de forma inalámbrica a los suscriptores con las BTSs. El BSS consta de dos componentes importantes como son:

- Estación base de transceptores (BTS, *Base TransceiverStation*)
- Estación base controladora (BSC, *Base StationControler*).

1.3.4.2.1 Estación base de transceptores (BTS)

La BTS está compuesta por arreglos de antenas dispuestas de tal manera que consigan una máxima cobertura en la zona asignada y también brindar los servicios ofrecidos por la red GSM.

1.3.4.2.2 Estación base controladora (BSC)

Es la encargada del establecimiento, mantenimiento y liberación de todas las conexiones que realicen las BTS conectadas a ella, la BSC es la encargada de asignar los recursos de radio en la red. En la Figura 1.6 se muestra un modelo de BSC marca Nokia.



Figura 1.6 BSC Nokia modelo BSC3i [16]

1.3.4.3 Subsistema de red (NSS, *Network Subsystem*) [15]

Dentro de las responsabilidades más importantes del NSS son el establecimiento de las llamadas, control de las llamadas y llamadas entre diferentes centros de conmutación fijos y móviles y otras operadoras, a continuación, se describirán tres elementos dentro del NSS.

1.3.4.3.1 Centro de conmutación móvil (MSC)

Es el elemento central dentro de la red de comunicación, todas las conexiones entre los abonados en gestionada por el MSC.

1.3.4.3.2 Registro de la ubicación del visitante (VLR)

Este equipo viene siempre junto con el MSC, los datos que almacenan los VLRs son una copia de los datos originales que se encuentran en el HLR, esto con el objetivo de reducir la señalización entre el MSC y el HLR.

1.3.4.3.3 Registro de la ubicación del usuario (HLR)

El HLR es la base de datos de suscriptores de una red GSM, este contiene un registro para cada abonado y, contiene la información sobre los servicios disponibles individualmente.

1.3.4.4 Subsistema de red inteligente (INS) [15]

Una de las funcionalidades más importantes dentro de la INS en telefonía móvil es el servicio de prepago, que permite a los abonados financiar sus cuentas con cierta cantidad de dinero que luego se puede utilizar para servicios de red como llamadas telefónicas, SMS y, los servicios de datos.

1.3.5 Sistema GPRS [15]

El servicio general de paquetes vía radio (GPRS, *General Packet Radio Service*), es un avance de la tecnología de la red móvil para mejorar la red GSM. Esto debido a que los recursos para una sesión de voz o datos se configuran al principio de la llamada y están reservados para el usuario hasta el final de la llamada, como se puede observar en la Figura 1.7.

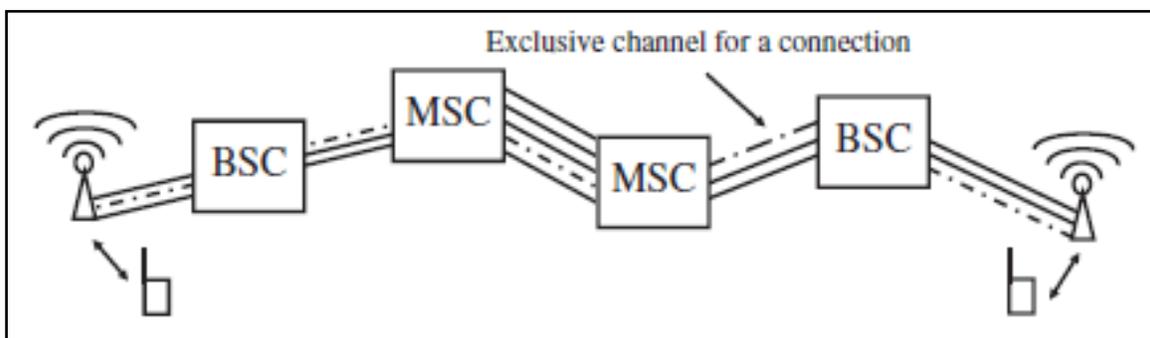


Figura 1.7 Conexión en un sistema de conmutación de circuitos

Con esto, todos los recursos dedicados aseguran un ancho de banda y tiempo de retardo de extremo a extremo. Por otro lado, esto también tiene varias ventajas para el suscriptor [15], por citar dos ejemplos:

- Los datos que se envían no necesitan contener ninguna información de señalización, por ejemplo información sobre el destino. Estos datos simplemente pasan a través del canal establecido al receptor.
- El canal de conmutación de circuitos tiene un ancho de banda constante, el emisor no tiene que preocuparse por un cuello de botella permanente o temporal en el camino de la comunicación.

No obstante, una desventaja de las conexiones conmutadas por circuito es el tiempo de retardo constante. Este retardo corresponde al tiempo entre enviar y recibir la información extremo a extremo. Cuanto mayor sea la distancia entre el emisor y receptor, mayor será el tiempo de retardo.

Por otro lado, para aplicaciones donde los datos son enviados a ráfagas sería mejor solicitar recursos para enviar y recibir datos y posteriormente a esto liberarlos de nuevo luego de terminada la transmisión, como se muestra en la Figura 1.8. Este proceso puede realizarse al recopilar los datos en paquetes antes de ser enviados a través de la red.

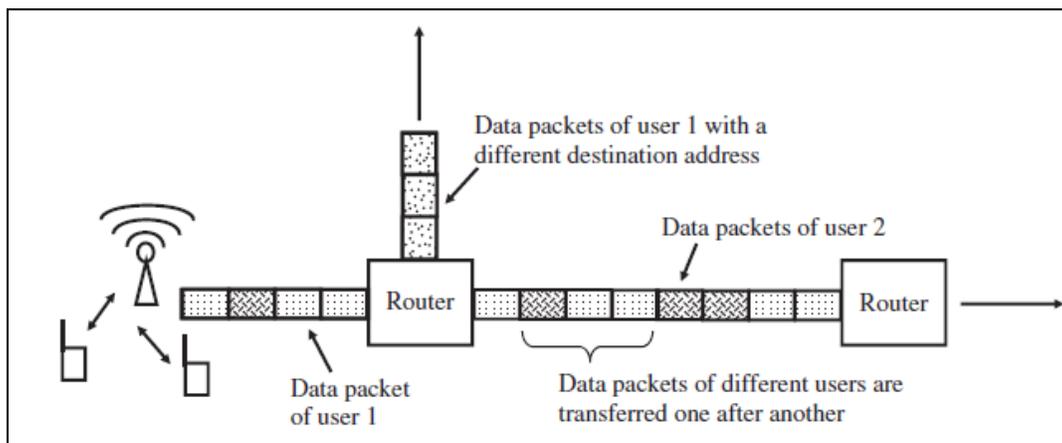


Figura 1.8 Transmisión de datos en base a conmutación de paquetes [15]

Este método de envío de datos es conocido como "conmutación de paquetes". Al no existir una conexión lógica de extremo a extremo, cada paquete debe tener un encabezado. El encabezado, por ejemplo, contiene información sobre el remitente (dirección de origen) y el receptor (dirección de destino) del paquete. Esta información se utiliza en la red para los paquetes a través de los diferentes elementos dentro de la misma. En Internet, por ejemplo, las direcciones IP contienen la información de la fuente y el destino, es decir, del remitente y del receptor [15].

Cabe mencionar que los paquetes IP también pueden utilizar una conexión de conmutación de circuitos como lo hace en GSM. Sin embargo, hasta que la información

llegara a Internet, el proveedor de servicios, los transmitiría en un canal de conmutación de circuitos, pero al realizar esto no se consiguen los beneficios proporcionados por la red GPRS.

1.3.6 Sistema EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)

Para incrementar la velocidad de los datos transmitidos, un nuevo esquema de modulación y codificación es introducido, esta nueva modulación utiliza 8 PSK(8 *Phase Shift Keying*). El nuevo esquema es la base para "tasa de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM" al cual se ha denominado EDGE. Mediante la modulación 8 PSK, EDGE consigue transmitir tres bits por símbolo. De esta manera, la transmisión de la información puede ser hasta tres veces más rápida en comparación con GSM y GPRS, debido a que estos sistemas utilizan la modulación GMSK, la cual solo permite transmitir un bit por símbolo. La Figura 1.9 presenta la diferencia entre la modulación GMSK y 8 PSK [15].

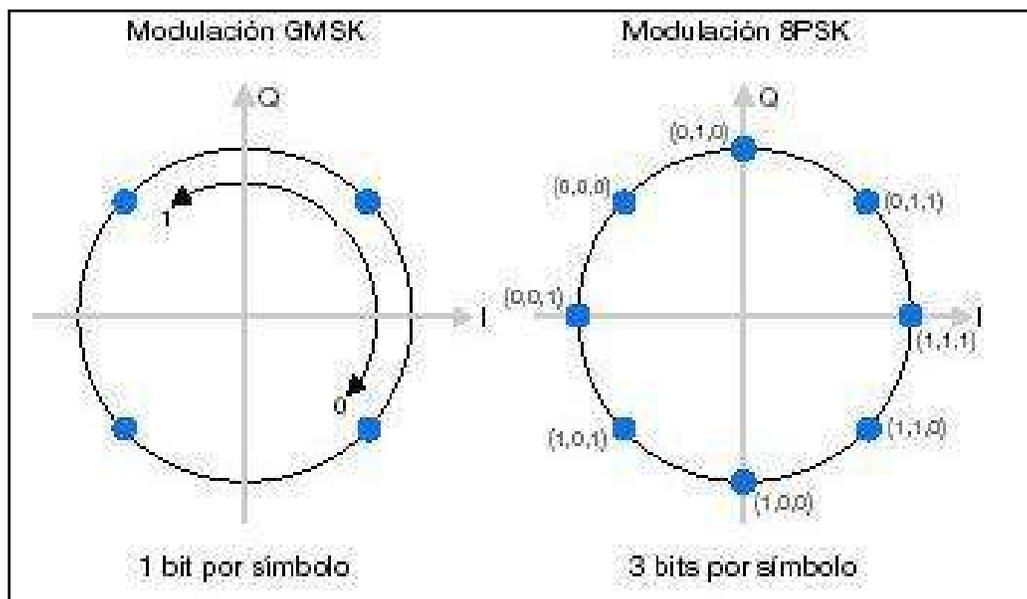


Figura 1.9 Modulación GMSK (GSM, GPRS) y 8 PSK (EDGE) [15]

Otra ventaja, se encuentra en comparar los nueve diferentes esquemas de modulación y codificación (MCS) usados por EDGE frente a los cuatro diferentes esquemas de codificación de GPRS, de este modo se tienen más opciones para elegir la mejor modulación y codificación para las diferentes condiciones del canal de radio [15].

En la Tabla 1.3 se presentan las modulaciones y codificaciones presentes en EDGE, de igual manera se tienen las velocidades por cada ranura de tiempo.

Tabla 1.3 Esquemas de modulación y codificación (MCS) en EDGE [15]

Modulación		Velocidad por ranura de tiempo (Kbits/s)	Tasa de codificación (bit de usuario por bit de corrección de errores?)	Tasa de codificación con una retransmisión
MCS-1	GSMK	8.8	0.53	0.26
MCS-2	GSMK	11.2	0.66	0.33
MSC-3	GSMK	14.8	0.85	0.42
MSC-4	GSMK	17.6	1	0.5
MSC-5	8PSK	22.4	0.37	0.19
MSC-6	8PSK	29.6	0.49	0.24
MSC-7	8PSK	44.8	0.76	0.38
MSC-8	8PSK	54.4	0.92	0.46
MSC-9	8PSK	59.2	1	0.5

El sistema EDGE puede alcanzar velocidades transmisión pico de 474 Kbps, con lo cual mejora notablemente las tasas de transmisión tanto de GSM como GPRS. Sin embargo, en la práctica se puede obtener velocidades promedio sobre los 270 Kbps [15].

1.3.6.1 Comparación entre tecnologías

Estas tres tecnologías fueron creadas para suplir las necesidades de su época, al crecer el número de abonados también lo hace la demanda por los servicios ofrecidos por las operadoras que prestan el servicio de telefonía móvil, especialmente lo concerniente al servicio de datos.

En la Figura 1.10 se presenta una comparativa entre las velocidades de transmisión brindadas por las tecnologías GSM, GPRS y EDGE, donde se puede apreciar una mejora sustancial en la velocidad de transmisión en el sistema EDGE.

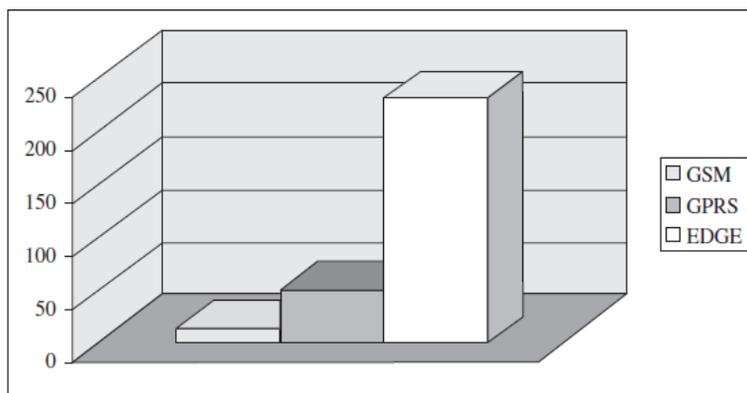


Figura 1.10 Comparativa entre las velocidades de transmisión de las tecnologías GSM, GPRS y, EDGE [15]

1.3.7 Sistema LTE

El sistema LTE (*Long Term Evolution*) nace con el propósito de brindar una mejor experiencia de usuario en la entrega de datos y, mejorar la eficiencia espectral². La tecnología previa a LTE fue *Evolved High Speed Packet Access*. (HSDPA+) la cual brindaba una velocidad de 42 Mbps (ver Tabla 1.1); con el despliegue de LTE se tiene una velocidad de 100 Mbps, en escenarios controlados.

LTE cuenta con varias características notables, esto ha permitido dar un paso más hacia la evolución de las redes telefónicas móviles. A continuación, se citan las características más relevantes de esta tecnología:

- Red basada totalmente en IP
- Mejora las velocidades de transmisión y, la eficiencia espectral
- Flexibilidad en el ancho de banda
- Bajo número de estados del terminal
- Arquitectura simplificada

Sin embargo, es pertinente acotar que LTE no es una tecnología 4G; a pesar de contar con características muy relevantes no encontradas en sus antecesoras LTE es una forma avanzada de la red 3G, es decir va más allá de una red 3G tradicional. La red 4G empieza en el estándar LTE-A (*LTE Advance*), la cual ya cumple con todos los requerimientos para esta nueva tecnología [15].

1.3.7.1 Arquitectura LTE

Una de las características de una red LTE es la baja latencia durante un proceso de conexión, de esta forma los contenidos solicitados por el usuario se entregan en menor tiempo. En la Figura 1.11 se presenta la arquitectura LTE donde se puede apreciar que es menos compleja en relación con sus antecesoras, por ejemplo la red GSM.

² Se define la eficiencia espectral como la cantidad de bits por segundo que se pueda transmitir en un ancho de banda determinado.

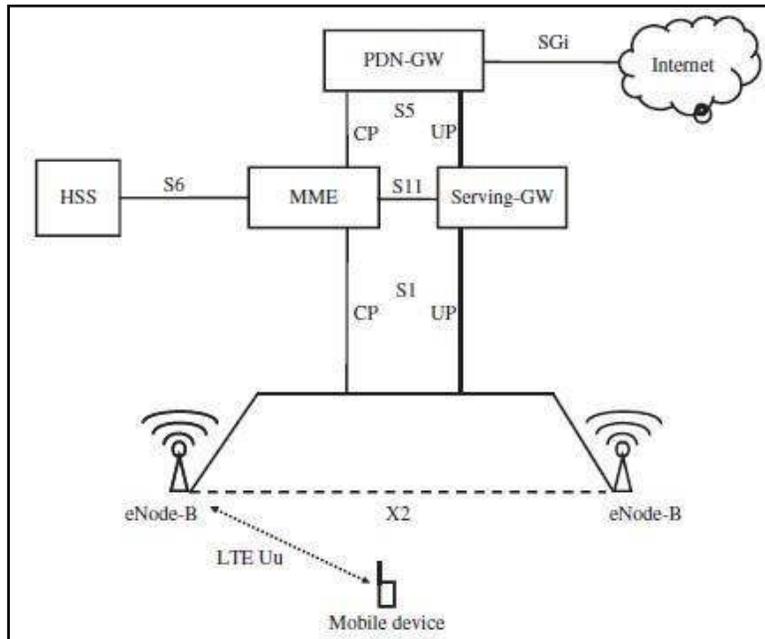


Figura 1.11 Arquitectura LTE [15]

En esta sección se revisarán los aspectos más importantes dentro de la arquitectura LTE, se comenzará desde la E-UTRAN hasta llegar al EPC (*Evolved Packet Core*) [15].

1.3.7.2 E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network)

La E-UTRAN se conforma de la interfaz aire y los eNode-B, a continuación se describirán de manera breve estos componentes. El equipo de usuario no es parte de la E-UTRAN, sin embargo se mencionarán aspectos generales sobre las características del mismo.

1.3.7.3 Equipo de usuario

Los equipos móviles se han establecido por categorías para su clasificación, en la Tabla 1.4 se enuncia las categorías de estos equipos y sus características.

Tabla 1.4 Categoría de los dispositivos móviles LTE [17]

Categoría	Enlace descendente				Enlace ascendente	
	Número máximo de bits recibidos por TTI	Número máximo de bits transportados por un DL-SCH en un TTI	Máximo número de antenas transmisoras en el caso de multiplexado espacial	Velocidad pico (Mbps)	Número máximo de bits recibidos por TTI	Velocidad pico (Mbps)
1	10296	10296	1	≅ 10	5160	≅ 5
2	51024	51024	2	≅ 51	25456	≅ 25
3	102048	75376	2	≅ 102	51024	≅ 51
4	150752	75376	2	≅ 150	51024	≅ 51
5	299552	149776	4	≅ 300	75376	≅ 75

En la actualidad se pueden encontrar teléfonos de mayor gama, en cuanto se refiere a la velocidad a la que pueden navegar sobre la red móvil. La velocidad a la que puedan navegar estos dispositivos dependerán de la capacidad que les sea permitida por cada operador. Las categorías descritas en la tabla anterior hacen referencia para los dispositivos LTE del *Release 8* [17].

1.3.7.4 Interfaz aire

La interfaz aire para LTE cuenta con las siguientes características:

- Ancho de banda variable: esto permite conseguir flexibilidad al momento de asignar los recursos dependiendo la disponibilidad del operador.
- Subportadoras ortogonales: LTE emplea OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), esta técnica permite una mayor inmunidad a la dispersión causada por el canal inalámbrico. OFDM utiliza subportadoras o tonos los cuales se encuentran ortogonales entre sí, estas subportadoras tienen un espaciado de 15 kHz, como se observa en la Figura 1.12.

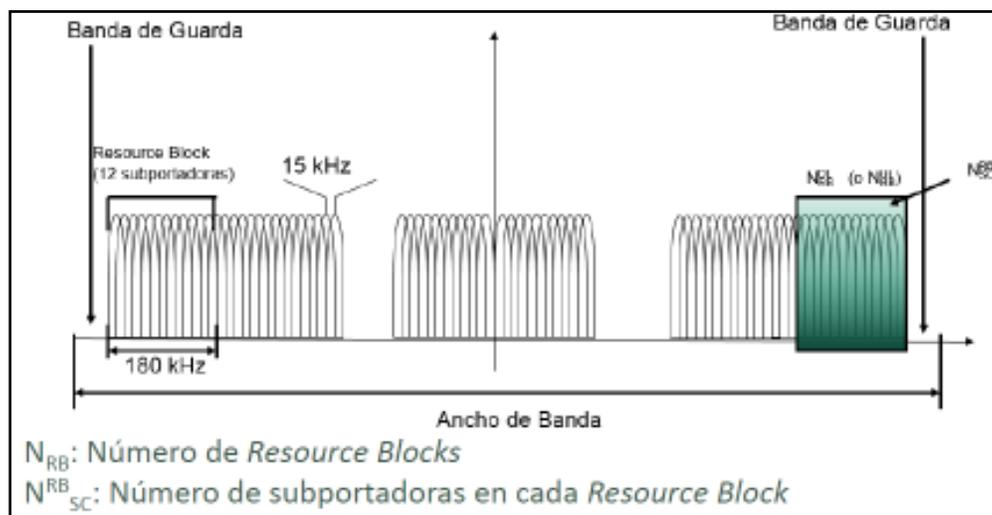


Figura 1.12 Subportadoras en LTE [18]

La modulación se adapta a las condiciones del canal, puede ir desde una modulación QPSK, 16 QAM hasta llegar a una modulación 64 QAM, esto dependerá de las condiciones de ese momento.

En la Tabla 1.5 se presentan los parámetros del enlace descendente para el sistema LTE para los diferentes anchos de banda permisibles en este sistema.

Tabla 1.5 Parámetros del enlace descendente de LTE [18]

Ancho de Banda (MHz)	Duración de subtrama (ms)	Espaciado entre subportadoras (KHz)	Número de subportadoras ocupadas	Número de Resource Block	Número de símbolos OFDM por subtrama
1.2	1	15	76	6	6
3			151	15	15
5			301	25	25
10			601	50	50
15			901	75	75
20			1201	100	100

1.3.7.5 Nodo B evolucionado (eNodeB, *Evolved NodeB*)

El e-NodeB constituye la estación base dentro de la E-UTRAN, esta estación base cuenta con todas las funcionalidades para operar con cierta autonomía dentro de la red, por ejemplo, con la integración de los e-NodeB ya no se requiere instalar un nuevo elemento para controlar cuando se debe realizar un handover por cuanto estos equipos ya cuentan con esas funcionalidades dentro del mismo. El interfaz con el cual se comunican entre e-NodeB se lo conoce como X2. En la Figura 1.13, se presentan los elementos de la E-UTRAN y sus interfaces.

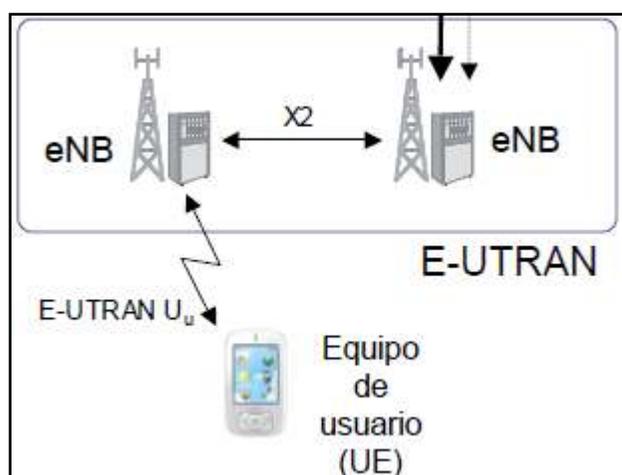


Figura 1.13 Elementos E-UTRAN [18]

1.3.7.6 Evolved Packet Core (EPC)

En el sistema LTE, el EPC constituye la parte medular de toda la infraestructura. En el EPC es donde se realizan las gestiones de movilidad, autenticación y más, a continuación se citan otras funciones del EPC:

- Puede acceder a redes de datos externas y a los servicios del operador.

- Autenticación, facturación, manejo de la información de los suscriptores e interoperabilidad con otros sistemas.
- Administrar y registrar lo referente a la movilidad de los terminales dentro de la red.

El EPC está conformado por varios elementos, estos elementos deben cumplir con funciones y responsabilidades dentro de la arquitectura, en la Figura 1.14 se presentan los elementos que conforman al EPC.

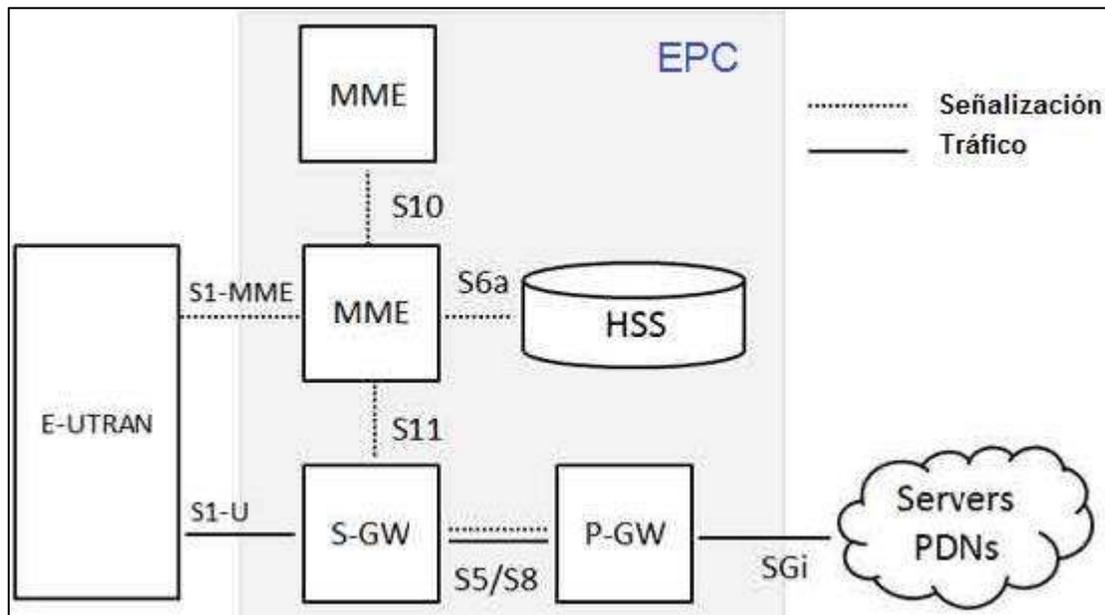


Figura 1.14 Elementos dentro del EPC [19]

A continuación, se presentan las responsabilidades más relevantes de cada uno de estos elementos.

Responsabilidades de la entidad de gestión de movilidad [18]:

- Maneja la conexión/desconexión del equipo de usuario.
- Selección del Gateway
- *Paging*³
- Administración de la movilidad del equipo de usuario cuando se encuentre en modo IDLE

³Paging: Proceso de búsqueda que ejecuta la red para encontrar un abonado.

Responsabilidades del servidor de abonado (HSS) [18]:

- Detalles de suscripción del equipo de usuario.
- Administración de registro de usuario.
- Almacenamiento de los parámetros de seguridad del equipo de usuario.

Responsabilidades de la red de paquetes de datos de la puerta de enlace (PGW) [18]:

- Control de las políticas de calidad de servicio (QoS) y aplicaciones.
- Filtrado de paquetes.

Responsabilidades del servidor de la puerta de enlace [18]:

- Apoyo local para movilidad.
- Información del enrutamiento de red.
- Intercambio cuando los usuarios se encuentren en *roaming*.
- Intercepción legal.

LTE al contar con una arquitectura mucho más simple que sus antecesoras, la hace más práctica en cuanto a los nodos utilizados, sin embargo, esto no significa que tiene menos responsabilidades que otras arquitecturas de sistemas anteriores.

1.3.8 Aspectos de planificación de la red

En LTE, una planificación meticulosa de la red es esencial para asegurar cobertura en tantos lugares como sea posible, reducir el efecto de interferencia de celdas vecinas y otros dispositivos móviles. Para esto se cuenta con criterios de planificación y de esta manera minimizar el impacto causado por las interferencias y otras situaciones en la nueva red a crear [15].

1.3.8.1 Red de frecuencia única

La red de acceso de radio LTE reutiliza una única portadora para todas las celdas. Para ampliar la capacidad, es posible operar varias portadoras en la misma banda de frecuencia, aunque los operadores de red usualmente aprovechen el ancho de banda del canal de hasta 20 MHz que se ha especificado para LTE. En algunas bandas, los canales de 20 MHz no pueden ser factibles [15], por una serie de razones:

- El espectro es limitado debido a que varios operadores de telefonía celular, dividen el espectro en pequeñas bandas de frecuencia.

- Algunas bandas no son adecuadas para el canal de 20 MHz, por ejemplo, debido a una brecha dúplex estrecha entre el enlace ascendente y el enlace descendente. Esto dificulta que los filtros de los dispositivos móviles se separen correctamente.

1.3.9 Software de simulación ATOLL [20]

ATOLL es utilizado como una herramienta de planificación de radiofrecuencia (RF), y permite realizar diseños y optimización de redes multi-plataforma de tecnología escalable y flexible que soporta los operadores móviles en todo el ciclo de vida de la red.

ATOLL también puede ser considerado como un sistema de información técnica abierta que se integra fácilmente con otras aplicaciones de Tecnologías de la Información (TI) y de esta manera aumenta la productividad. De igual manera permite la integración de módulos complementarios personalizados o disponibles en el mercado.

Este software cuenta con características avanzadas de tecnología múltiple de planificación de red (por ejemplo, GSM/ UMTS/ LTE, CDMA2000/LTE), y un multi-RAT (*Radio Access Technology*) GSM/ UMTS/ LTE. El programa puede soportar GSM/ GPRS/ EDGE, UMTS/ HSPA, LTE, CDMA2000 1xRTT/EV-DO, TD-SCDMA, WIMAX y redes de enlace por microondas; además, incluye un motor de cálculo de propagación de altas prestaciones. En la Figura 1.15, se presentan los principales elementos del interfaz de ATOLL.

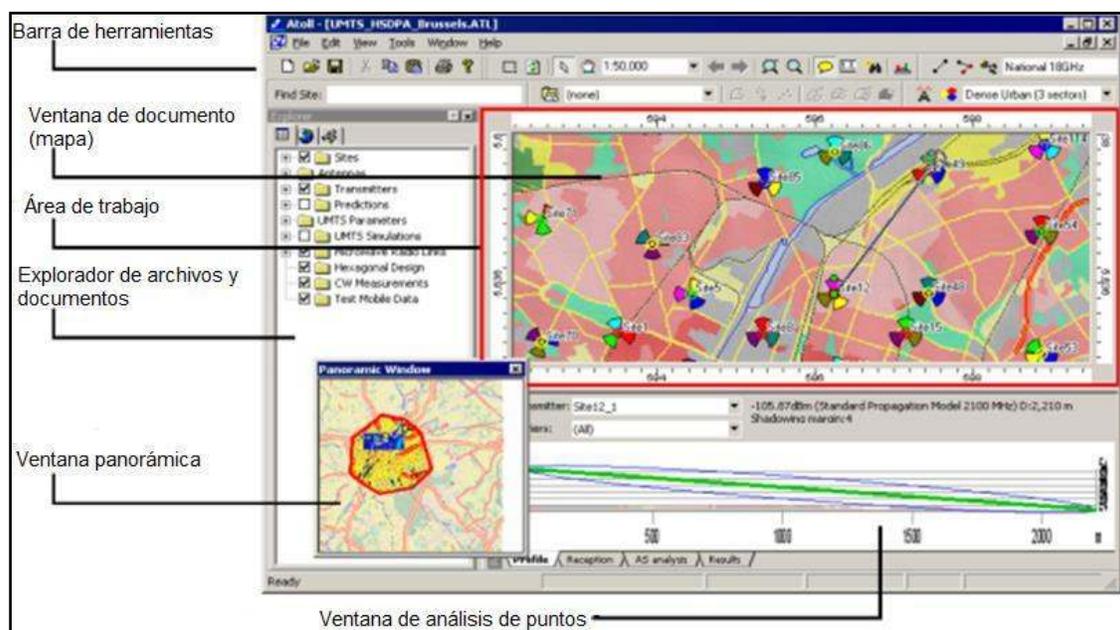


Figura 1.15 Interfaz de ATOLL [21]

1.3.10 Definiciones comunes a emplearse

Las definiciones de los parámetros o elementos a emplearse ayudan a comprender de mejor manera el contexto en el cual se está tratando. A continuación, se presentan las definiciones más comunes a emplearse.

1.3.10.1 Antena

Una antena permite transmitir o recibir energía electromagnética y están construidas generalmente por un elemento conductor.

1.3.10.2 Rango de frecuencias

Son las frecuencias en las cuales la antena puede radiar, estos rangos de frecuencias consiguen ser divididos en bandas de operación, de acuerdo con las frecuencias empleadas por cada tecnología que funcione la antena.

1.3.10.3 Polarización

Una característica muy importante de una onda electromagnética es la polarización, que es descrita por la dirección del vector del campo eléctrico a medida que avanza en el tiempo [22].

1.3.10.4 Inclinación eléctrica

Permite variar el patrón de cobertura de una antena⁴, esta puede ser ajustada de manera remota o manual [23]. Al disminuir de manera abrupta la inclinación eléctrica de una antena, las zonas bajo la antena pierden potencia, ya que solo son cubiertas por los lóbulos secundarios con baja densidad de potencia, a esta zona se le denomina: *Área Ciega*⁵. Otro efecto de disminuir de manera abrupta la inclinación eléctrica, es la sobre propagación del transmisor que se encuentre radiando creando interferencia en otras áreas de cobertura. Por el contrario, en caso de incrementar demasiado el ángulo de inclinación se reduce el patrón de radiación, reduciendo la obertura del transmisor.

⁴ Patrón de cobertura: Forma de lóbulo de radiación que tiene una antena, para las antenas sectoriales utilizadas en las redes celulares se utilizan antenas con una apertura horizontal de 60°.

⁵ Área Ciega: Zona bajo la antena que no es cubierta por el lóbulo principal y solo es cubierta por los lóbulos secundario con menor densidad de potencia.

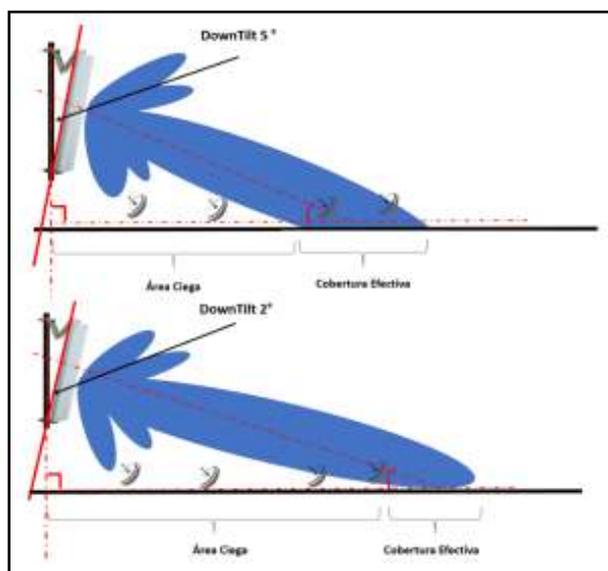


Figura 1.16 Efecto de disminuir la inclinación eléctrica en una antena [24]

1.3.10.5 Anchura del haz

La anchura de haz de un patrón se define como la separación angular entre dos puntos idénticos en el lado opuesto del patrón máximo de radiación [25]; en la Figura 1.16 se observa los dos tipos de ancho de haz que puede tener una antena, de color azul se presenta el ancho del haz horizontal y de color rojo se presenta el ancho del haz vertical.

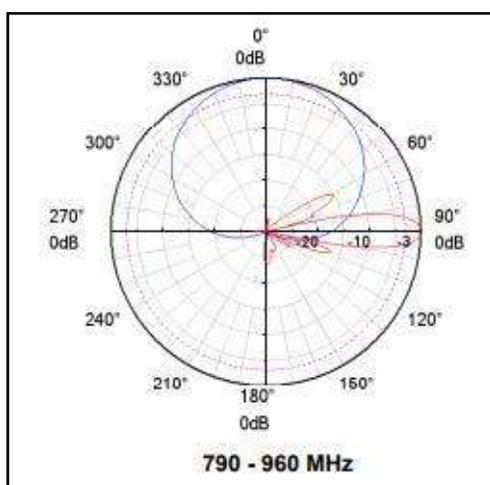


Figura 1.17 Ancho del haz, horizontal (azul) y vertical (rojo) para un rango de frecuencias de 790 – 960 MHz [26]

2 METODOLOGÍA

En esta sección, se detallan los procesos a seguir para cumplir con los objetivos propuestos en el presente Trabajo de Titulación.

Se ha diseñado una red LTE con ancho de banda de 5MHz para la parroquia de Sangolquí con el fin de incrementar la capacidad de datos ofrecida por un operador celular, mediante el reuso de la banda de frecuencia actualmente usada para dar servicio de voz y datos en la red GSM 1900. Para cumplir con el desarrollo de este Trabajo de Titulación las etapas seguidas son:

- Recursos para obtención y análisis de datos en la red GSM 1900 actual.
- Diseño de red LTE.
- Planificación de red LTE en ATOLL.

2.1 Recursos para obtención y análisis de datos en la red GSM 1900 actual

2.1.1 Área de interés (Parroquia de Sangolquí)

Rumiñahui, es uno de los cantones más pequeños de la provincia de Pichincha, con 139 Km² de superficie y una población de 85852 habitantes. Su división política está compuesta por: San Rafael, San Pedro de Taboada, Sangolquí, Cotogchoa y Rumipamba [27]. De estas cinco parroquias la más representativa es Sangolquí, debido a que alberga a 81140 habitantes [28] y concentra la mayor parte de infraestructura del cantón, en áreas como: educación, salud, comercio, vialidad, recreación, etc.

En la Figura 2.1 se muestra una imagen satelital del área de interés para este Trabajo de Titulación, donde se puede observar la parroquia de Sangolquí.

Cabe recalcar que se conoce la ubicación geográfica de los sitios GSM 1900 de un operador celular, distribuidos en el área de interés.

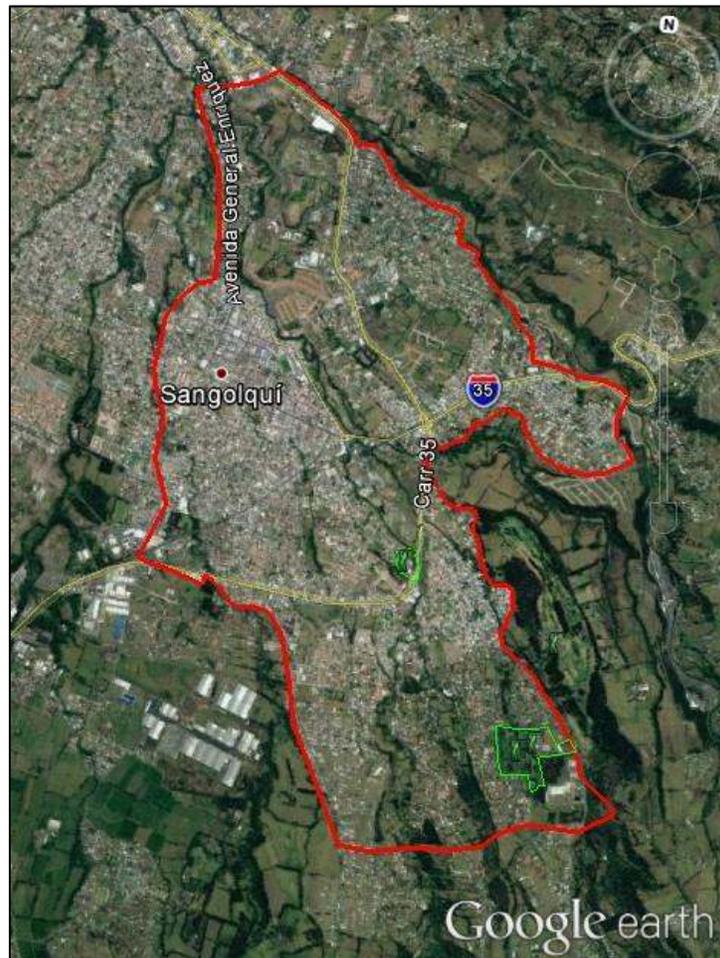


Figura 2.1 Toma satelital de la parroquia de Sangolquí, el polígono de color rojo indica el área de interés

2.1.2 Recolección de datos de una red celular GSM 1900 desplegada en área de interés.

Para lograr recolectar datos de una red celular GSM 1900, se realizará un *drive test* en el área de interés, con el fin de obtener las velocidades reales que el usuario recibe de la red GSM 1900. Para la realización de *drive test* se deberán tomar en cuenta los siguientes requerimientos:

- Equipos de medición.
- Configuración de tarea
- Ruta de evaluación.

2.1.2.1 Equipo de medición

El equipo de medición que se usará, es un **SAMSUNG S5 con la aplicación SwissqualQualipoc 14.20.62**. Esta herramienta genera un registro donde se guarda la información de las pruebas que se realicen en el área de interés (parroquia de Sangolquí), para posteriormente analizar los resultados. En la figura 2.2 se muestra una imagen de la herramienta SwissqualQualipoc Android.



Figura 2.2 Imagen de aplicación SwissqualQualipocAndroid en móvil Samsung S5.

2.1.2.2 Configuración de tarea.

El equipo QualiPoc, será configurado con una tarea de datos, la cual consistirá en una serie de descargas periódicas de un archivo HTTP denominado 1mb.test y se descargará del servidor cachefly.cachefly.net. Además se deberá forzar⁶ al equipo a la red GSM 1900. En la Figura 2.3 se presenta la configuración de la tarea de descargas periódicas que realizará el equipo de medición.

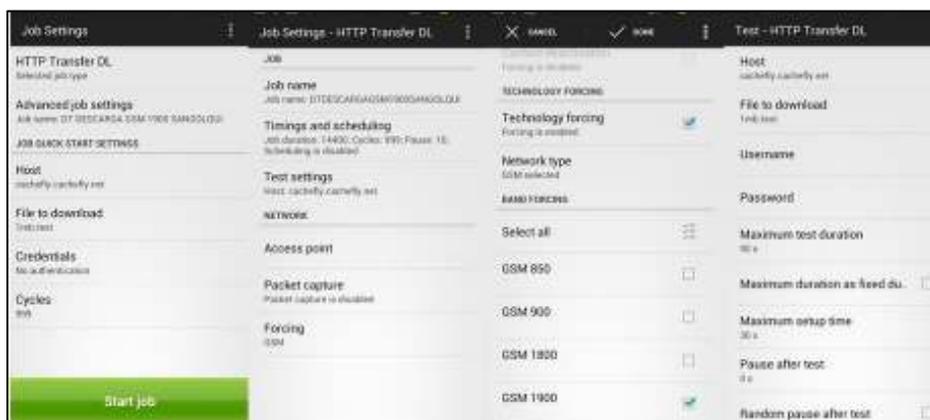


Figura 2.3 Configuración de tarea de descarga de un archivo HTTP

⁶ Forzar: Configurar el equipo de medición para que solo trabaje en la red GSM 1900.

2.1.2.3 Ruta de evaluación.

Antes de realizar el *drive test*, se realizará un recorrido de reconocimiento de las principales avenidas de la parroquia de Sangolquí. Esto con el fin de recibir la radiación de cada una de las radio bases existentes (BTS). En la Figura 2.4 se presenta una imagen de la ruta en color verde que se recorrerá en el drive test.

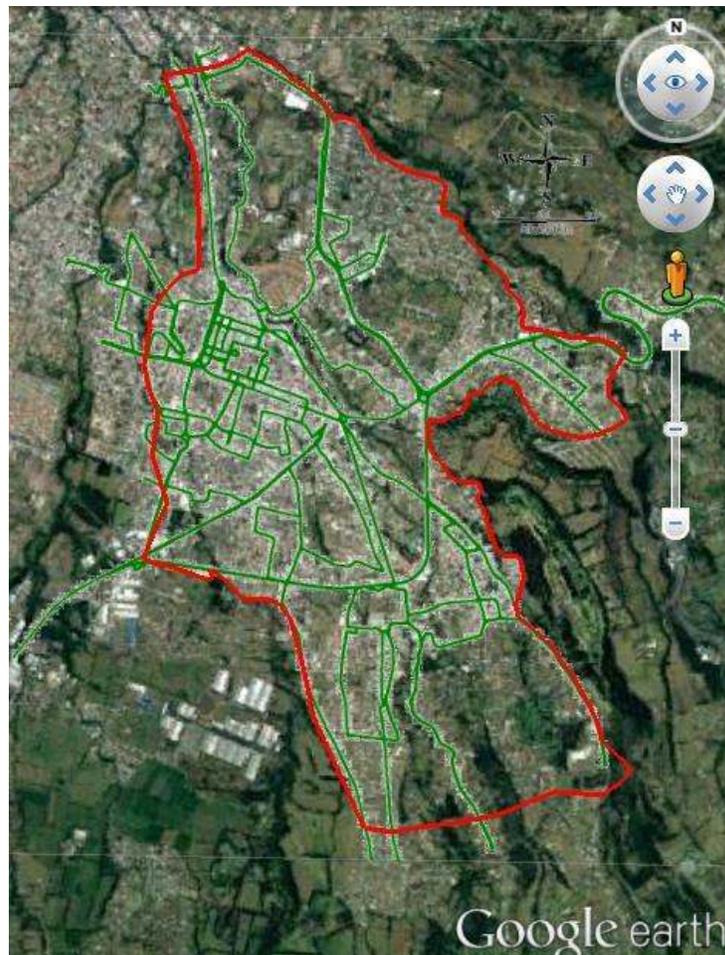


Figura 2.4 Ruta sugerida para realizar pruebas de datos en la parroquia de Sangolquí

2.1.3 Presentación de datos recolectados

Los datos obtenidos después del drive test son guardados en el Qualipoc en una carpeta denominada *result*. Dependiendo del volumen de la información que se recolecte en las pruebas realizadas en el drive test, se generarán uno o varios registros. Una vez obtenidos los resultados del Qualipoc, se procesará la información con la ayuda de las siguientes herramientas computacionales:

- SwissQualNetQual NQDI versión 14.2.0.33, como herramienta de procesamiento.
- Mapinfo Professional 11.0.

- Google Earth

2.1.3.1 SwissQualNetQual NQDI

Esta herramienta, permite interpretar la información obtenida en logs del drive test realizado, generando tablas con extensión .tab⁷ o .csv⁸ y también permite presentar la información en forma gráfica. En la Figura 2.5 se muestra una imagen con la información de throughput obtenida después de procesar un registro del drive test realizado en la parroquia de Sangolquí.

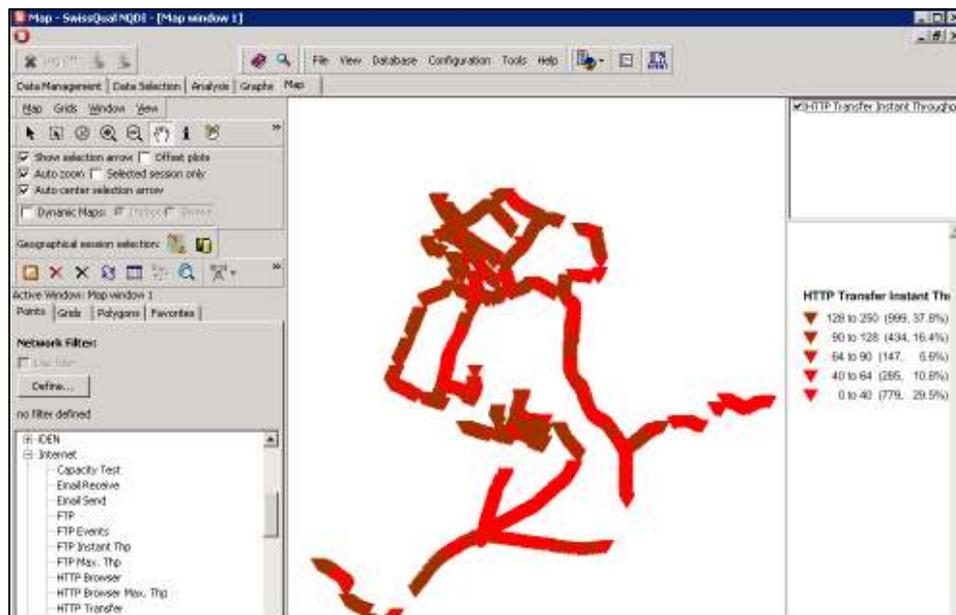


Figura 2.5 Imagen de la información de throughput obtenida después de procesar uno de los logs de las pruebas realizadas en el drive test.

Con la ayuda de esta herramienta, se exportará la información de tasa de datos, cobertura, tecnología, servidores, ubicación geográfica de las BTS existentes, con extensión .tab, para luego ser procesada en el software Mapinfo y poder visualizar la información obtenida en forma de imágenes.

2.1.3.2 Mapinfo profesional

Esta herramienta computacional permite graficar la información contenida en tablas con extensión .tab o .csv entregadas por el NQDI, permitiendo obtener un imagen de la información que se requiere analizar. En la Figura 2.6 se muestra una gráfica de

⁷ .tab: extensión de un formato de archivo que puede leer el software Mapinfo

⁸ .csv: extensión de un formato de archivo que puede leer el software Mapinfo

servidores⁹ que están radiando en la parroquia de Sangolquí obtenidas con la herramienta Mapinfo.

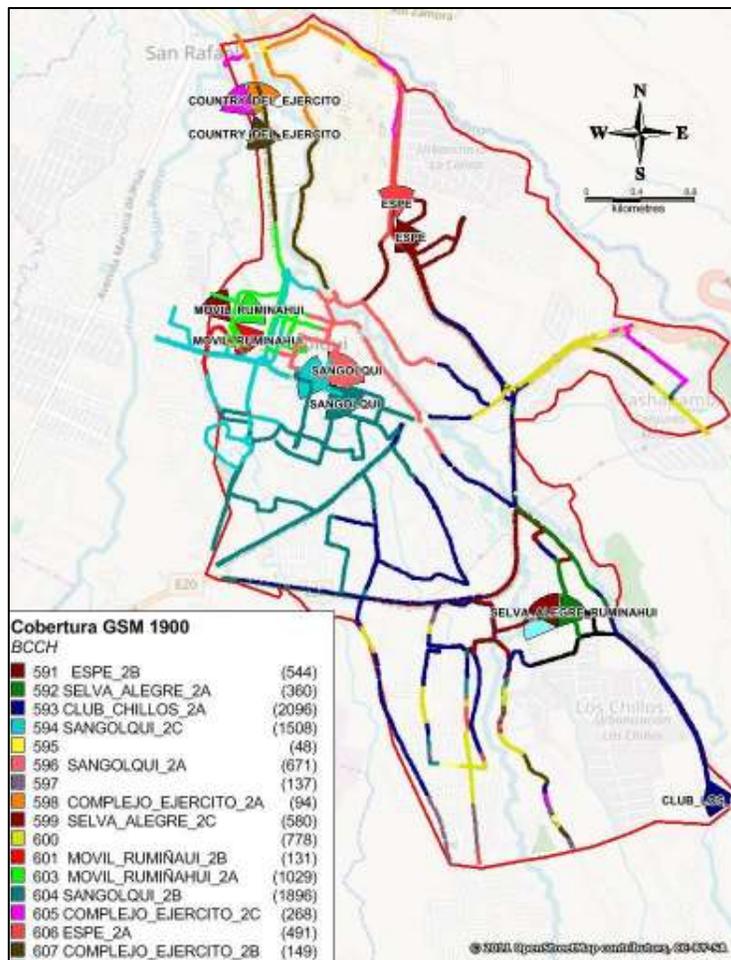


Figura 2.6 Imagen de servidores radiando en la parroquia de Sangolquí.

Con esta herramienta se analiza la información obtenida de las pruebas del drive test realizado. Para este caso se presentan las gráficas de tasa de datos (throughput¹⁰), cobertura (RxLev¹¹), servidores (BCCH), ubicación geográfica de las BTS existentes (latitud, longitud) y tecnología.

⁹ Servidor: Hace referencia al BCCH de sector GSM que se encuentra brindando servicio celular.

¹⁰ Throughput: Rendimiento de la tasa de datos que recibe un usuario, se mide en (Kbps)

¹¹ RxLev: Parámetro que hace referencia a la potencia distribuida a lo largo de un sector GSM, este parámetro se mide en dBm.

2.1.3.3 Google Earth

Esta herramienta será de vital importancia ya que nos permitirá visualizar las irregularidades geográficas (lomas, valles, bosques) del área a analizar. En la Figura 2.7 se muestra una gráfica de cobertura (RxLev) exportado a Google Earth,

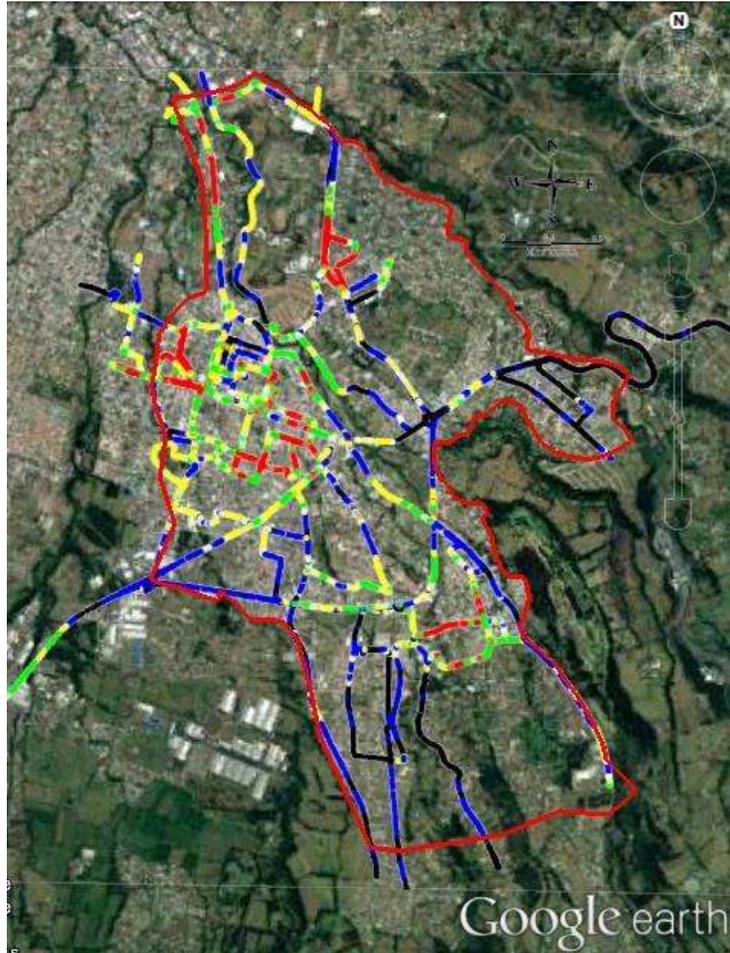


Figura 2.7 Imagen de los niveles de *RxLev* de la red GSM 1900 encontrados en la parroquia de Sangolquí exportado desde Mapinfo a Google Earth.

2.2 Diseño de red LTE

Para lograr el diseño de la red LTE se realizarán los siguientes puntos:

- Dimensionamiento de la red LTE
- Banda de frecuencia y ancho de banda asignado
- Equipos de radio a emplear

2.2.1 Dimensionamiento de red LTE

En esta sección se calcula el número de sitios requeridos para brindar servicio de datos a través de una segunda portadora LTE. Para esto se determinara los siguientes puntos:

- Penetración de un operador celular.
- Número de usuarios a los que se ofrecerá el servicio.
- Modelo de tráfico a usar.

2.2.1.1 Inserción (participación de mercado) de un operador celular.

El mercado de telefonía celular en el Ecuador está dividido por tres operadores celulares. Cada uno con diferente porcentaje de inserción en el mercado. En la Tabla 2.1 se presenta el porcentaje de inserción que cada operador celular tienen en el país.

Tabla 2.1 Penetración de operadores celulares en el país [29].

Penetración de Operadores Celulares en el Pais	
Operador 1	64.15%
Operador 2	28.78%
Operador 3	7.60%

Para el diseño de la red LTE se tomará la inserción del operador 2, debido a que permite evaluar su red GSM 1900 de manera independiente.

No se escoge al Operador 1 debido a que, no permite evaluar su respectiva red GSM 1900 de manera independiente por la configuración con la que cuenta su red. En la Figura 2.8 se muestra como el Qualipoc se queda sin servicio al seleccionar la banda GSM 1900. Esto es debido a que el Operador 1 utiliza una configuración denominada acceso por canal común, la cual consiste en permitir el acceso a la red GSM a través de la subred GSM 850 y luego asignar un canal de tráfico de la subred GSM 1900.

No se elige al Operador 3 ya que según el documento “Radiobases por prestador y tecnología” [36], este no posee infraestructura GSM en su red celular.

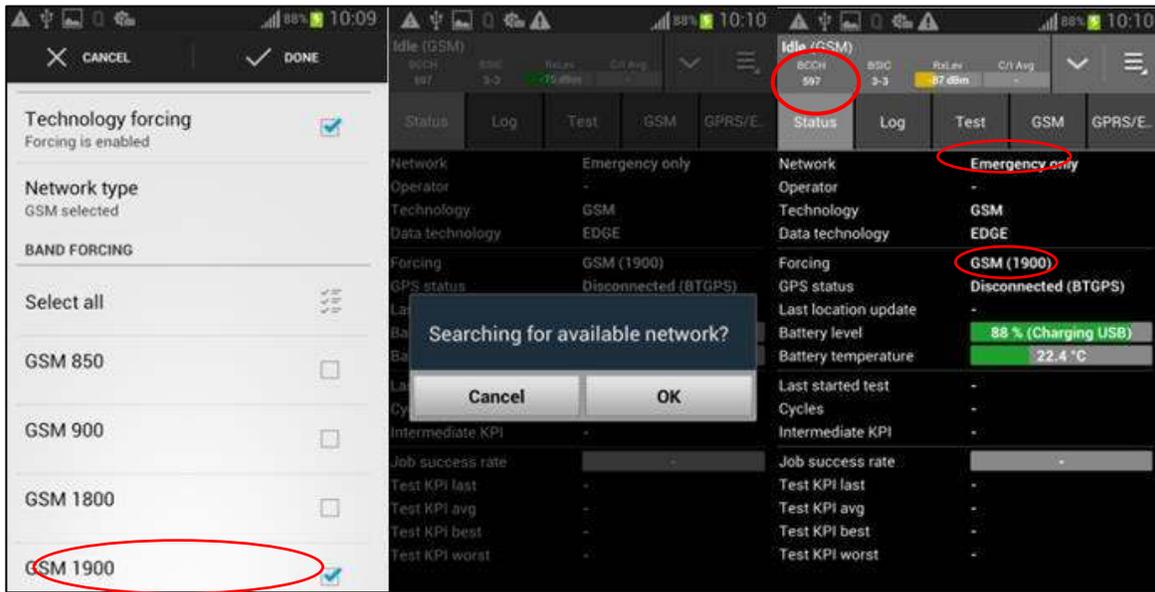


Figura 2.8 Imagen de la configuración del Operador 1.

2.2.1.2 Usuarios a los que se ofrecerá el servicio.

Primero se debe tener una idea de cuantos usuarios tiene el Operador 2. Para esto se debe conocer la población de Sangolquí y la inserción de dicho operador (participación de mercado).

Se Conoce que la población de Sangolquí es de 81140 habitantes [10] y la inserción del Operador 2 es de 28.72%. Multiplicando estos dos valores se obtiene un total de 23303.408 usuarios, tal como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$\text{Usuarios del operador} = \text{Número de habitantes} * \text{inserción del operador celular}$$

Ecuación 2.1 Cálculo de número de usuarios [30]

Para este diseño se usara la siguiente asunción.

Se propone brindar servicio de datos con la red LTE, al 40% de los usuarios del Operador 2. Esto equivaldría a 9321 habitantes distribuidos en toda la parroquia de Sangolquí, tal como se muestra en la Ecuación 2.2.

$$\text{Número de usuarios a servir} = \text{Usuarios del operador} * 40\%$$

Ecuación 2.2 Cálculo de número de usuarios [30]

$$\text{Numero de usuarios} = 23303 * 0.4$$

$$\text{Número de usuarios} = \mathbf{9321.36}$$

2.2.1.3 Modelo de tráfico a usar.

El modelo de tráfico a usar, está basado en la tasa de datos que requieren los servicios a ofrecer dentro de la red LTE. En la Tabla 2.2, la Tabla 2.3 y la Tabla 2.4 se presenta el modelo de tráfico con los servicios que se ofrecerán dentro de la red de datos.

Tabla 2.2 Modelo de tráfico de servicio descendente [30]

Parámetros de Tráfico	ENLACE DESCENDENTE			
	Tasa (Kbps)	Tiempo Sesión (s)	Duty Radio ¹²	BLER ¹³ (%)
VoIP	29.6	80	0.4	1%
Video Llamada	62.53	70	1	1%
Señalización	15.63	7	0.2	1%
Navegación web	250.11	1800	0.05	1%
Email	750.34	15	1	1%
Video Streaming	250.11	3600	0.95	1%
Tranferencia de archivos	750.34	600	1	1%
Video Conferencia	62.53	1800	1	1%
Juegos en línea	125.06	1800	0.4	1%
P2P	750.34	1200	1	1%

Tabla 2.3 Modelo de tráfico de servicio ascendente [30]

Servicios	ENLACE ASCENDENTE			
	Tasa (Kbps)	Tiempo Sesión (s)	Duty Radio	BLER (%)
VoIP	29.6	80	0.4	1%
Video Llamada	62.53	70	1	1%
Señalización	15.63	7	0.2	1%
Navegación web	62.53	1800	0.05	1%
Email	140.69	50	1	1%
Video Streaming	31.26	3600	0.95	1%
Tranferencia de archivos	140.69	600	1	1%
Video Conferencia	62.53	1800	1	1%
Juegos en línea	31.26	1800	0.2	1%
P2P	250.11	1200	1	1%

¹² Duty Radio: Mide el factor de actividad del servicio.

¹³ BLER(Block Error Rate) :Es la relación entre el número de bloques errados y el número total de bloques recibidos en un enlace de radio.

Tabla 2.4 Modelo de tráfico de servicios para ambiente Urbano Denso [30]

Comportamiento del Usuario	Denso Urbano	
	Tasa de penetración ¹⁴ (%)	Número de intentos en la hora pico (BHSA) ¹⁵
VoIP	100	1.4
Video Llamada	20	0.2
Señalización	40	5
Navegación web	100	0.6
Email	10	0.4
Video Streaming	15	0.2
Tranferencia de archivos	20	0.3
Video Conferencia	20	0.2
Juegos en línea	30	0.2
P2P	20	0.2

La Tabla 2.2 y la tabla 2.3 presentan los siguientes servicios:

- *Volp*: Este servicio permite realizar llamadas de voz a través de una red de datos.
- *Video Llamada*: Este servicio permitirá realizar video llamada con otra persona sin emplear los datos móviles,
- *Señalización*: Es la información de control que requiere la red LTE para poder administrar sus recursos.
- *Navegación Web*: Este servicio permitirá al usuario navegar por la red de internet como si lo hiciera desde un ordenador común.
- *Email*: El servicio de correo electrónico permitirá al usuario enviar y recibir todo tipo de archivos digitales.
- *Video streaming*: Este servicio permitirá al usuario visualizar contenidos multimedia (audio y video), sin tener que esperar a que se descarguen.
- *Transferencia de archivos*: Este servicio permitirá descargar o subir información desde o hacia un servidor localizado en cualquier punto de la red.
- *Video Conferencia*: Este servicio permitirá la comunicación bidireccional con una o varias personas a la vez, en tiempo real.
- *Juegos en Línea*: Este servicio permitirá a los usuarios jugar en línea por medio de su teléfono móvil.

¹⁴Tasa de Penetración: Este valor nos indica el porcentaje de uso de cada servicio.

¹⁵ BHSA: Es el número de intentos por acceder a la red evaluados en la hora pico.

- *P2P*: Este tipo de servicios permitirá utilizar Skype, Netflix, etc...

Con la información anteriormente detallada, se procederá a calcular el número de eNodeB necesarios para brindar servicio de datos a través de la red LTE.

2.2.1.3.1 Cálculo del volumen de datos por sesión:

Para el cálculo de volumen de datos por sesión se usará la Ecuación 2.3

$$Volumen\ por\ sesión = \frac{Tasa * Tiempo\ de\ sesión * Duty\ Ratio}{1 - BLER}$$

Ecuación 2.3 Volumen de datos por sesión [30]

Aplicando la fórmula anterior se tiene como resultado los volúmenes de datos mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Volumen de datos por sesión

Servicios	Volumen de datos por servicio (Kbits)
Voip	869.49
Video llamada	4424.31
Señalización	22.10
Navegación web	22737.27
Email	11368.79
Video Streaming	864016.36
Transferencia de archivos	454751.52
Video Conferencia	113690.91
Juegos en línea	90952.73
P2P	909503.03

2.2.1.3.2 Cálculo de la tasa de datos por usuario

Para calcular la tasa de datos que requiere un usuario, se empleará la Ecuación 2.4.

$$Throughput / usuario = \left[\sum \left(\frac{(Volumen\ de\ datos\ por\ sesión)(BHSA)(Tasa\ penetración)}{3600} \right) \right] (1 + R_{p-p})^{16}$$

Ecuación 2.4 Cálculo de tasa de datos por usuario [30].

Aplicando la Ecuación 2.4, se tienen los resultados presentados en la Tabla 2.6.

¹⁶ Relación pico promedio (R_{p-p}): Es el margen para tomar en cuenta el tráfico por ráfagas.

Tabla 2.6 Throughput por usuario.

Servicios	Tasa de datos por usuario (bps)
Voip	338.00
Video llamada	49.13
Señalización	12.28
Navegación web	3789.55
Email	126.32
Video Streaming	7200.14
Transferencia de archivos	7579.19
Video Conferencia	1263.23
Juegos en línea	1515.88
P2P	10105.59
Tasa de datos por usuario	44771.23

Debido a que se trata de un servicio de datos, se debe tener una reserva para las ráfagas de tráfico alto, que se puedan generar. Para este diseño se empleará una tasa pico promedio para una zona Urbana densa. En la Tabla 2.7 se muestran los porcentajes de la relación pico promedio por cada tipo de entorno social.

Tabla 2.7 Porcentajes de la relación pico – por entorno social [30].

Morfología (%)	Urbano denso (%)	Urbano (%)	Sub urbano (%)
Relación Pico-Promedio	40	20	10

2.2.1.3.3 Cálculo de capacidad de la red LTE

Para calcular la capacidad de la red, se aplicará la Ecuación 2.5.

Throughput total de la red LTE = Número de usuarios * Throughput /usuario.

Ecuación 2.5 Cálculo de tasa de datos por usuario [30].

*Throughput total de la red LTE = 9321.36 *44771.23 bps*

Throughput total de la red LTE = 417328895.74 bps

Por lo tanto la capacidad requerida por la red LTE será de **417.32 Mbps**.

2.2.1.3.4 Cálculo de la capacidad de una celda:

Para calcular la capacidad de una celda se empleará la Ecuación 2.6 en conjunto con la Tabla 2.8 [30].

$$\text{Throughput promedio (MAC)} = \text{throughput}_a * a\% + \text{throughput}_b * b\% + \text{throughput}_c * c\% \dots$$

Ecuación 2.6 Cálculo de Throughput promedio [30].

Tabla 2.8 Tabla de throughput en función del SINR [30]

SINR (dB)	Probabilidad de SINR	MCS	Throughput MCS
a1 - a2	a%	MCSa	Throughputa
b1 - b2	b%	MCSb	Throughputb
c1 - c2	c%	MCSc	Throughputc
d1 - d2	d%	MCSd	Throughputd
.....

Para obtener los valores de probabilidad de SINR, se obtendrán los porcentajes del índice de modulación y codificación (MCS) con ayuda del simulador ATOLL. Para esto se creará un sector LTE en la parroquia de Sangolquí y se le asignará la siguiente configuración de radio, tal como se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Configuración de radio de sector LTE.

Altura (m)	Potencia (dBm)	Inclinación electrica (°)	Inclinación mecanica (°)	Inclinación efectiva (°)
30	46	3	1	4

Producto de la simulación se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 2.10

Tabla 2.10 Resultados obtenidos de la simulación de sector LTE.

MCS	Porcentajes	Throughput (Kbps)
1 to 2 MCS	0.00%	1165.00
2 to 3 MCS	0.00%	3495.00
3 to 4 MCS	0.00%	5825.00
4 to 5 MCS	21.75%	8155.50
5 to 6 MCS	16.18%	10486.00
6 to 7 MCS	19.52%	13981.00
7 to 8 MCS	16.96%	17476.00
8 to 9 MCS	5.78%	19806.00
9 to 10 MCS	2.04%	22136.00
10 to 11 MCS	4.77%	24466.50
11 to 12 MCS	2.39%	26797.00
12 to 13 MCS	1.86%	29127.00
13 to 14 MCS	1.11%	31457.00
14 to 15 MCS	0.78%	33787.00
15 MCS	6.88%	34976.00

Como resultado la simulación se obtiene una capacidad promedio de la celda de **18.87 Mbps**.

Los resultados de la simulación se encuentran en el anexo VI adjunto a este trabajo.

2.2.1.3.5 Cálculo del número de celdas

Para encontrar el número de celdas necesarias, se dividirá el throughput total de la red LTE para el throughput de una celda, tal como se muestra en la Ecuación 2.5

$$\text{Número de celdas} = \frac{\text{throughput total de la red}}{\text{throughput de una celda}}$$

Ecuación 2.5 Cálculo de número de celdas.

$$\text{Número de celdas} = \frac{417328895.74 \text{ bps}}{18870000 \text{ bps}}$$

$$\text{Número de celdas} = 25.24$$

Por lo tanto se requerirán de **25 celdas**, para cubrir al **40%** de la población de Sangolquí que son clientes de este operador.

2.2.1.4 Cálculo de eNodeB

Se tomará un promedio de 3 celdas por eNodeB, obteniendo un total de 8.33 eNodeB

$$\text{Número de eNodeB} = \mathbf{8.33}$$

Por lo tanto para esta red se requerirán **8** nodos distribuido en la Parroquia de Sangolquí.

2.2.2 Banda de frecuencias a reusar.

La banda de frecuencias que se reusará, es la banda B de los 1900MHz. En la Tabla 2.11 se puede observar que actualmente se la usa para ofrecer servicio de voz y datos a través de GSM 1900. El rango de frecuencias para el enlace descendente va desde los 1955MHz hasta los 1960MHz y para el enlace ascendente va desde los 1875MHz hasta los 1880 MHz. En total se asigna 5MHz en ancho de banda para el despliegue de la red LTE.

Tabla 2.11 Banda de frecuencia a reusar.

Detalle	Canales		Rangos
	No	UARFCN	Frequency Range
GSM 1900 (5 MHz)	DL	From 661 to 686	1955MHz - 1960MHz
	UL	From 661 to 686	1875MHz - 1880MHz

2.2.3 Equipos de radio a emplear

Para este caso se usará la RRU y el sistema radiante

- Unidad de radio Remota (RRU)
- Antenas
- Conductores y conectores.

2.2.3.1 Unidad de Radio Remota

Se usará la Unidad de Radio Remota (RRU) 3942 debido a que presenta una alta gama de configuraciones de operación, tanto en potencia como en frecuencia, lo que la hace ideal para las operaciones de un operador celular. En la Tabla 2.12 se muestran las características y posibles configuraciones que ofrece esta Unidad de Radio Remota. Para este diseño se usará una potencia de transmisión de 40 vatios.

Tabla 2.12 Características de Unidad de Radio Remoto a usar [31].

Alimentación de entrada	Dimensiones (H*W*D)	Peso (Kg)	Bandas de frecuencia			
-48V DC; rango de voltaje : -36V DC to -57 VDC	485mm* 380mm* 170mm	25	850MHz		1900MHz	
			subida	bajada	subida	bajada
			824 to 849	869 to 894	1850 to 1910	1930 to 1990
Capacidad			Potencia de salida			
GSM	8 TRX		2*60W		GSM/UMTS/LTE	
UMTS	6 PORTADORAS	sin MIMO	40W+80W		GSM/UMTS/LTE	
	4 PORTADORAS	con MIMO	40W+2*20W		GSM + LTE	
LTE	2 PORTADORAS	1.4/3/5/10/15/20 MHz	2*40W		LTE	

2.2.3.2 Antena

Para este diseño se usará la antena HBXX-6516DS –VTM. Esta antena trabajará en la banda de frecuencia de los 1920MHz hasta 2180MHz para el enlace descendente y con la frecuencia de 1850MHz a 1990MHz para el enlace ascendente, con una ganancia de

18dbi, una apertura horizontal de 60° y una inclinación eléctrica que varía desde 0 grados a 10 grados, permitiendo ajustar el lóbulo de radiación según se requiera. En la Tabla 2.13 se muestra las propiedades eléctricas de la antena a utilizar. Para mayor información la hoja de datos de la antena se encuentra en el ANEXO II adjunto en este documento.

Tabla 2.13 Características de antena celular [32]

Especificaciones electricas			
Bandas de frecuencia, (MHz)	1710 - 1880	1850 - 1990	1920 - 2180
Ganancia (dBi)	17.7	18	18
Apertura horizontal (°)	67	66	64
Inclinación eléctrica (°)	10	10	10
Maxima potencia de entrada (W)	350	350	350
Polarización (°)	+/-45	+/-45	+/-45
Impedancia (Ω)	50	50	50
VSWR / Return Loss (dB)	1.4 / 15.6	1.4 / 15.6	1.4 / 15.6

2.2.3.3 Cables y conectores

Para este diseño se empleará el cable coaxial de 7/8" debido a su bajas pérdidas de señal y bajo coeficiente de reflexión a altas frecuencias, tal como se muestra en la tabla 2.14.

Tabla 2.14 Tabla de atenuación en función de la frecuencia de operación [33].

Frecuencia (MHz)	Atenuación (dB / 100m)	Potencia nominal (KW)
1400	4.53	2
1600	4.87	1.9
1800	5.2	1.8
1900	5.36	1.7
2000	5.51	1.7

En la Figura 2.9 se puede ver una imagen del cable coaxial a utilizar.



Figura 2.9 Cable de Radio Frecuencia [33].

Para este diseño, se emplearán los conectores Din Macho y Din Hembra para cables de 7/8", los cuales presenta pérdidas de inserción menores a 0.15dB, en la Figura 2.10 se puede observar los conectores.



Figura 2.10 Conector para cable coaxial.

2.3 Planificación de red LTE en ATOLL.

Cabe recalcar que para esta planificación se dará mayor enfoque a la Planificación de Radio Frecuencia de la red LTE, donde se tendrá por objetivo incrementar la capacidad de datos en las zonas pobladas de la parroquia de Sangolquí.

Para lograr esto, se usará una adaptación del diagrama de flujo recomendado por ATOLL, tal como se muestra en la Figura 2.11.

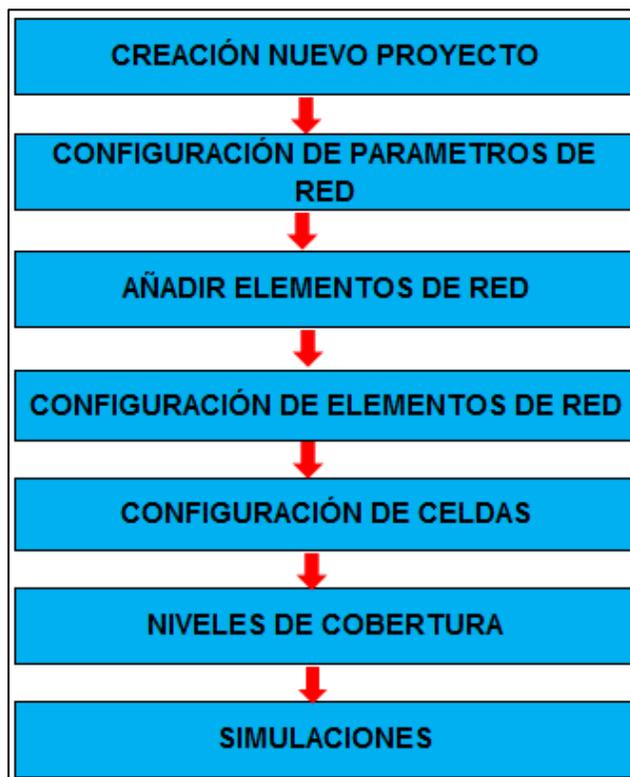


Figura 2.11 Adaptación de diagrama de flujo recomendado por ATOLL [34]

2.3.1 Creación del nuevo proyecto

Para la creación de un nuevo proyecto, en primer lugar se selecciona la pestaña archivo, luego se elige la opción nuevo, posteriormente se escogerá la opción de una plantilla de documento en la que se escogerá la opción LTE, tal como se muestra en la Figura 2.12

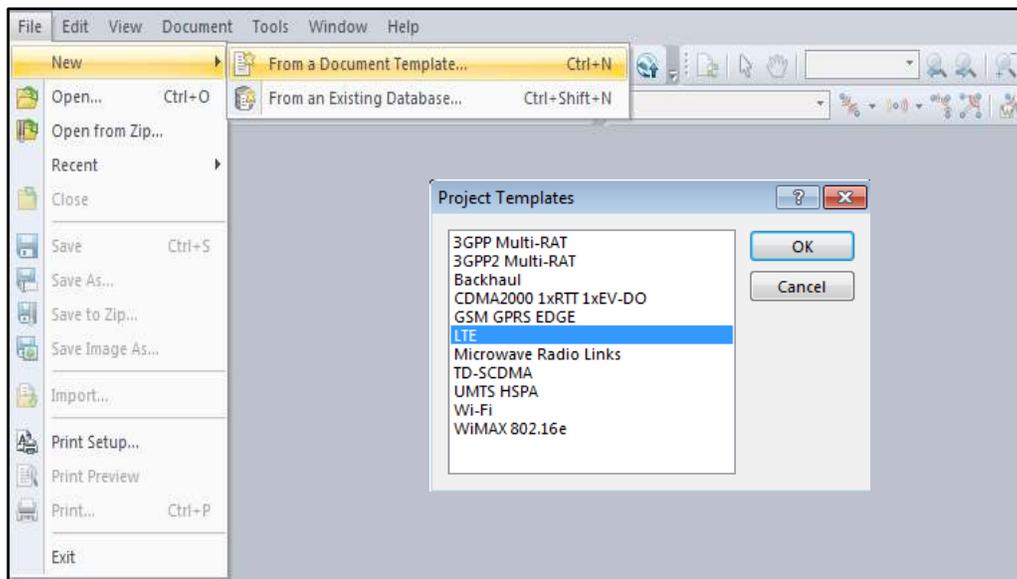


Figura 2.12 Creación de un nuevo proyecto.

Luego de seleccionar la opción LTE aparecerá la plantilla de LTE requerida, aquí se cargarán los archivos: Clutterasset, Heightsasset. Los mismos que tienen información topográfica del área de interés. Estos archivos deberán ser importados al directorio GEO de ATOLL. En la Figura 2.13 se tiene el perfil topográfico de la parroquia de Sangolquí, luego de ser cargada la información geográfica.

La información de los archivos Clutterasset y Heightsasset, se encuentran en la sección de ANEXO III adjunto en este documento.

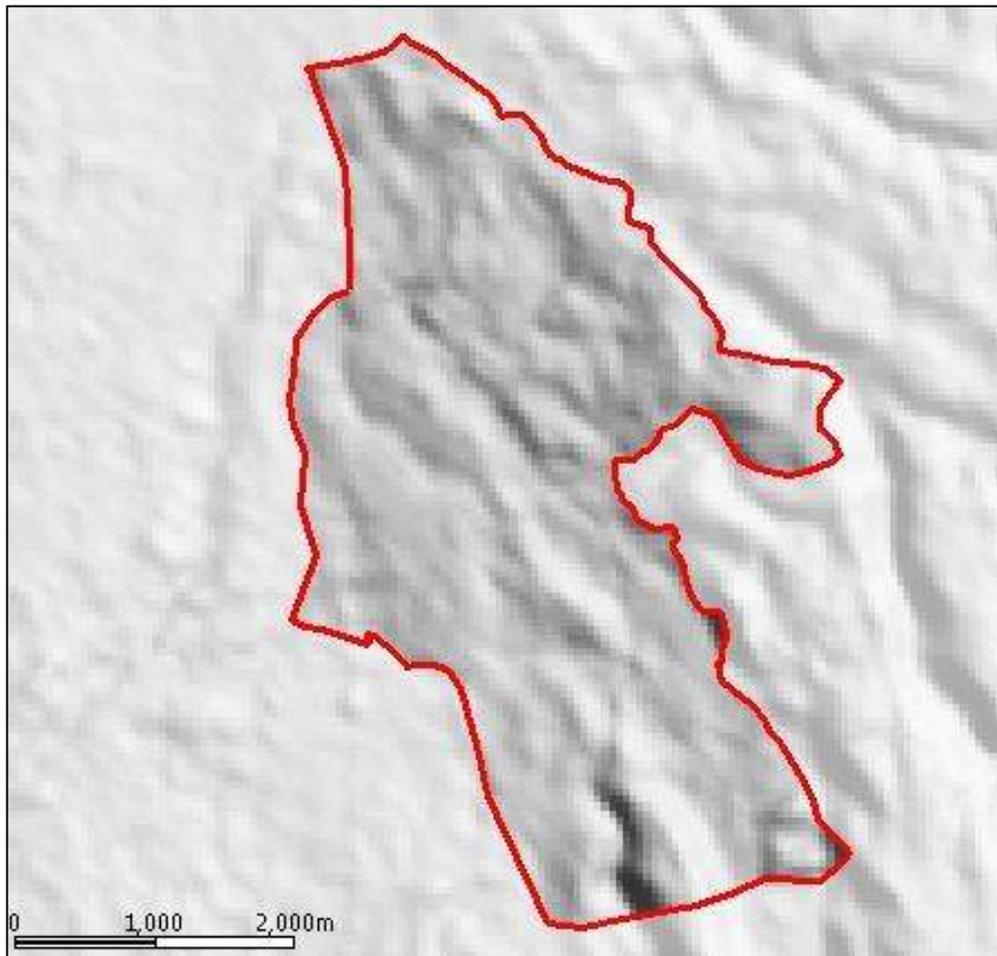


Figura 2.13 Información topográfica

2.3.2 Configuración de parámetros de red

Los parámetros que se deben configurar, antes de iniciar con el diseño de la red LTE son:

- Parámetros de tráfico.
- Ajustes de red de radio.
- Equipos de red de radio

2.3.2.1 Parámetros de tráfico

Entre los parámetros de tráfico a configurar para el diseño de la red son:

2.3.2.1.1 Servicios

Para crear los servicios que la red LTE ofrecerá, se dirigirá a la carpeta parámetros de tráfico, donde se crea y configura cada uno de los servicios que se definieron en la parte

de diseño de la red, con los datos mostrados en la tabla 2.2. En la gráfica 2.14 se observa un ejemplo de los datos que deben ser configurados del servicio web.

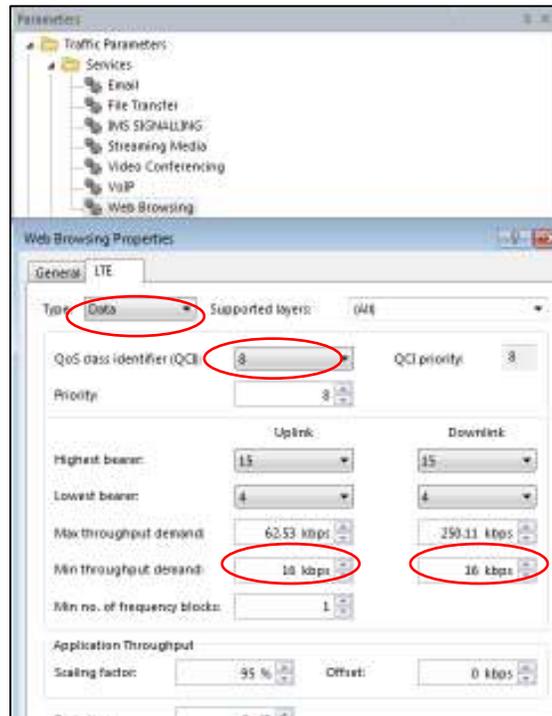


Figura 2.14 Propiedades de servicio de Web.

2.3.2.2 Perfil de usuario

En esta parte se usarán los dos perfiles de usuario presentados por ATOLL, denominados: Usuario de Negocios y Usuario Estándar.

2.3.2.2.1 Usuario estándar

Para este usuario se emplearán los servicios definidos por ATOLL presentados en Tabla 2.15.

Tabla 2.15 Tabla de usuario estándar

Servicios	Terminal	Llamada /hora	Duración (sec.)	UL Volumen (KBytes)	DL Volumen (KBytes)
Internet Movil	MIMO	0.1		700	4,500
Volp	Mobile Terminal	0.2	240		

2.3.2.2.2 Usuario de negocios

Para este usuario se agregarán, los servicios definidos en el diseño de la red. En la Tabla 2.16 se muestran la configuración del mismo.

Tabla 2.16 Tabla de usuario de negocios.

Servicios	Terminal	Llamada/hora	UL Volumen (KBytes)	DL Volumen (KBytes)
Navegación web	MIMO	0.6	62.53	250.11
Video llamada	MIMO	0.2	62.53	62.53
VoIP	MIMO	1	26.9	26.9
Streaming Media	MIMO	0.2	31.26	250.11
Email	MIMO	0.4	140.69	750.34
Transferencia de archivos	MIMO	0.3	140.69	750.34
IMS SIGNALLING	MIMO	5	15.63	15.63
Juegos en linea	MIMO	0.2	31.26	125.06
P2p	MIMO	0.2	250.11	750.34
Video Conferencia	MIMO	0.2	62.53	62.53

2.3.2.3. Ajuste de red de radio.

Se realizarán ajustes a la carpeta plantilla de estación y a la carpeta de frecuencias.

2.3.2.3.1 Plantilla de estación

Esta carpeta contendrá información general que tendrá un sitio al ser creado en ATOLL. En la Tabla 2.17 se muestra los parámetros de la plantilla de estación a ser configurados.

Tabla 2.17 Parámetros a configurar en plantilla de estación.

General	Nombre	5MHz - DDD - Urbano (3 sectores)			
	Sector	3	Radio de Hexagono	600m	
	Tipo de transmisor	Intra-network (Server and Interferer)			
	Antenas	Altura	30m		
		Modelo	HBXX-6516DS-VTM_Port3 +45_04DT_2110		
		Orientación	0°		
		Inclinacion mecanica	2°		
		Inclinación electrica	4°		
	Número de puerto de antenas	transmisión	2		
		recepción	2		
Matriz de pérdida de enlace	Cost-Hata	Radio	10000 m		
		Resolución	50 m		
Transmitter	Especificaciones de equipo	TMA	Default TMA Equipment		
		Alimentador	7/8" at 1900MHz		
		Transmisor	Default eNode-B Equipment		
		Longitud del alimentador	Transmisión	3m	
			Recepción	3m	
		Perdidas	Transmisión	0 dB	
Recepción	0 dB				
LTE	Potencia máxima	46dBm			
	Banda de frecuencia	E-UTRA Banda 2 - 5MHz			
	Distancia de Reuso	4000 m			
	Min RSRP	-110 dBm			
	Máximo número de usuarios	1000			
	Diversidad de transmisión	Descendente	AMS		
Ascendente		AMS			

A continuación se detallará cada uno de los parámetros de la plantilla de estación.

- **Nombre:** aquí se coloca el nombre de la plantilla a usar, en este caso se identificará con el nombre: 5MHz – FDD – Denso Urbano (3 sectores).
- **Número de sectores por sitio:** se definen 3 sectores por sitio para este proyecto.

Radio de Hexágono: es la distancia mínima que cubre una celda, en este caso se usará 600m.

- **Modelo de antena:** el modelo de antena para este proyecto es la HBXX 6516DS –VTM.
- **Azimut de primer sector:** este valor se lo definirá en cero.
- **Altura de la antena respecto a tierra:** aquí se coloca la altura a la que va a ser instalada la antena, dependiendo del objetivo de Radio Frecuencia, para este caso será de 30m.
- **Angulo de inclinación mecánico:** se refiere a la inclinación física de la antena, dependiendo el objetivo de Radio Frecuencia, para este caso será de cero grados.
- **Angulo de inclinación eléctrico:** aquí se coloca la inclinación eléctrica de la antena, dependiendo del objetivo de Radio Frecuencia, para este caso será de cuatro grados.
- **Número de puertos en transmisión y recepción:** Este valor dependerá del tipo de tecnología que se emplee en la antena, para este caso se emplea un MIMO 2*2.
- **Modelo de propagación:** el modelo de propagación seleccionado es COST HATA debido a la frecuencia de operación, en este caso 1900MHz.
- **Máxima potencia de transmisión:** para este caso se usará 40W o 46dBm.
- **Banda de frecuencia:** en este caso se usará la banda 2 con ancho de banda de 5MHz; ver “Banda de frecuencia” página 49.
- **Min RSRP:** aquí se cambiará el valor de -140dBm por -110dBm, debido a que este es el mínimo valor de sensibilidad que reconoce la RRU que se utilizará en este diseño.
- **Scheduler:** en este caso se usará como método de asignación de recursos al Max C/I, porque permite obtener la mayor capacidad de la red.
- **Diversity support:** para este caso se usará la transmisión AMS debido a que es una combinación entre la multiplexación espacial¹⁷ y la diversidad de transmisión.

2.3.2.4 Banda de frecuencia

Para esta parte, primero se creará una banda de frecuencias en ATOLL con la información presentada en la sección de bandas de frecuencia a usar, tal como se muestra en la Tabla 2.18. Donde se configura, el tipo de multiplexación, frecuencia de

¹⁷ Multiplexación espacial

inicio para el enlace ascendente, frecuencia de inicio para el enlace descendente, ancho de banda y el número de Resource Block¹⁸ como parámetros importantes.

Tabla 2.18 Configuración de banda de frecuencia a usar.

Nombre	Metodo de duplexación	FDD: DL Inicio Frecuencia (MHz)	FDD: UL Inicio Frecuencia (MHz)	Ancho de canal (MHz)	Número bloques de frecuencia	Primer canal	Último canal
E-UTRA Band 2 - 5MHz	FDD	1,955.20	1,959.80	5	25	661	686

2.3.3 Equipos de red de radio

En esta parte solo se realizarán ajustes a la carpeta de antenas.

2.3.3.1 Antenas

Debido a que la versión de ATOLL con la que se está trabajando, no permite editar la inclinación eléctrica de los modelos de antena con los que cuenta ATOLL y que tampoco existe el modelo de antena HBXX-6516DS-VTM, se procederá a descargar los modelos de propagación de la antena antes mencionada [28], para luego ser importados a la base de antenas de ATOLL. En la Tabla 2.19 se muestra las antenas que deberán estar cargadas en la base de ATOLL para su posterior uso en el diseño de la red LTE.

Tabla 2.19 Antena HBXX-6516.

Nombre	Ganancia (dBi)	Fabricante	Comentarios	Ancho de haz de media Potencia	Min Frecuencia (MHz)	Max Frecuencia (MHz)
HBXX-6516DS-VTM_Port 1 +45_00DT_2110	17.75	CommScope	4-port sector antenna, 4x 1710-2180 MHz, 65 deg. HPBW, RET compatible	65°	1,920	2,180
HBXX-6516DS-VTM_Port 1 +45_01DT_2110	17.88	CommScope	4-port sector antenna, 4x 1710-2180 MHz, 65 deg. HPBW, RET compatible	65°	1,920	2,180
HBXX-6516DS-VTM_Port 1 +45_02DT_2110	18	CommScope	4-port sector antenna, 4x 1710-2180 MHz, 65 deg. HPBW, RET compatible	65°	1,920	2,180
HBXX-6516DS-VTM_Port 1 +45_03DT_2110	18	CommScope	4-port sector antenna, 4x 1710-2180 MHz, 65 deg. HPBW, RET compatible	65°	1,920	2,180

¹⁸Resource Block (RB) Es la unidad de recurso más pequeña que se puede entregar a un usuario.

2.3.3.2 Añadir elementos de red

En esta sección se crearán los e-NodeB calculados en la parte de dimensionamiento de la red LTE, se seleccionará la plantilla de estación 5MHz – FDD – Dense Urban (3 sectores) configurada anteriormente, tal como se muestra en la Figura 2.15. Como resultado del dimensionamiento de la red LTE, se obtuvieron 25 sectores, dando un total de 8 eNodeB de acuerdo a los cálculos realizados en la parte de “Dimensionamiento de la red”.

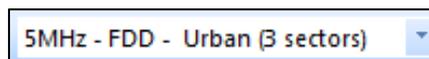


Figura 2.15 Plantilla de estación pre-configurada

Antes de distribuir los eNodeB en la parroquia de Sangolquí (área de interés), primero se dividirá en pequeños polígonos que cubran todas las zonas pobladas. Producto de esta división se obtuvo 11 polígonos los cuales serán llamados de la siguiente manera: SANGOLQUI, CASHAPAMBA, COMPLEJO_EJERCITO, ESPE, SANGOLQUI_CENTRO, SANTAMARIA, CLUB_CHILLOS, SELVA_ALEGRE, ATAHUALPA, 10_DE_DICIEMBRE, Y GANGOTENA. En la Figura 2.18 se muestra la división de la parroquia de Sangolquí.

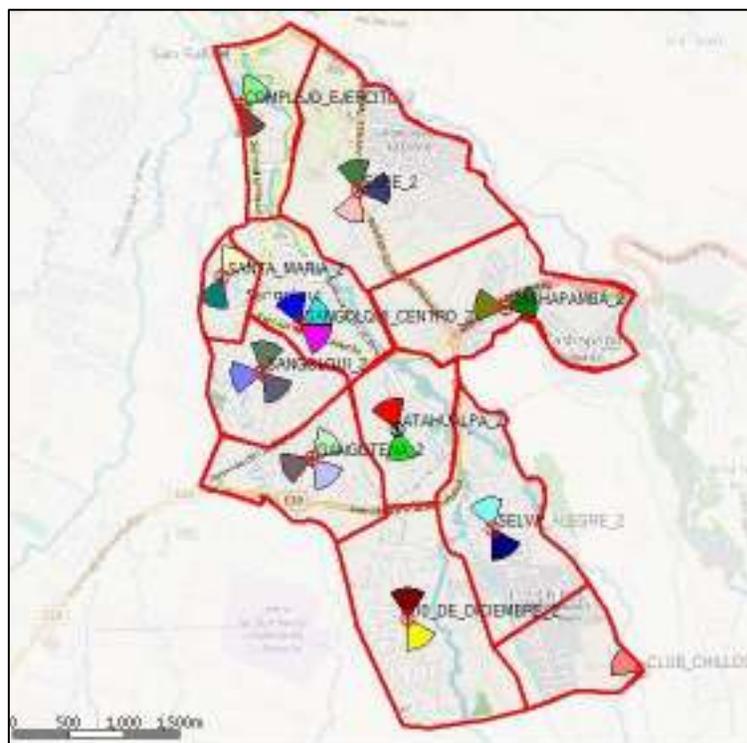


Figura 2.16 Ubicación de e-NodeB en área de interés.

Una vez que se ha distribuido el área de interés en polígonos más pequeños, se asignará un eNodeB por cada polígono, obteniendo un total de 11 eNodeB. Debido a que en la

parte de “*Dimensionamiento de la red*” se calculó un total de 8 eNodeB con 3 sectores cada uno. Se procede a distribuir los 25 sectores de la siguiente manera:

- Cuatro eNodeB con 3 sectores.
- Seis eNodeB con 2 sectores.
- Un eNodeB con 1 sector.

2.3.3.3 Configuración de elementos de red

Luego de ubicar los e-NodeB, se analizará la geografía de cada uno de los polígonos a cubrir. Esto con el fin de encontrar la mejor configuración de Radio Frecuencia para la red LTE y así cubrir todas las zonas pobladas de la Parroquia de Sangolquí. En esta parte se configurará cada uno de los transmisores con los parámetros de Radio Frecuencia presentados en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20 Parámetros de Radio Frecuencia.

Transmisor	Antena	Altura (m)	Orientación (°)	Inclinación mecánica (°)	Inclinación eléctrica (°)
10_DE_DICIEMBRE_2A	-6516DS-VTM_Port 2 -45_02DT	40	150	3	5
10_DE_DICIEMBRE_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_04DT	24	0	4	8
CASHAPAMBA_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_04DT	30	80	0	4
CASHAPAMBA_2B	-6516DS-VTM_Port 2 -45_03DT	30	275	3	6
CLUB_CHILLOSB_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_01DT	35	290	3	4
COMPLEJO_EJERCITO_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_01DT	24	40	2	3
COMPLEJO_EJERCITO_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_00DT	24	160	1	1
ESPE_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_01DT	30	350	2	3
ESPE_2B	-6516DS-VTM_Port 1 +45_02DT	30	85	1	3
ESPE_2C	-6516DS-VTM_Port 3 +45_04DT	30	200	2	6
GANGOTENA_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_03DT	24	45	4	7
GANGOTENA_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_04DT	24	140	3	7
GANGOTENA_2C	-6516DS-VTM_Port 3 +45_01DT	24	250	1	2
SANGOLQUI_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_03DT	24	10	3	9
SANGOLQUI_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_02DT	24	140	3	5
SANGOLQUI_2C	-6516DS-VTM_Port 3 +45_02DT	24	260	1	3
SANGOLQUI_CENTRO_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_04DT	30	60	4	8
SANGOLQUI_CENTRO_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_02DT	30	125	3	7
SANGOLQUI_CENTRO_2C	-6516DS-VTM_Port 3 +45_02DT	30	340	2	4
SANTA_MARIA_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_03DT	18	35	6	9
SANTA_MARIA_2C	-6516DS-VTM_Port 3 +45_04DT	18	200	1	5
SELVA_ALEGRE_2A	-6516DS-VTM_Port 3 +45_05DT	36	345	4	9
SELVA_ALEGRE_2B	-6516DS-VTM_Port 3 +45_00DT	36	150	2	2
9_DE_AGOSTO_2A	H-6565A-VTM_Port 3 +45_03DT	24	340	2	5
9_DE_AGOSTO_2B	H-6565A-VTM_Port 3 +45_04DT	21	170	4	8

2.3.3.4 Configuración de celdas.

En el proceso de configuración de la celda se deben realizar los siguientes pasos:

- Asignación de PCI
- Asignación de condiciones de carga.

2.3.3.4.1 Asignación de PCI

En esta sección se asignará un Identificador de Capa Física (**PCI**)¹⁹, el mismo que deberá ser asignado de manera adecuada para no causar interferencia con los recursos de otra celda vecina. Por tal motivo se realizará una planificación de Identificadores de Capa Física, utilizando una herramienta de ATOLL denominada Planificación Automática de Frecuencia (AFP). Esta herramienta asignará de manera automática la combinación entre el PSS ID²⁰ y el SS ID²¹. En la Tabla 2.21 y Tabla 2.22 se muestran los resultados obtenidos luego de aplicar la herramienta Planificación Automática de Frecuencias de ATOLL.

Tabla 2.21 Asignación de PCI por celda parte1.

Transmisor	Identificador de Capa Física (PCI)	PSS ID	SSS ID
10_DE_DICIEMBRE_2A	0	0	0
10_DE_DICIEMBRE_2B	1	1	0
ATAHUALPA_2_A	7	1	2
ATAHUALPA_2_B	8	2	2
CASHAPAMBA_2A	5	2	1
CASHAPAMBA_2B	3	0	1
CLUB_CHILLOSB_2A	2	2	0
COMPLEJO_EJERCITO_2A	500	2	166
COMPLEJO_EJERCITO_2B	499	1	166
ESPE_2A	15	0	5
ESPE_2B	16	1	5
ESPE_2C	17	2	5

¹⁹ PCI (Identificador de capa Física): Este valor se forma por la combinación de las señales PSS y SS, cuyo valor varía de 0 a 503.

²⁰ PSS (Señal de identificación primaria): Es una señal asincrónica que varía de 0 a 2.

²¹ SS (Señal secundaria): Es una señal asincrónica cuyo valor varía de 0 a 167.

Tabla 2.22 Asignación de PCI por celda parte 2.

Transmisor	Identificador de Capa Física (PCI)	PSS ID	SSS ID
GANGOTENA_2A	12	0	4
GANGOTENA_2B	14	2	4
GANGOTENA_2C	13	1	4
SANGOLQUI_2A	19	1	6
SANGOLQUI_2C	18	0	6
SANGOLQUI_CENTRO_2A	22	1	7
SANGOLQUI_CENTRO_2B	23	2	7
SANGOLQUI_CENTRO_2C	21	0	7
SANTA_MARIA_2B	9	0	3
SANTA_MARIA_2C	11	2	3
SELVA_ALEGRE_2A	106	1	35
SELVA_ALEGRE_2B	105	0	35

2.3.3.4.2 Condiciones de carga de la celda

Con el fin de realizar predicciones más realistas, se creará una simulación basada en mapas de tráfico y se definirá un máximo número de usuarios por celda.

2.3.3.4.2.1 Mapa basado en el tráfico de transmisor y tráfico de servicios.

En este modelo basado en el tráfico de transmisor y en el tráfico de servicios, el tráfico se extiende por la mejor área de cobertura del transmisor [35]. Este modelo se crea llenando cada una de las tasas de datos requeridos por un determinado servicio en cada transmisor de la red LTE. En la tabla 2.23 y tabla 2.24 se observa la tasa de datos que requiere cada servicio almacenada en cada uno de los transmisores que conforman la red LTE.

Tabla 2.23 Modelo de tráfico basado en tráfico de transmisor y tráfico de servicios para el enlace ascendente (UL).

Transmisor	Buscador Web (UL) (kbps)	Streaming Media (UL) (kbps)	Video Conferencia (UL) (kbps)	VoIP (UL) (kbps)	IMS Señalización (UL) (kbps)	Email (UL) (kbps)	File Transfer (UL) (kbps)
10_DE_DICIEMBRE_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
10_DE_DICIEMBRE_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
ATAHUALPA_2_A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
ATAHUALPA_2_B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
CASHAPAMBA_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
CASHAPAMBA_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
CLUB_CHILLOS_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
COMPLEJO_EJERCITO_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
COMPLEJO_EJERCITO_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
ESPE_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
ESPE_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
ESPE_2C	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
GANGOTENA_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
GANGOTENA_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
GANGOTENA_2C	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANGOLQUI_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANGOLQUI_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANGOLQUI_2C	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANGOLQUI_CENTRO_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANGOLQUI_CENTRO_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANGOLQUI_CENTRO_2C	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANTA_MARIA_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SANTA_MARIA_2C	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SELVA_ALEGRE_2A	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69
SELVA_ALEGRE_2B	62.53	31.26	62.53	26.9	15.63	140.69	140.69

A cada celda que forma parte de la red se le asignó el mismo valor de throughput, debido a que para este estudio, en el proceso de diseño se tomó una relación pico promedio para un Ambiente Denso Urbano.

Tabla 2.24 Modelo de tráfico basado en tráfico de transmisor y tráfico de servicios para el enlace descendente (DL).

Transmisor	Buscador Web (DL) (kbps)	Streaming Media (DL) (kbps)	Video Conferencia (DL) (kbps)	VoIP (DL) (kbps)	IMS Señalización (DL) (kbps)	Email (DL) (kbps)	File Transfer (DL) (kbps)
10_DE_DICIEMBRE_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
10_DE_DICIEMBRE_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
ATAHUALPA_2_A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
ATAHUALPA_2_B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
CASHAPAMBA_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
CASHAPAMBA_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
CLUB_CHILLOSB_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
COMPLEJO_EJERCITO_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
COMPLEJO_EJERCITO_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
ESPE_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
ESPE_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
ESPE_2C	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
GANGOTENA_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
GANGOTENA_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
GANGOTENA_2C	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANGOLQUI_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANGOLQUI_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANGOLQUI_2C	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANGOLQUI_CENTRO_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANGOLQUI_CENTRO_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANGOLQUI_CENTRO_2C	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANTA MARIA_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SANTA MARIA_2C	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SELVA_ALEGRE_2A	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34
SELVA_ALEGRE_2B	250.11	250.11	62.53	26.9	15.63	750.34	750.34

A cada celda que forma parte de la red se le asignó el mismo valor de throughput, debido a que para este estudio, en el proceso de diseño se tomó una relación pico promedio para un Ambiente Denso Urbano.

2.3.3.4.3 Mapa de tráfico basado en la clase de entorno

Este mapa de tráfico se basa en los entornos que ATOLL posee en su base de datos. Para el caso de la Parroquia de Sangolquí se procederá a dividirlo en 3 tipos de entornos, los cuales son: Denso Urbano, Urbano y Suburbano.

En la Figura 2.17 se muestra los entornos asignados a esta Parroquia.

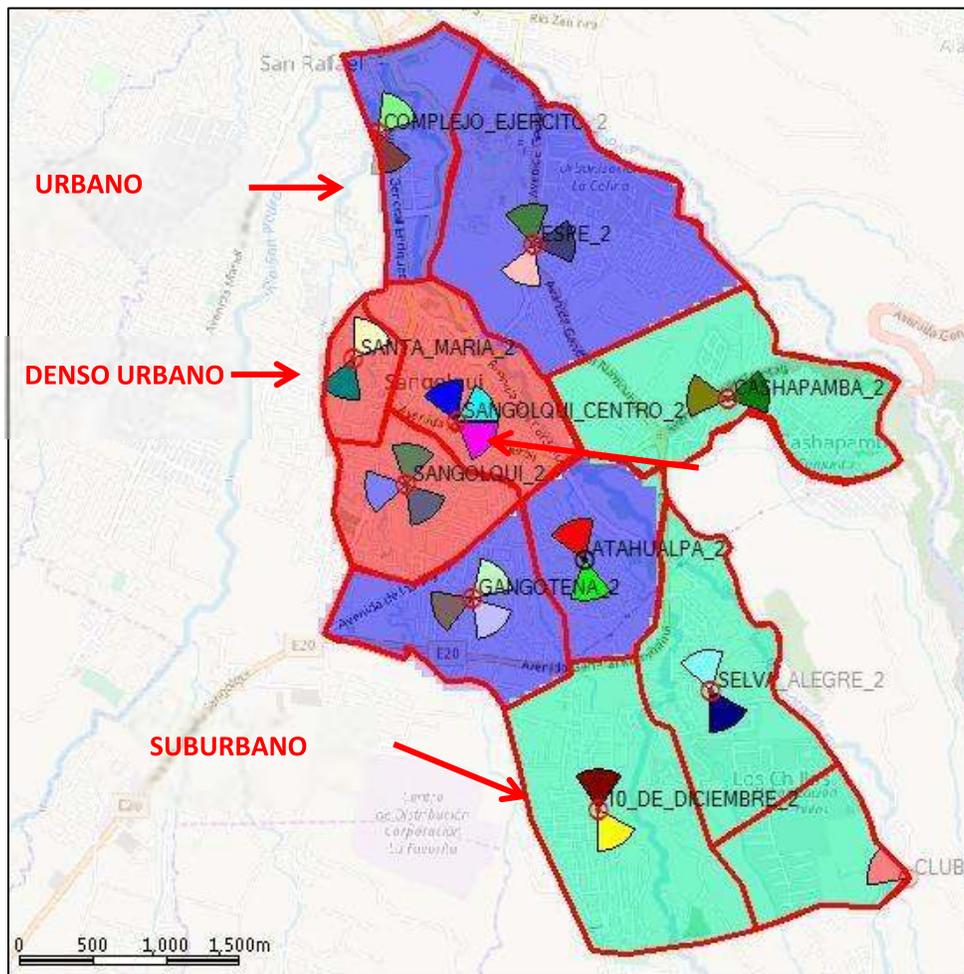
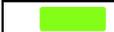
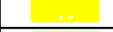


Figura 2.17 División de entornos de la parroquia de Sangolquí.

2.3.3.5 Predicción de cobertura a nivel de señal

Aquí se configurarán los temáticos de throughput, nivel de señal y calidad de señal, tal como se muestra en la Tabla 2.23.

Tabla 2.25 Temáticos a utilizar en la presentación de las simulaciones

Throughput (Kbps)		Nivel de Señal (dBm)		Calidad de Señal (dB)	
	≥ 21000		≥ -70		≥ 30
	≥ 18000		≥ -80		≥ 20
	≥ 15000		≥ -90		≥ 10
	≥ 12000		≥ -100		≥ 0
	≥ 9000		≥ -110		≥ -10
	≥ 6000				
	≥ 3000				
	≥ 0				

3 PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas y simulaciones realizadas para el proceso de diseño de la red LTE. A continuación, se indica de manera detallada cada paso a seguir para el análisis final de los resultados.

- Prueba de drive test realizado a la red GSM 1900 en la parroquia de Sangolquí.
- Simulación de la red GSM 1900 actual en ATOLL.
- Comparación de resultados entre el drive test y las simulaciones de red GSM 1900.
- Simulaciones obtenidas en el diseño de la red LTE para la parroquia de Sangolquí.
- Comparación entre la simulación de la nueva red LTE y el drive test GSM 1900 realizado en la parroquia de Sangolquí.
- Análisis de eliminar portadora GSM 1900.

Es importante mencionar que las pruebas fueron realizadas en escenarios controlados, es decir, se delimitó una zona de estudio mediante el señalamiento de una ruta a seguir. De esta manera, las muestras obtenidas estarán acorde a los requerimientos de diseño de la nueva red LTE para la parroquia de Sangolquí.

3.1 Pruebas de drive test realizado a la red GSM 1900

En la parroquia de Sangolquí se realizó un drive test, con la finalidad de conocer la tasa de datos máxima que se encuentra entregando la red GSM 1900 actual. Para esto se analizan los siguientes parámetros evaluados en los recorridos:

- Tecnología a evaluar
- Niveles de cobertura (RxLev)
- Esquema de Modulación y Codificación MCS en EDGE
- Tasa de datos efectiva (Throughput)
- Distribución de servidores (BCCH)

3.1.1 Tecnología a evaluar

La tecnología que se evalúa en el presente trabajo de titulación es GSM en la banda de 1900 para la parroquia de Sangolquí. A continuación, en la Figura 3.1 se muestra la ruta recorrida.

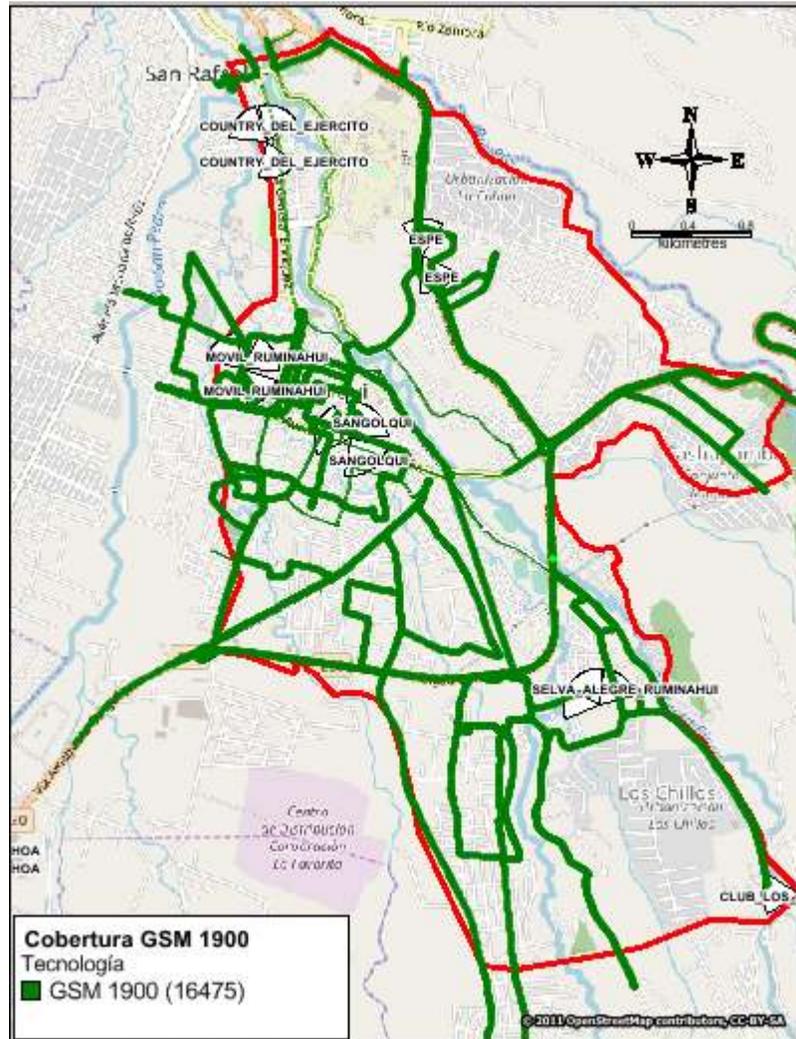


Figura 3.1 Tecnología evaluada GSM 1900

3.1.2 Niveles de cobertura (RxLev)

La manera de medir la potencia recibida por el equipo de usuario (móvil) en la red GSM es mediante el parámetro denominado RxLev (Recive Level). En la Figura 3.2 se muestran los niveles de cobertura a lo largo de la parroquia de Sangolquí. Aquí se analizarán tres zonas de interés.

- Zona 1: en esta zona se encuentran presentes dos BTS, sin embargo, existen muestras con niveles bajos de cobertura. Posibles causas para este problema encontrado son por obstrucciones cerca de las BTS (por ejemplo edificios o

árboles) o por celdas que se encuentran utilizando el mismo BCCH en las proximidades o lejanías de las BTS.

- Zona 2: las muestras encontradas dentro de esta zona indican niveles malos de cobertura, una posible causa para este problema es por la disposición de la BTS con respecto a la zona de estudio, es decir, solo se encuentra una celda sirviendo a esta zona y además solo se consigue cubrir con el lateral de la misma.
- Zona 3: en esta zona los niveles de cobertura no son aceptables, esto se debe a la ausencia de BTS cercanas a esta zona de estudio.

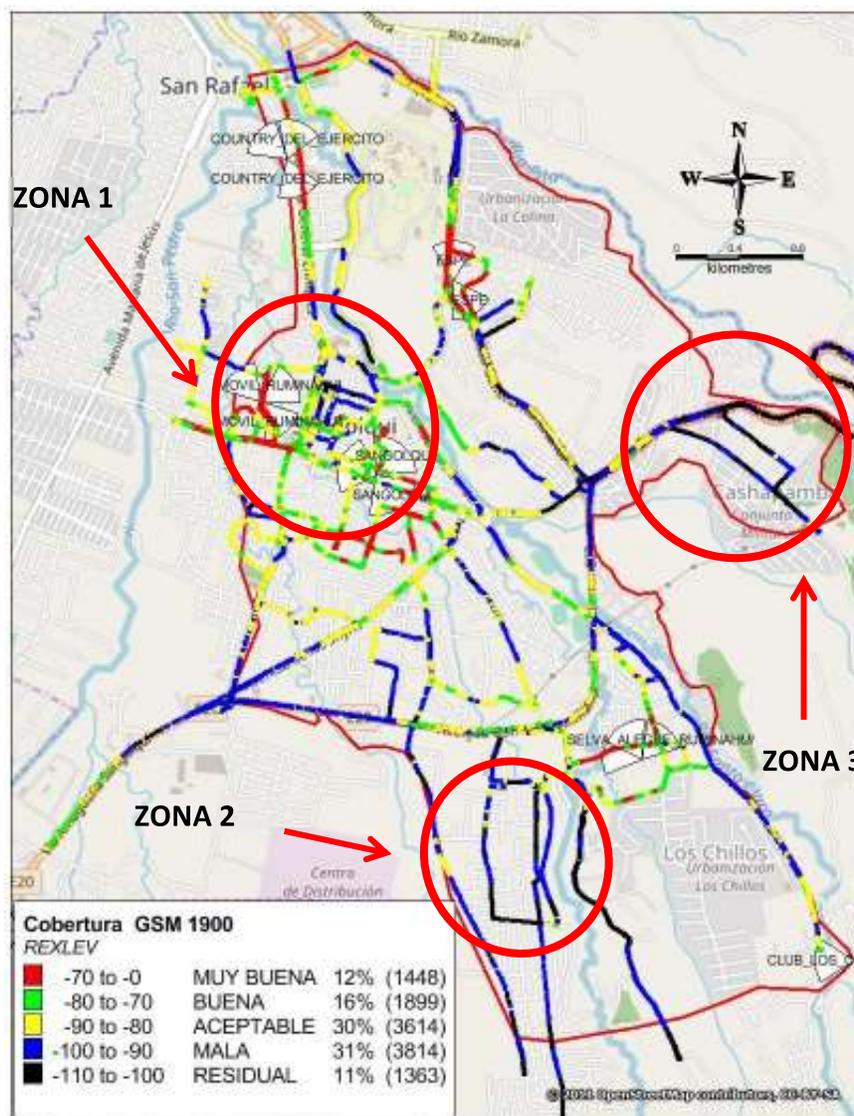


Figura 3.2 Niveles de cobertura (*RxLev*).

Los niveles de cobertura en la parroquia de Sangolquí son aceptables ya que se tiene un promedio de cobertura de -86.62dBm, a pesar de existir zonas sin cobertura.

3.1.3 Esquema de Modulación y Codificación (MCS).

Una manera de medir la calidad de la señal al realizar una prueba de datos en GSM es a través de los esquemas de Modulación y Codificación (MCS), la cual indica la cantidad de datos que se puede obtener de la red. A mayor MCS, mayor la tasa de datos que se recibe de la red y a menor modulación menor la tasa de datos que se recibe de la red. En la Figura 3.3 se muestran los esquemas de modulación y codificación a lo largo de la parroquia de Sangolquí.

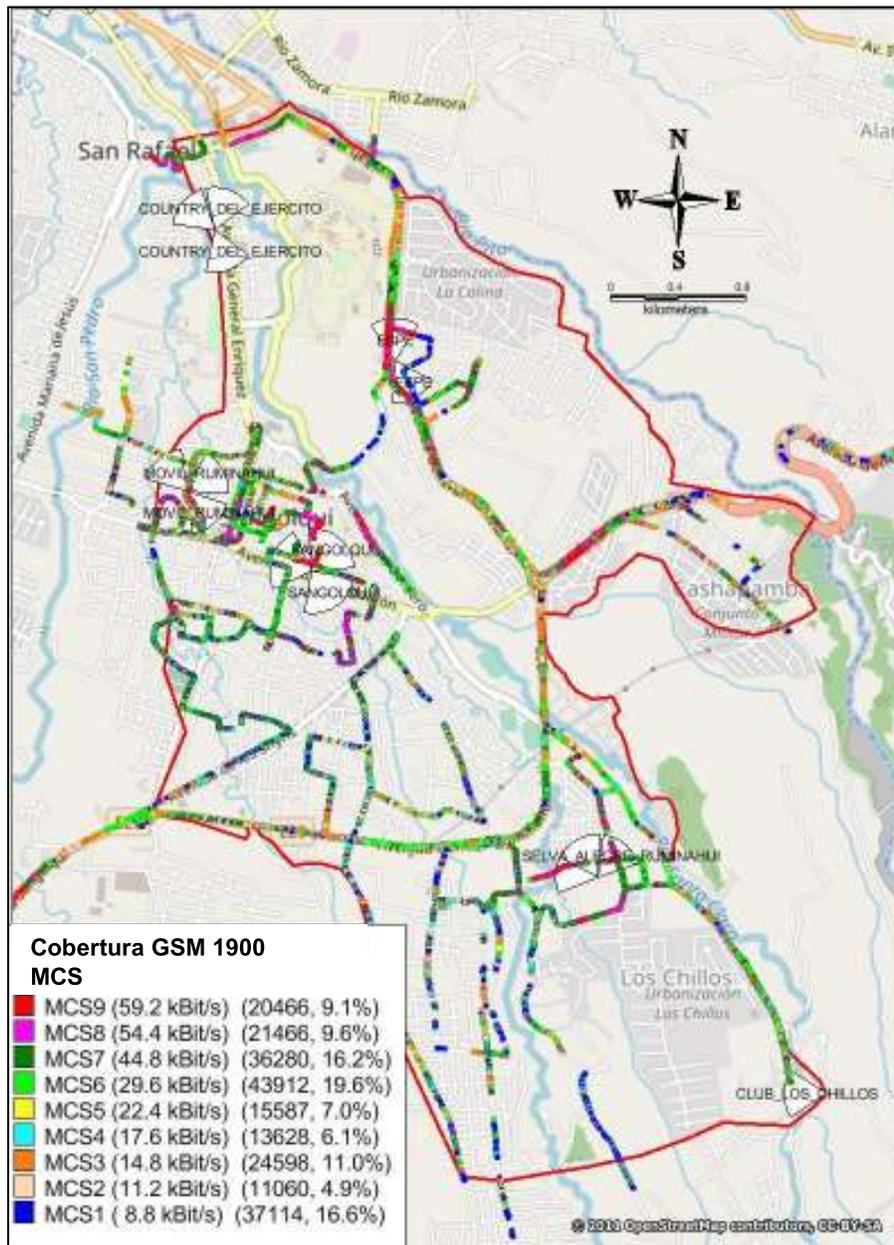


Figura 3.3 Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

3.1.4 Tasa de datos efectiva (Throughput)

La tasa de datos registrada por el equipo de usuario en general es baja, ya que se obtuvo el 58% de muestras con velocidades que varían entre 0Kbps y 30 Kbps. En la Figura 3.4 se presenta la tasa efectiva de datos a lo largo de la ruta seleccionada para la parroquia de Sangolquí. En las tres zonas presentadas se puede observar bajas velocidades producto de la mala cobertura.

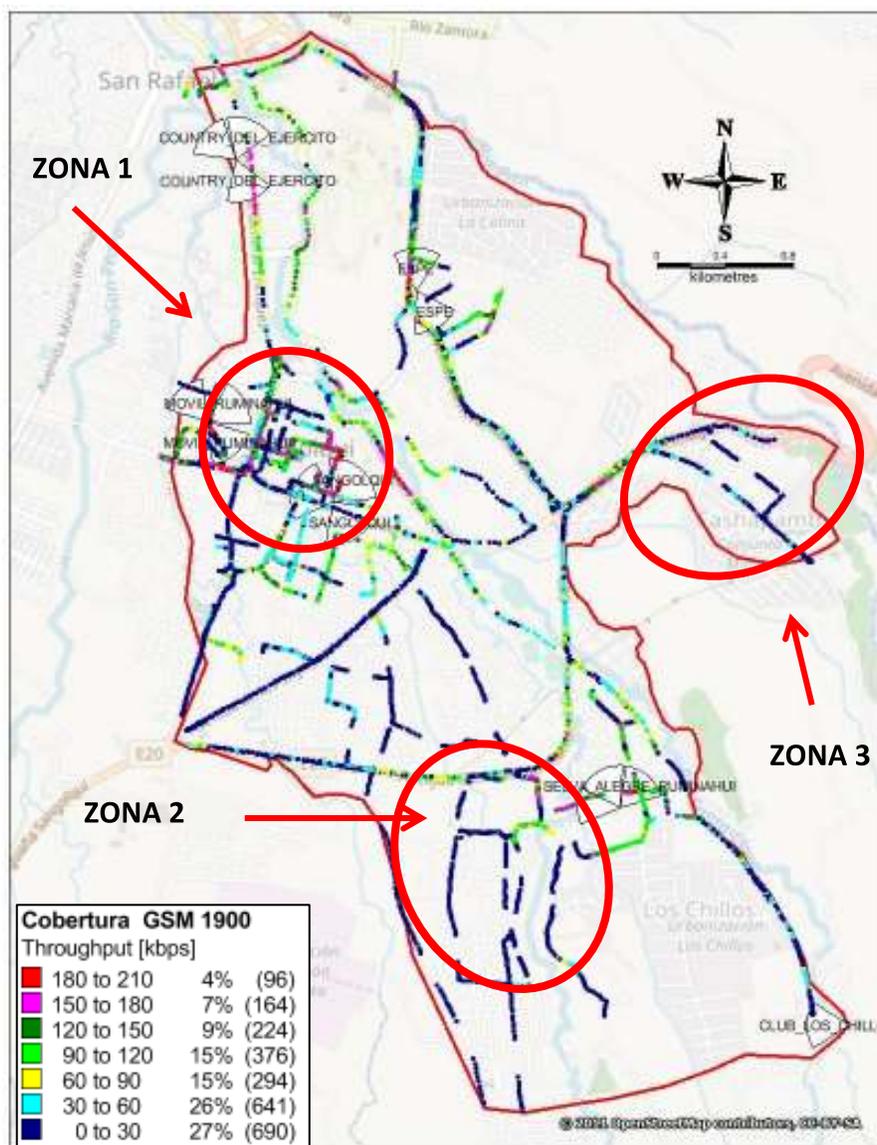


Figura 3.4 Tasa de datos efectiva (*Throughput*).

Como resultado de la evaluación de drive test, se obtiene una tasa de datos promedio de 72.77Kbps que ofrece la red GSM 1900.

3.1.5 Distribución de servidores (BCCH).

Conocer la distribución de antenas y que área cubre cada uno de ellas, permite determinar la causa de posibles problemas de cobertura que existen en la parroquia de Sangolquí. En la Figura 3.5 se puede concluir que los problemas de baja cobertura en la zona 1 son producto de la sobre propagación del servidor con BCCH 596 (SANGOLQUI_2A), ya que se encuentra interfiriendo al servidor con BCCH 603 (SANGOLQUI_2C). En la zona 2 se puede concluir que los problemas de baja cobertura se deben a una obstrucción ya que no existen muestras del servidor con BCCH 602 (SELVA_ALEGRE_2B) que debería estar presente en la zona de interés y los problemas detectados en la zona 3 se debe a la interferencia producida por los servidores lejanos con BCCH 600.

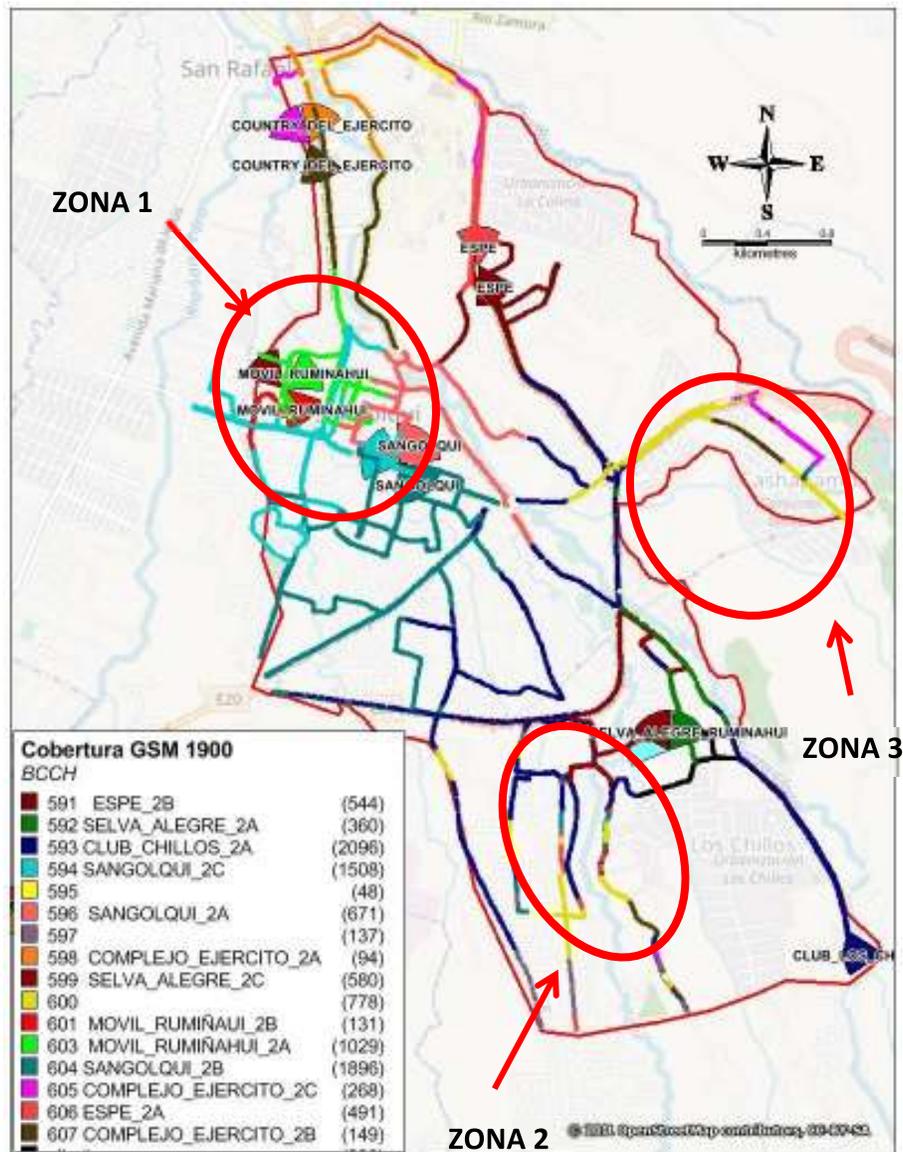


Figura 3.5 Distribución de servidores (BCCH).

3.2 Simulación de la red GSM 1900 actual en ATOLL

En esta sección, se presenta la simulación realizada para la red GSM 1900 existente. Cabe recalcar que las simulaciones realizadas cuentan con los parámetros de Radio Frecuencia de la red GSM 1900 comercial. En las simulaciones se analizarán los siguientes parámetros:

- Niveles de cobertura (*RxLev*)
- Esquema de Modulación y Codificación (*MCS*).
- Tasa de datos efectiva (*Throughput*)
- Distribución de servidores (*BCCH*).

3.2.1 Niveles de cobertura (*RxLev*)

Se procede a realizar la simulación de cobertura dentro del polígono previamente determinado, se debe tener presente que los valores ingresados corresponden a los encontrados actualmente en los sitios. En la Figura 3.6 se presentan las coberturas que entregarán cada uno de los sectores.

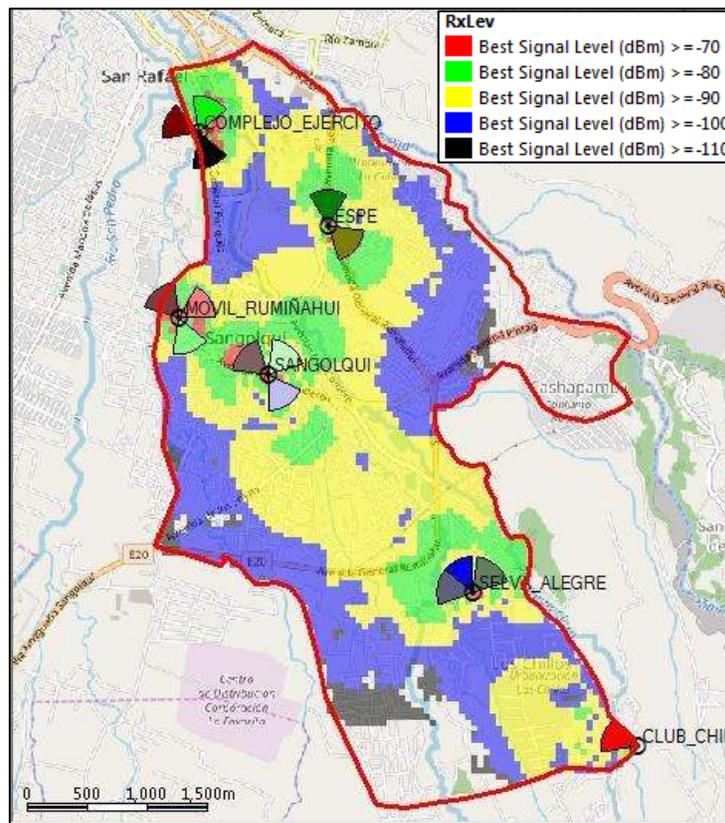


Figura 3.6 Simulación de los niveles de cobertura (*RxLev*).

En la Figura 3.7 se pueden observar las estadísticas de los niveles de cobertura.

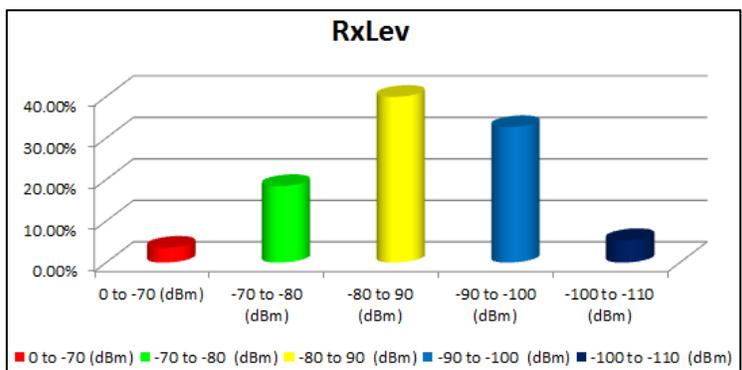


Figura 3.7 Estadísticas de niveles de cobertura (RxLev).

3.2.2 Esquema de Modulación y Codificación (MCS)

Como se mencionó antes, los esquemas de modulación y codificación influyen directamente en la tasa de datos efectiva que se puede alcanzar. A continuación, se presenta la Figura 3.8 con los valores de MCS encontrados en la simulación realizada.

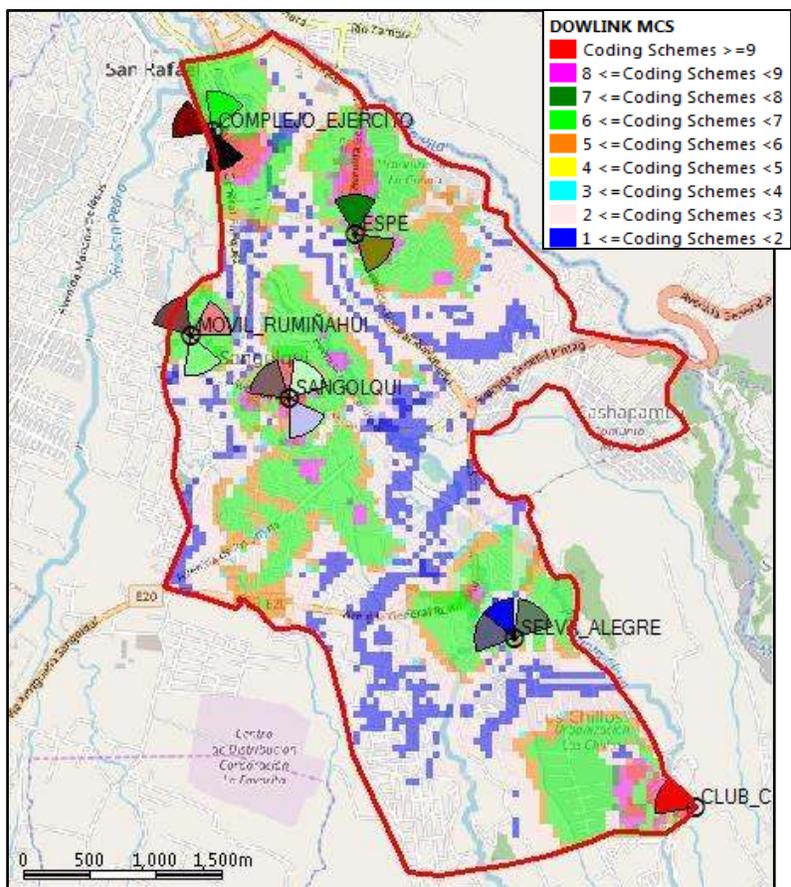


Figura 3.8 Simulación de esquema de modulación (MCS).

En la Figura 3.9 se pueden observar las estadísticas del esquema de codificación y modulación.

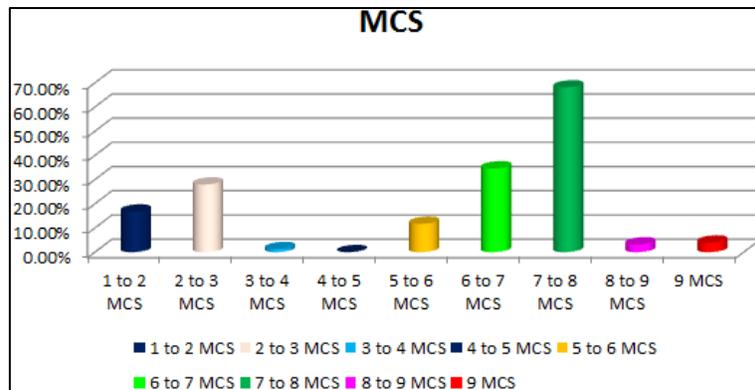


Figura 3.9 Estadísticas de esquema de codificación de modulación.

3.2.3 Tasa de datos efectiva (*Throughput*)

Esta simulación permitirá conocer la tasa de datos efectiva que se podría alcanzar en la práctica. En la Figura 3.10 se presentan los valores de *throughput* alcanzados por la simulación realizada.

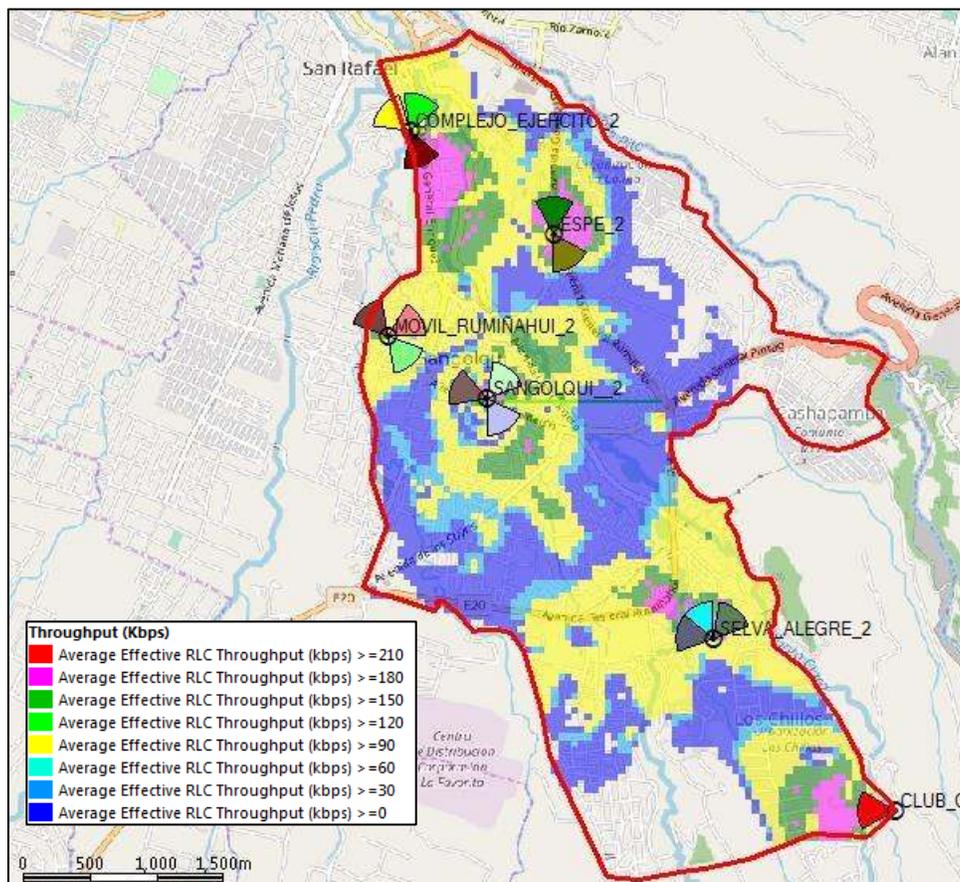


Figura 3.10 Simulación de tasa de datos efectiva (*throughput*)

En la Figura 3.11 se pueden observar las estadísticas de throughput entregada por el simulador.

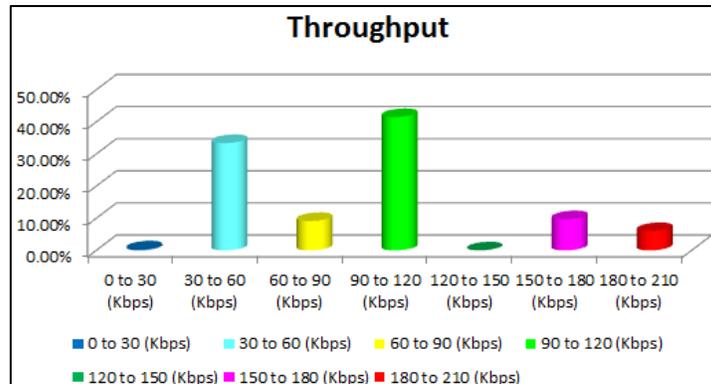


Figura 3.11 Estadísticas de tasa de datos efectiva (throughput).

3.2.4 Distribución de servidores (BCCH)

La distribución de las celdas servidoras permite conocer el alcance que cada celda tendrá dentro del polígono asignado, de esta manera prever posibles interferencias entre celdas vecinas. En la Figura 3.12 se presenta el nombre de cada BTS con sus respectivas celdas.

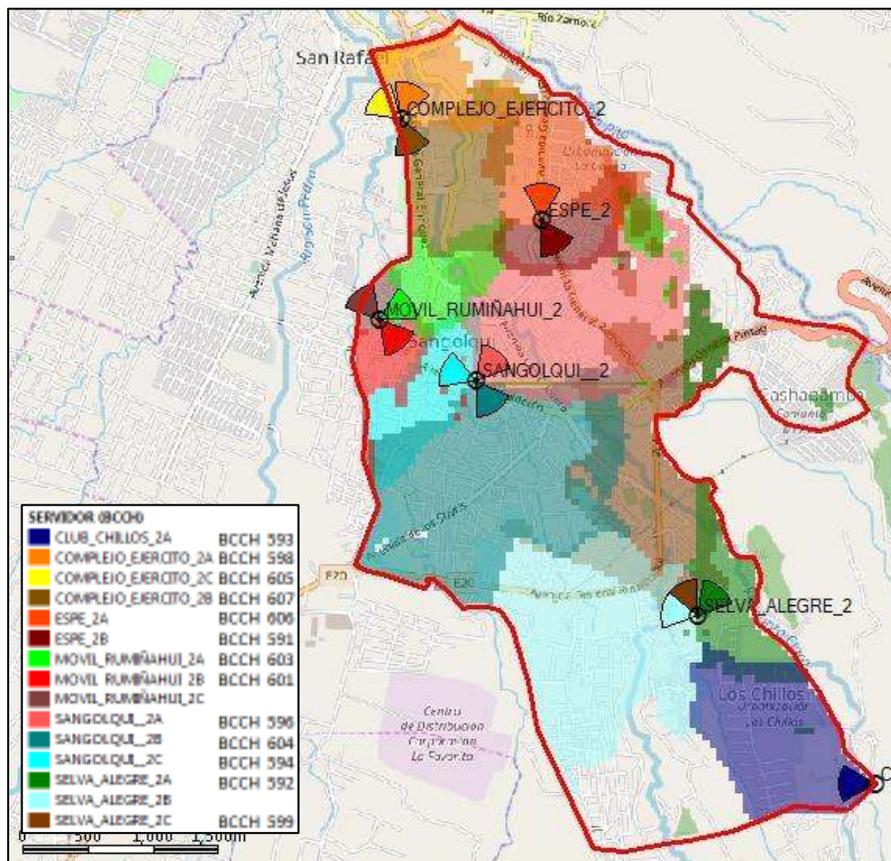


Figura 3.12 Simulación de la distribución de servidores (BCCH).

3.3 Comparación de resultados entre el drive test y las simulaciones de la red GSM 1900

En esta sección, se realizará la comparación entre los datos obtenidos durante la realización del drive test y los datos arrojados por el programa computacional al realizar las simulaciones. A continuación, se presentan los parámetros a comparar:

- Cobertura (*RxLev*)
- Tasa de datos efectiva (*Throughput*)

3.3.1 Cobertura (*RxLev*)

Al comparar la cobertura de la tecnología GSM en la banda de 1900, se aprecia que en su mayoría las muestras recolectadas durante el drive test y la simulación realizadas por el programa computacional ATOLL guardan similitud; excepto para la zona 1 donde se encuentran muestras con baja cobertura en el drive test realizado, mientras que en la simulación se tiene un escenario diferente, es decir, la simulación presenta niveles óptimos de cobertura y en el recorrido realizado se encuentran niveles no adecuados de cobertura a pesar de encontrarse cerca de las BTS.

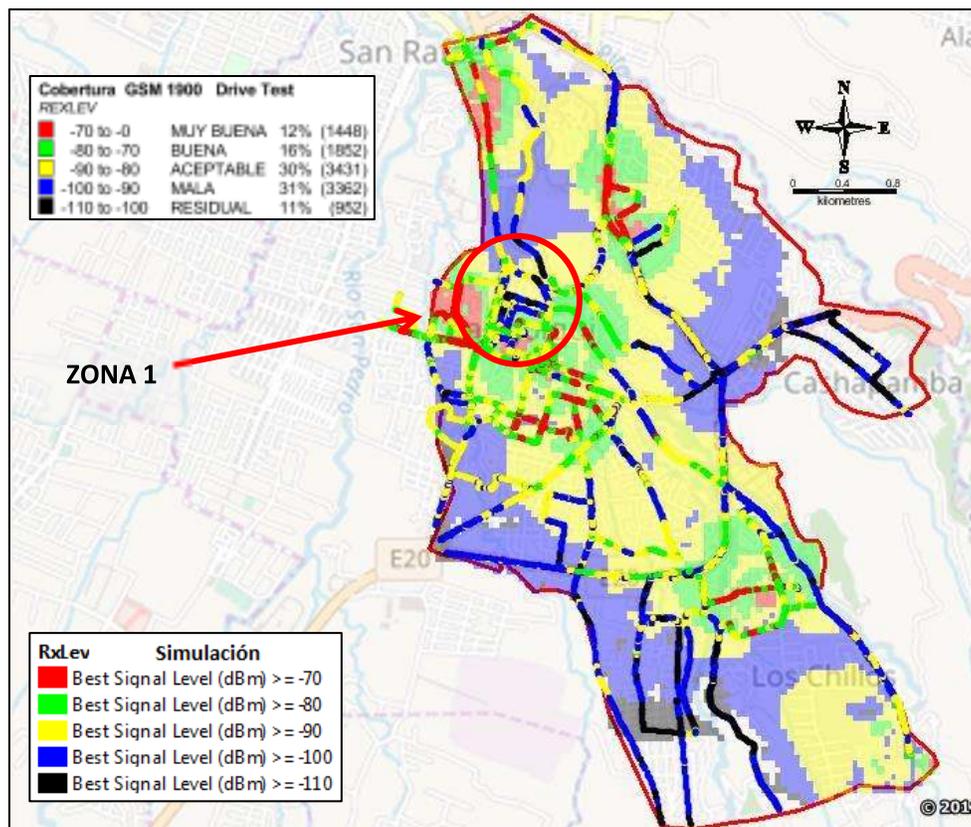


Figura 3.13 Análisis de cobertura entre drive test realizado y simulación en ATOLL.

En la Figura 3.13 se muestra una comparación gráfica de los niveles de cobertura obtenidos en el drive test y los niveles de cobertura obtenidos en el simulador ATOLL.

En la tabla 3.14 se muestra la comparación de los porcentajes de RxLev registrados, tanto en el drive test como en la simulación.

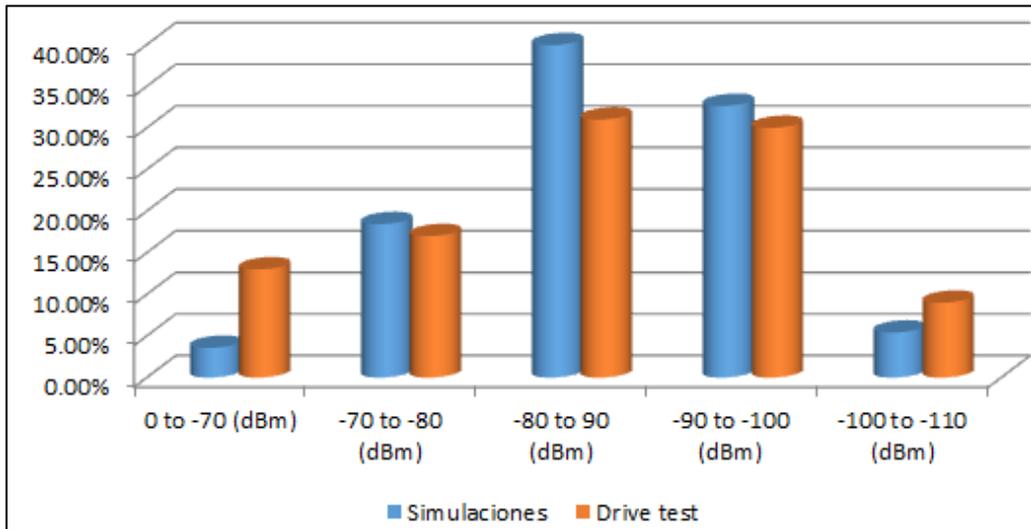


Figura 3.14 Comparación entre rangos de RxLev.

3.3.2 Tasa de datos efectiva (Throughput)

El rendimiento de la red se lo puede medir mediante la tasa de datos efectiva que esta pueda entregar. Al calcular el rendimiento de la red GSM mediante el programa computacional se obtienen niveles aceptables, sin embargo, al comparar estos resultados con el drive test realizado se observa que existen muestras muy por debajo de las simulaciones; estos acontecimientos se suscitan nuevamente en la zona 1. En la Figura 3.15 se muestra una comparación gráfica de los niveles de cobertura obtenidos en el drive test y los niveles de cobertura obtenidos en el simulador ATOLL.

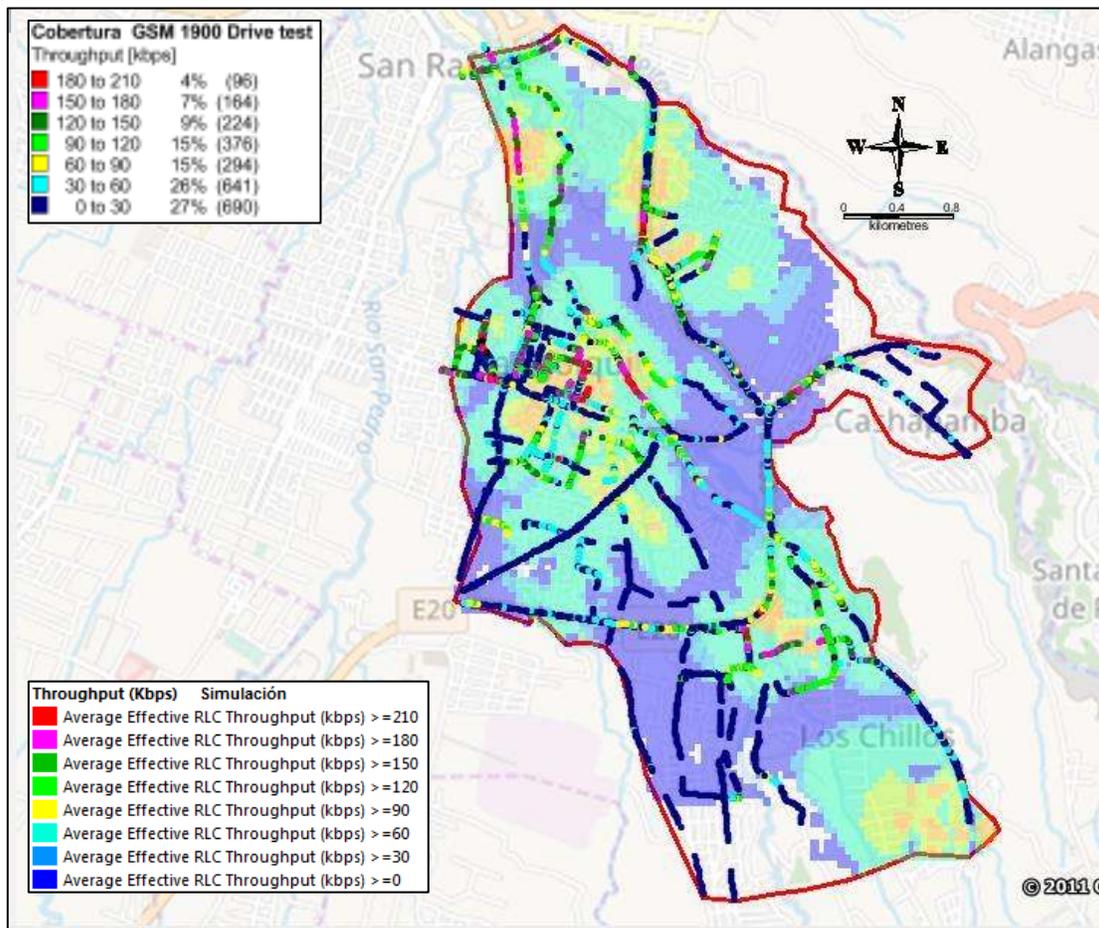


Figura 3.15 Análisis de rendimiento entre drive test realizado y simulación en ATOLL.

En la tabla 3.16 se muestra la comparación de los porcentajes de throughput registrados, tanto en el drive test como en la simulación.

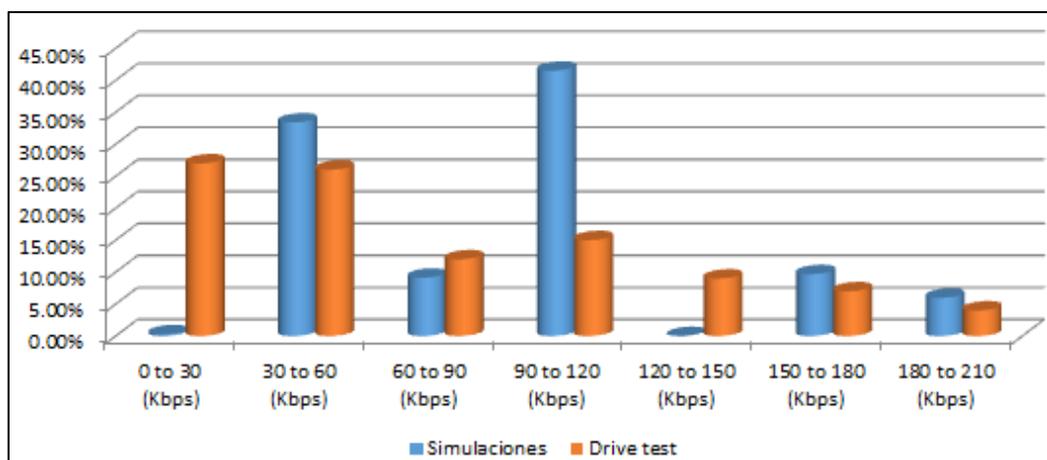


Figura 3.16 Comparación entre rangos de throughput.

3.4 Simulaciones obtenidas en el diseño de la red LTE

En esta sección se presentan las simulaciones de la red LTE para la parroquia de Sangolquí.

Se analizarán los siguientes parámetros:

- Niveles de cobertura (*RSRP*)
- Calidad de señal ($C/(I+N)$)
- Tasa de datos efectiva (*Throughput*)
- Distribución de sectores (*PCI*)

3.4.1 Niveles de cobertura (*RSRP*)

Es imprescindible conocer la cobertura que tendrá la nueva red LTE, por cuanto de este modo se conocerá el nivel de intensidad de la señal en cada punto. Es necesario enfatizar que para el diseño de esta nueva red se adiciona una nueva radio base, con la finalidad de cubrir la zona donde se tiene cobertura por la red GSM actual. En la Figura 3.17 se presenta la simulación de cobertura mediante el programa computacional ATOLL.

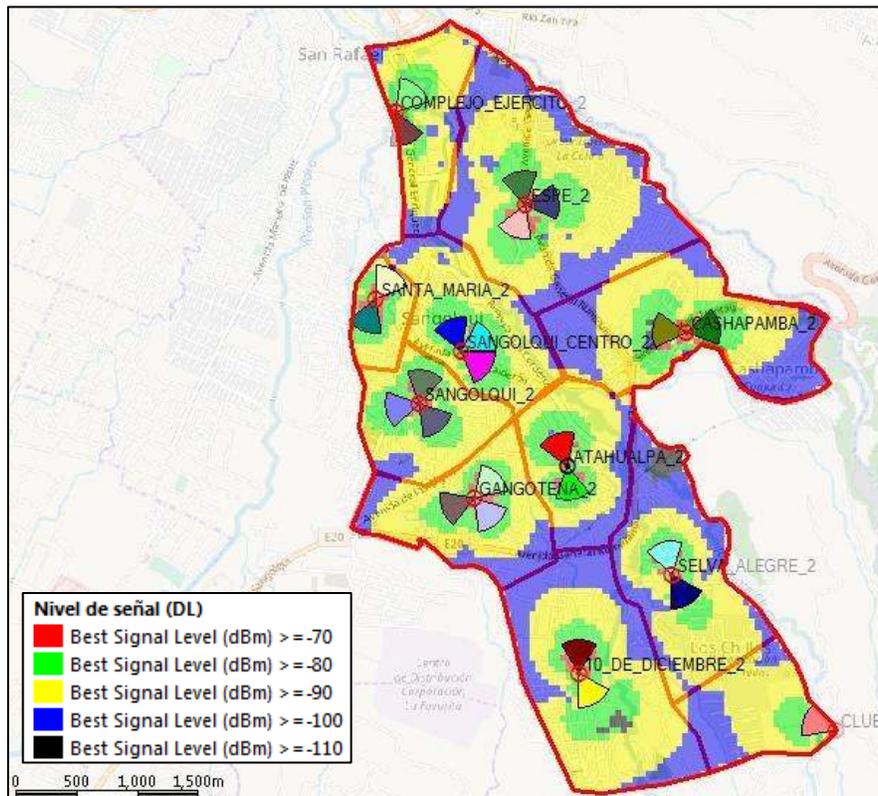


Figura 3.17 Simulación de *RSRP* para la nueva red LTE.

En la Figura 3.18 se pueden observar las estadísticas de los niveles de cobertura.

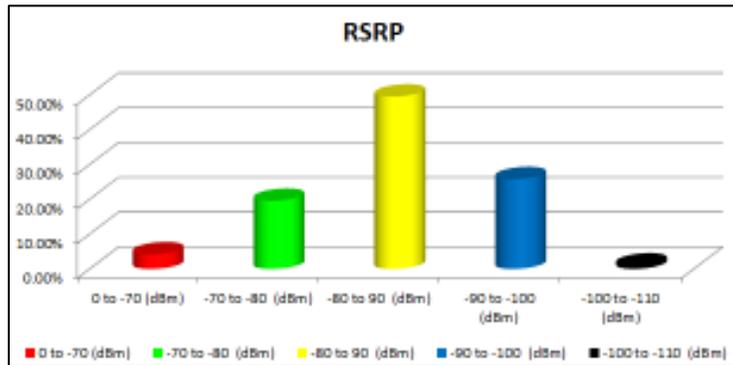


Figura 3.18 Estadísticas de niveles de cobertura (RSRP).

3.4.2 Calidad de señal (C/(I+N))

En LTE es importante anticipar cuál será la calidad de la señal, por cuanto de esta manera se podrá predecir si la tasa de datos efectiva será la más adecuada para el sitio donde se estará brindando el servicio. En la Figura 3.19 se presenta la simulación sobre la calidad de la señal en el polígono de estudio.

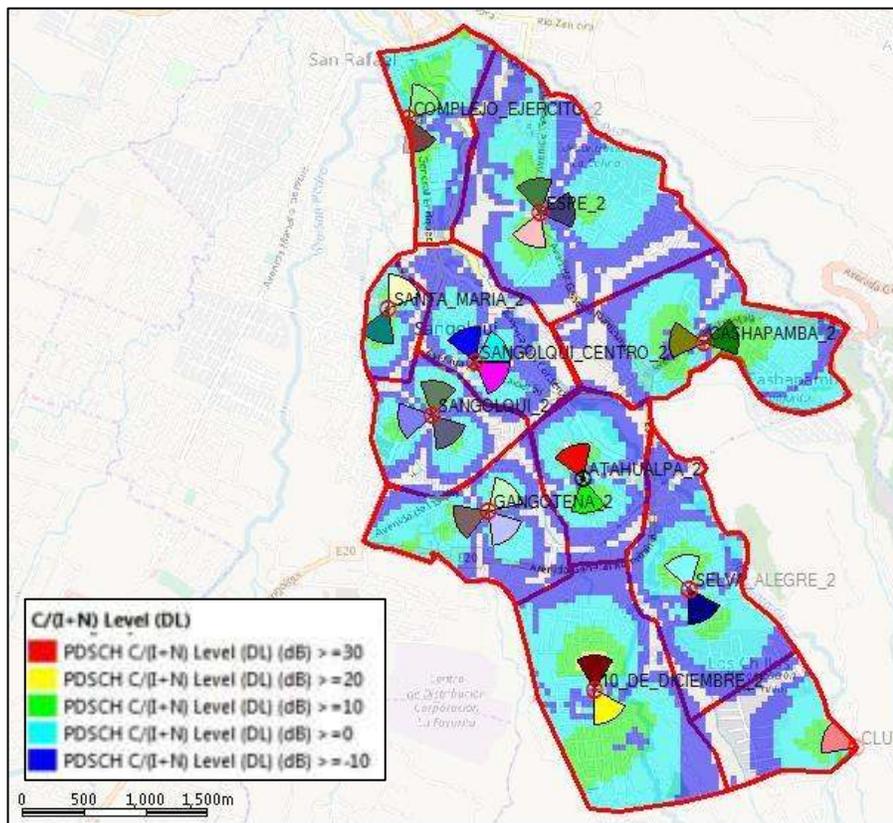


Figura 3.19 Simulación de la calidad de señal (C/(I+N)).

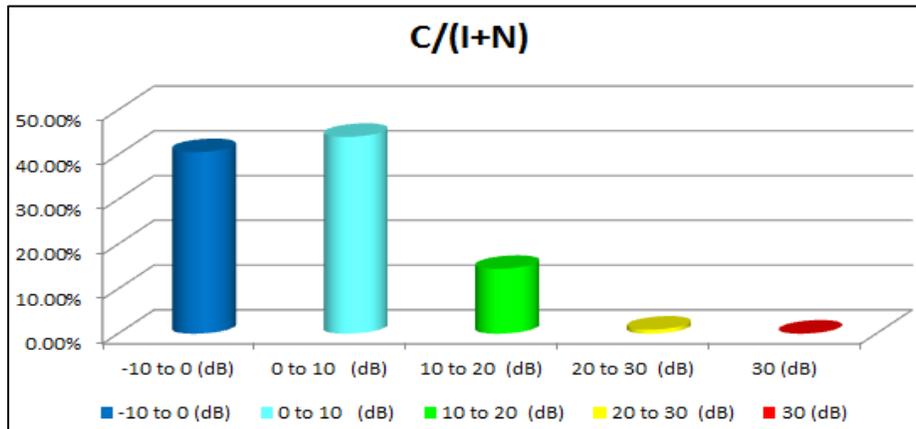


Figura 3.20 Estadísticas de calidad de señal (C/(I+N)).

3.4.3 Tasa de datos efectiva (*Throughput*)

Con la nueva red LTE se pretende mejorar la tasa de datos efectiva, siendo así, cerca de los e-NodeB el throughput promedio alcanzado mediante simulación es de 5334.69kbps. Obteniendo una velocidad máxima entre los 24500Kbps y los 21000Kbps y una velocidad mínima de 500 kbps. En la Figura 3.21 se presenta la tasa de datos efectiva calculada por el programa computacional Atoll.

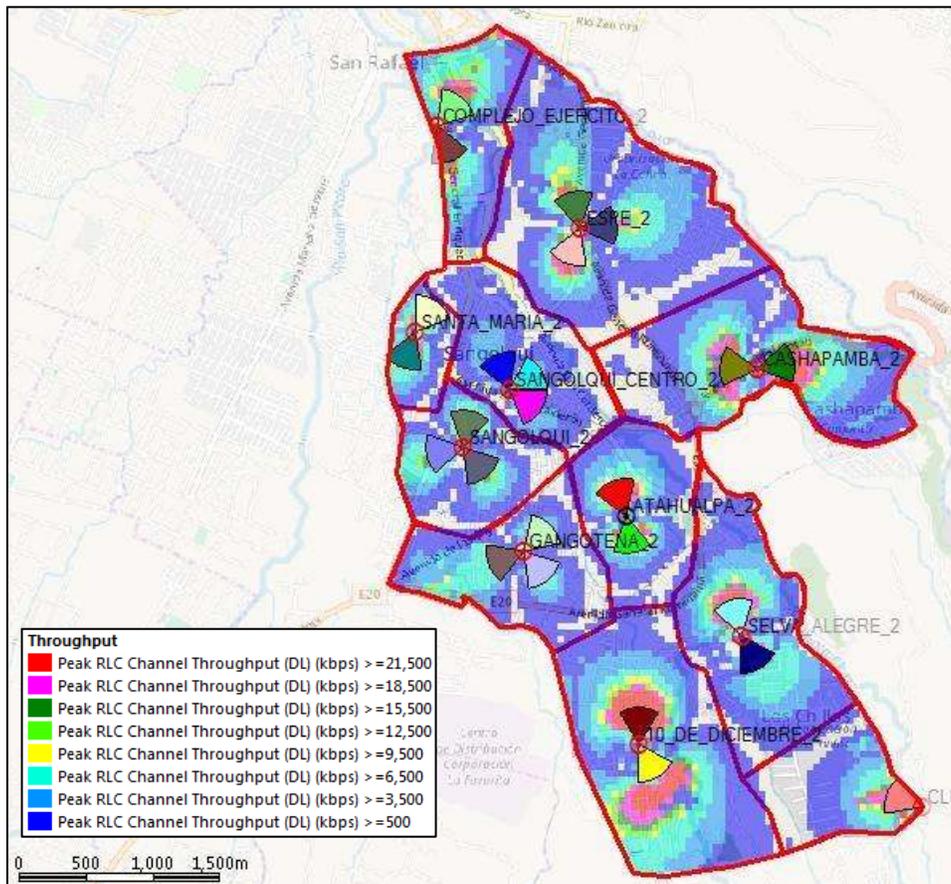


Figura 3.21 Simulación de la tasa de datos efectiva (*throughput*).

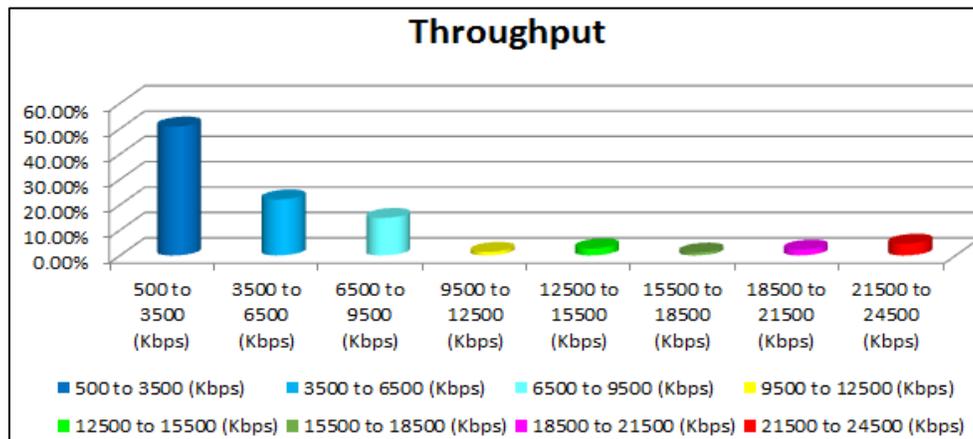


Figura 3.22 Estadísticas de la tasa de datos efectiva (*throughput*).

3.4.4 Distribución de sectores (PCI)

En el LTE es importante una correcta asignación de los PCI para cada celda servidora, debido a que si existen dos celdas próximas con el mismo PCI estas se interferirán mutuamente y de este modo el rendimiento de la red bajaría. En la Figura 3.23 se muestra la distribución de los PCI para cada e-NodeB.

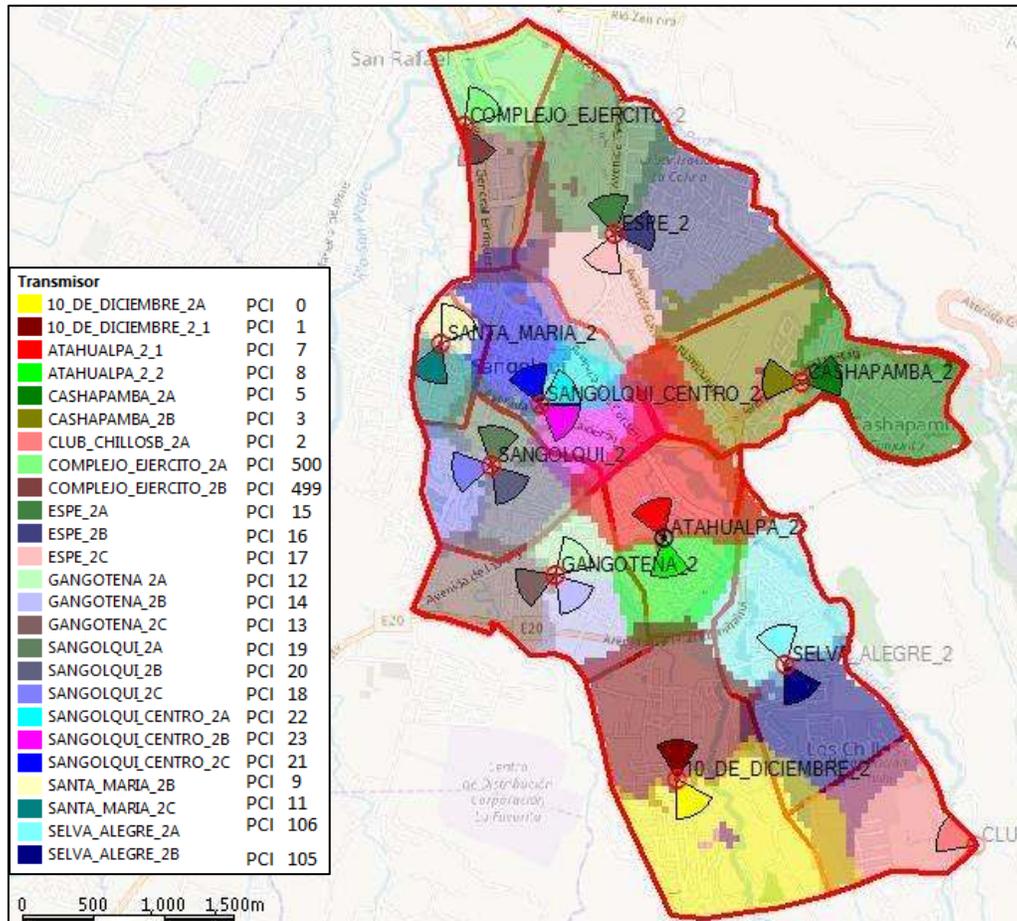


Figura 3.23 Distribución de sectores (PCI).

3.5 Comparación entre la simulación de la nueva red LTE y el drive test GSM 1900

En esta sección, se realiza la comparación entre los datos obtenidos al realizar el drive test y las simulaciones entregadas por el programa computacional Atoll. A continuación, se presenta los parámetros a comparar:

- Nivel de señal (RSRP)
- Rendimiento de la red (*Throughput*)

3.5.1 Nivel de señal (RSRP)

Al comparar la simulación de nivel de señal proporcionada por el programa computacional ATOLL y el drive test realizado, se puede concluir que con la nueva red LTE se obtendrá una mejora sustancial; especialmente la zona 2 y zona 3 donde antes no existía un nivel de señal aceptable, con la integración del nuevo e-NodeB se cubre esta zona. En la Figura 3.24 se presenta una comparativa entre los niveles de señal de la red GSM y la nueva red LTE propuesta.

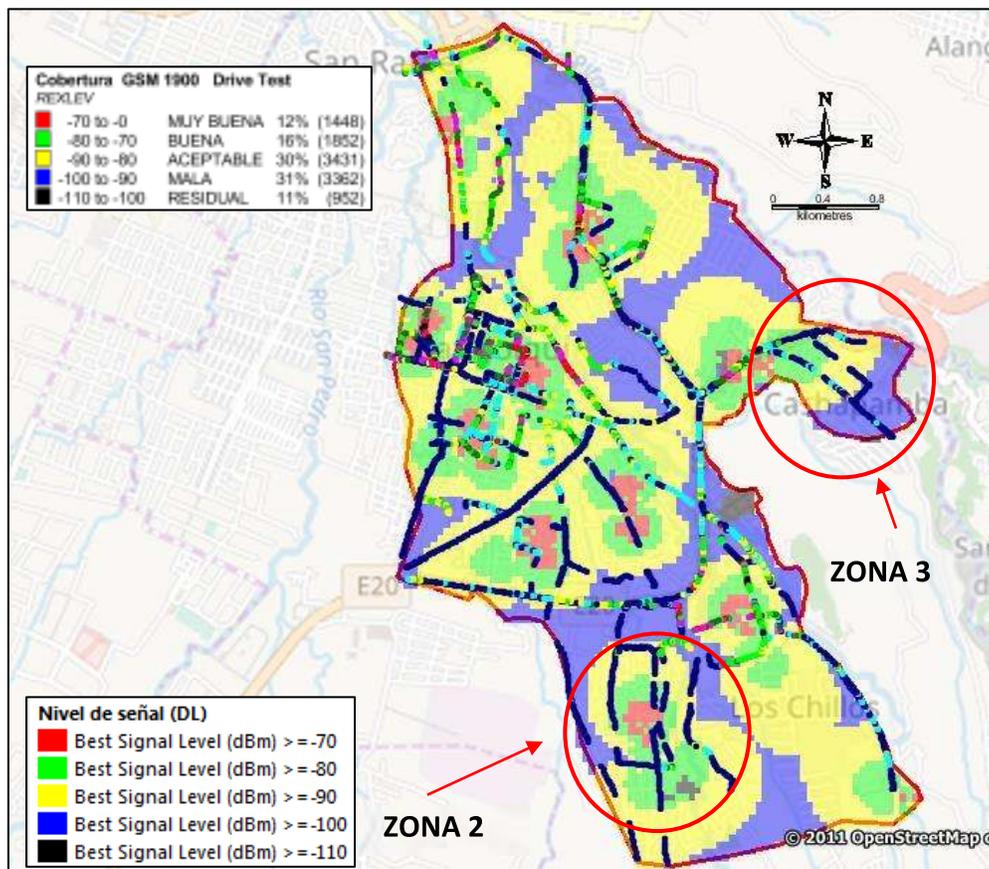


Figura 3.24 Comparación entre cobertura GSM 1900 y LTE 1900

3.5.2 Rendimiento de la red (Throughput)

Mediante el diseño de la nueva red LTE 1900, el parámetro de mayor trascendencia a mejorar es la tasa de datos efectiva (*throughput*). Según la información obtenida en el drive test, existen zonas con velocidades entre los 0kbps y 30 kbps. Con la propuesta de una nueva red, se pretende que las velocidades mínimas estén en el orden de los 500kbps, esto según las simulaciones de throughput obtenidas. En la Figura 3.25, se presenta la comparativa entre la tasa de datos del drive test realizado, y la simulación entregada por el programa computacional ATOLL.

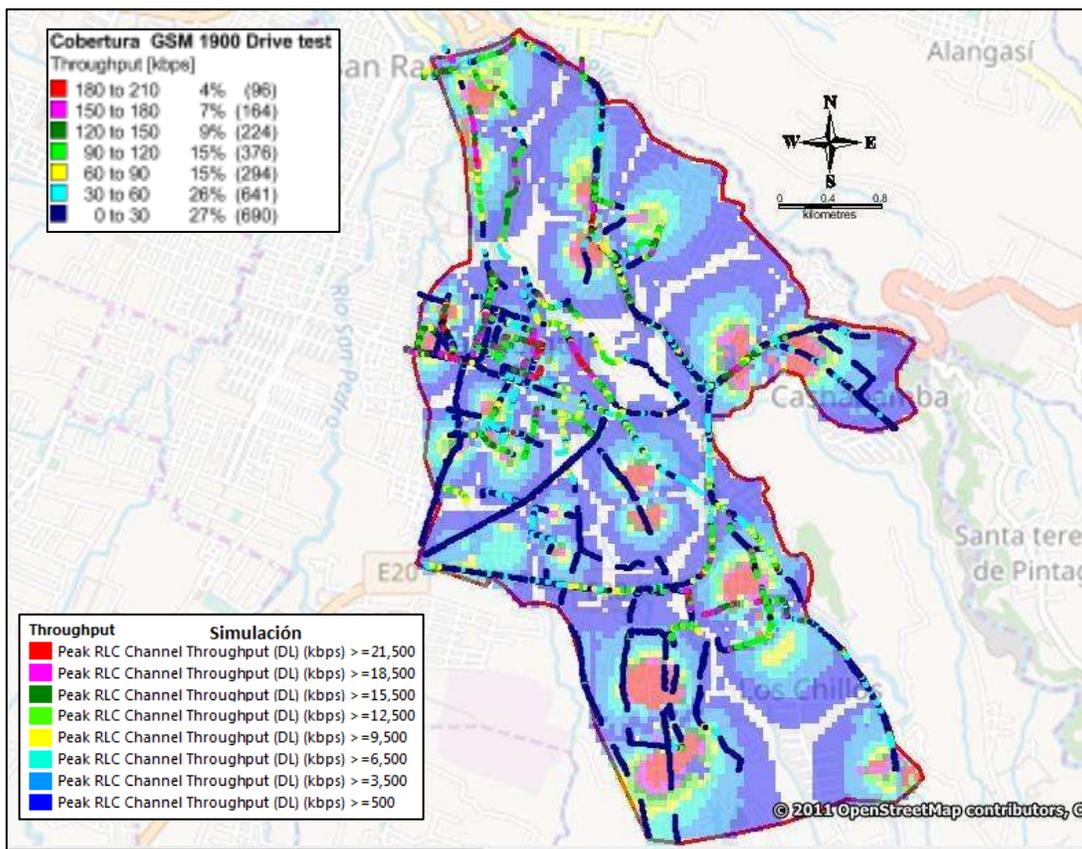


Figura 3.25 Comparación entre throughput GSM 1900 y LTE 1900

Para mayor información los resultados de las simulaciones se encuentran en la sección de ANEXO IV y ANEXO V, adjuntos a este documento.

3.6 Análisis del efecto de eliminar una portadora GSM 1900.

De acuerdo a la información oficial presentada en el documento “Líneas activas por tecnología” [35], desarrollado por la ARCOTEL, se observa que a partir de noviembre del 2015 la tendencia en el uso de tecnología ha cambiado, abandonando la tecnología GSM por otras que permiten el acceso a datos móviles con una mayor velocidad de conexión, como se muestra en la Figura 3.26.

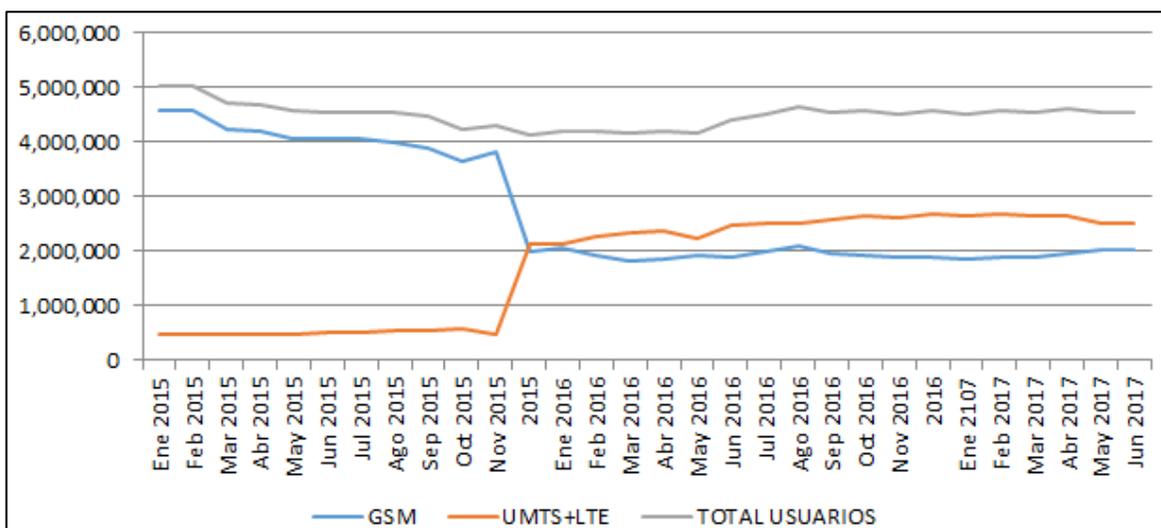


Figura 3.26 Líneas activas por tecnología.

Hasta Junio del 2017 según [33] se registran 4'537.156 usuarios activos. De los cuales 2'017.118 de usuarios son GSM, 1'699.476 de usuarios son UMTS y 820,559 son LTE, lo que equivale en porcentaje a un 44% de usuarios GSM, un 37% de usuarios UMTS y un 18% de usuarios LTE, tal como se muestra en la Figura 3.27

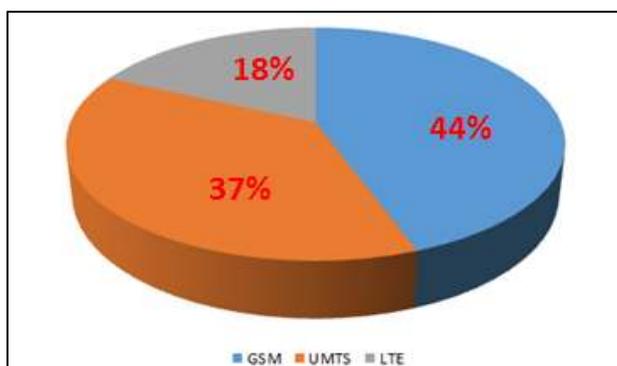


Figura 3.27 Porcentajes de usuarios de operador celular.

Trasladando los resultados anteriores a la realidad de la Parroquia de Sangolqui la penetración usada para calcular la capacidad de la red LTE, se tendrá como

consecuencia que, el 6% de la población de Sangolqui se quede sin recibir el servicio de voz y datos a través de la red GSM 1900. En la Tabla 3.1 se muestra el porcentaje de afectación que tendría la población de Sangolqui que utilice el servicio de voz y datos de la red GSM.

Tabla 3.1 Cálculo del porcentaje de afectación al retirar del aire la red GSM 1900.

Población de Sangolqui	Penetración de operador celular	Usuarios de operador celular	Usuarios GSM (44%)	Usuarios afectado (22%)	% Población de Sangolqui afectada
81140	28.78%	23352.09	10274.92	5137.46	6%

Para este cálculo de usuarios afectados, se ha tomado un valor del 22% de usuarios afectados, debido que al retirar la portadora GSM 1900, se estima que la mitad de los usuarios que utilizan esta red, se queden sin el servicio de voz a través de la red GSM 1900.

Las ventajas que se obtendrá con la eliminación de la red GSM 1900 e implementar una red LTE son:

- Aumento de la tasa de datos (throughput)
- Menor latencia en el acceso a servicios.
- Incremento de cobertura LTE.
- Reúso del espectro de frecuencias

Las desventajas que se tendrá al eliminar la red GSM 1900.

- Los usuarios que usen teléfonos GSM, tendrán que cambiarlos por teléfonos Smartphone.
- Los dispositivos que accedan a la red a través de la red GSM tendrán que ser actualizados.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Como resultado de las pruebas de datos realizadas a la red de datos GSM 1900, se obtuvo un promedio de 72.77Kbps, esta tasa de datos, no sigue la tendencia actual de navegación requerida actualmente
- Los niveles de cobertura en la parroquia de Sangolquí son aceptables, ya que se obtuvo un promedio de -86.62 dBm, a pesar de existir zonas con rxlev de -100dbm, producto de la falta de BTS cercanas.
- Es necesario realizar una calibración de los parámetros de Radio Frecuencia de algunos de los servidores de la red, en la Figura 3.5 se observa la sobre propagación de los servidores con BCCH 593 y BCCH 598, los cuales están creando interferencia en otras áreas de cobertura degradando el servicio de voz y datos.
- Al comparar los resultados de cobertura obtenidos en las pruebas de drive test con los obtenidos en las simulaciones, se observa que los resultados promedios obtenidos en el simulador son mejores que los resultados promedios obtenidos en la evaluación del drive test. Esto es debido a que en las pruebas de drive test no se puede cubrir todas las áreas de cobertura, ya que no se puede acceder a conjuntos privados, clubes privados entre otros
- Se observa que los resultados entregados por el simulador son mejores que los obtenidos en campo. Esto es debido a que en las pruebas de drive test no se puede cubrir zonas como urbanizaciones privadas, clubes entre otros.
- Como resultado de las pruebas obtenidas en las simulaciones de la red LTE, se logra cubrir todas las zonas pobladas de la parroquia de Sangolquí con niveles de RSRP mayores a los -90 dbm.
- Las simulaciones de tasa de datos obtenidas, muestran como resultado que toda la parroquia de Sangolquí, recibirá un promedio de 5.54Mbps, lo que garantiza una mejor experiencia de usuario, al usar el servicio de datos.
- Al comparar los resultados de las simulaciones LTE con los resultados obtenidos en las pruebas de drive test se puede concluir que, la red LTE que se propone

incrementará la tasa de datos que actualmente reciben los usuarios de la parroquia de Sangolqui.

4.2 Recomendaciones

- En este trabajo de titulación no se introdujo información de tráfico a las celdas de la red GSM 1900, por lo que se recomienda crear un mapa de tráfico y realizar nuevamente las simulaciones con el fin de reducir la diferencia entre los valores promedios entregados por el simulador con respecto a los encontrados en campo.
- Se recomienda reducir la resolución del cálculo de propagación, momento de calcular las predicciones, esto con el fin de obtener resultado más confiable.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] GSMA. Observatorio Móvil de América Latina. Acceded july 2017. [Online]. Available:<https://www.gsma.com/latinamerica/wpcontent/uploads/2012/02/latammoespa-2.pdf>
- [2] TeleSemana.com. Estadística: Números mundiales de telefonía móvil, 3G y LTE. Acceded august 2017 [Online]. Available: <http://www.telesemana.com/blog/2015/02/19/estadisticas-numeros-mundiales-de-telefonía-movil-3g-y-lte/>
- [3] GSMA. La Economía Móvil – América Latina 2016. Acceded august 2017. [Online]. Available:https://www.gsma.com/latinamerica/wpcontent/uploads/2016/09/ME_LATM_2016-Spanish-Report-FINAL-Web-Singles-1.pdf
- [4] Ministerio de telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información. (2016) PLAN NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES Y TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN DEL ECUADOR 2016-2021. [Online]. Available: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2016/08/Plan-de-Telecomunicaciones-y-TI..pdf>
- [5] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (2017) Servicio Móvil Avanzado – Líneas activas por tecnologías. [Online]. Available: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2017/09/1.1.3-Lineas-activas-por-tecnología_Jul-2017.xlsx
- [6] L. Aguirre, “Planificación y diseño de la ampliación de cobertura de la red celular GSM y ajuste de parámetros (Initial Tuning) mediante un repetidor activo para la zona norte de la provincia de Napo para una Empresa de Telefonía Celular”, Tesis de Ingeniería, Depto. de Electrónica, Telecomunicaciones, y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Jun. 2010
- [7] D. Verdugo, “Análisis de la capacidad de una portadora LTE en base a simulación y experimentación”, Tesis de Ingeniería, Depto. de Electrónica, Telecomunicaciones, y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, May. 2017

- [8] L. Alvarado, "Análisis e implementación de cambios físicos y de parámetros lógicos para la optimización outdoor del clúster 5 de la ciudad de Quito en la red comercial de acceso inalámbrica 4G LTE de la empresa CNT EP", Tesis de Ingeniería, Depto. de Electrónica, Telecomunicaciones, y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Jun. 2013
- [9] Municipio de Rumiñahui, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: <http://promoruminahui.blogspot.com/2011/02/ubicacion-del-canton-ruminahui.html>
- [10] Ecuador en cifras, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/pichincha.pdf>
- [11] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (2016) Proyección cantonal. [Online]. Available: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2016/09/proyeccion_cantonal_total_2010-2020_seg%C3%BAAn_INEC1.ods
- [12] Google earth. Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: https://earth.google.com/web/search/Sangolqu%c3%ad/@-0.33216094,-78.45255824,2513.94473469a,11620.52443621d,35y,-0h,0t,0r/data=CigiJgokCczelQLKZtS_EeXasIHf7NW_GW340WaenVNAIRPHOurMm1NA
- [13] Line.do, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: <https://line.do/es/historia-de-los-ordenadores/rqp/vertical>
- [14] Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: <http://www.catedra-telefoniamovistar.etsit.upm.es/sites/default/files/SeminarioLTE.pdf>
- [15] M. Sauterz, FROM GSM TO LTE. An introduction to mobile networks and mobile broadband. Inglaterra: Wiley Editorial, 2011.
- [16] Telcomstar, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: <http://telcomstar.com/bsc-mnc/nokia-bsc-3i/>
- [17] Fundación Vodafone(2017), Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: http://www.fundacionvodafone.es/sites/default/files/libro_lte.pdf

- [18] A. Reyes, "REDES CELULARES 4G Y PROYECCIONES PARA 5G", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Seminario de Actualización, Aug. 2017.
- [19] W3ii, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: http://www.w3ii.com/es/lte/lte_network_architecture.html
- [20] Atoll, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: <https://neutrongeek.wordpress.com/tag/software-para-planificacion-rf/>
- [21] R. Dominguez, "Métodos para el aumento de la capacidad UMTS en Atoll", Tesis de Ingeniería en Telecomunicaciones, Depto. de la Señal y Comunicación, Univ. De Sevilla, España, Mar. 2009
- [22] G. Tubón, "Estudio estadístico comparativo sobre emisiones no ionizantes emitidas por radio bases de telefonía celular y estaciones transmisoras de radio y televisión en la ciudad de Riobamba", Tesis de Ingeniería, Escuela de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, 2010. [Online]. Available: <http://dSPACE.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/628/1/38T00246.pdf>
- [23] Huawei, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: http://www.huawei.com/ucmf/groups/public/documents/attachments/hw_316934.pdf
- [24] MuiLinux, Accessed Sep. 2011. [Online]. Available: <http://www.muylinux.com/2011/08/03/openbts-o-como-montarte-una-operadora-movil-open-source/>
- [25] C. Balanis, *Antenna Theory: analysis and design*, 3rd ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [26] Huawei, Accessed Sep. 2017. [Online]. Available: http://www.huawei.com/ucmf/groups/public/documents/attachments/hw_316934.pdf
- [27] Rumiñahui, Accessed Dec. 2017. [Online]. Available: http://www.ruminahui.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=33:datos-estadisticos&catid=10&Itemid=108&lang=es

- [28] Cedia, Accessed Dec. 2017. [Online]. Available: [http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/857/1/Perfil%20territorial%20RUM INAHUI.pdf](http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/857/1/Perfil%20territorial%20RUM%20INAHUI.pdf)
- [29] A. Reyes, "REDES CELULARES 4G Y PROYECCIONES PARA 5G", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Seminario de Actualización, Aug. 2017.
- [30] Huawei. (2015). "LTE Radio Network Capacity Dimensioning".
- [31] Scribd, Accessed Dec. 2017. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/222971597/RRU3942>
- [32] Commscope Accessed Dec. 2017. [Online]. Available: http://www.commscope.com/catalog/wireless/pdf/part/15653%7C15276/HBXX-6516DS-VTM_HBXX-6516DS-A2M.pdf
- [33] Lianstar Accessed Dec. 2017. [Online]. Available: <http://www.lianstar.com/es/cable-coaxial-de-7-8.php>
- [35] ARCOTEL. (2017,6). Líneas Activas por Tecnología [Online]. Disponible en :<http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>
- [36] ARCOTEL. (2017,6). Radiobases por prestador y tecnología [Online]. Disponible en :<http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>

6. ANEXOS

En el archivo digital se adjunta los documentos de la descripción de equipos y manual de uso de software ATOLL.

ANEXO I. Información técnica de RRU3942

ANEXO II. Información técnica de antena usada en simulación.

ANEXO III. Software ATOLL y manual de uso.

ANEXO IV. Red LTE

ANEXO V. Red GSM

ORDEN DE EMPASTADO