



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Estudio de Carrier Aggregation para el uso eficiente del espectro radioeléctrico utilizado por los operadores móviles en Ecuador

AUTOR

Rocafuerte Tomala, Geomayra Mariela

TUTOR

Ing. Jaramillo Chamba, Daniel Armando. MSc

LA LIBERTAD - ECUADOR

Año 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Ronal Rovira Jurado, PhD.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, MSc.

TUTOR

Ing. Carlos Efraín Andrade Caicho, MSc

DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Amaya Fariño Luis Miguel, Mgt.

DOCENTE GUÍA UIC



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **GEOMAYRA MARIELA ROCAFUERTE TOMALÁ**, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

TUTOR

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Daniel Armando Jaramillo Chamba", is written over a horizontal line.

Ing. Daniel Armando Jaramillo Chamba, MSc



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Geomayra Mariela Rocafuerte Tomala**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, **ESTUDIO DE CARRIER AGGREGATION PARA EL USO EFICIENTE DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO UTILIZADO POR LOS OPERADORES MÓVILES EN ECUADOR** previo a la obtención del título en Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

EL AUTOR

Geomayra Rocafuerte

Geomayra Mariela Rocafuerte Tomalá



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Estudio de Carrier Aggregation para el uso eficiente del espectro radioeléctrico utilizado por los operadores móviles en Ecuador, presentado por el estudiante, Geomayra Mariela Rocafuerte Tamalá fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 8%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. Daniel Armando Jaramillo Chamba, MSc



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, Rocafuerte Tomalá Geomayra Mariela

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

EL AUTOR

Geomayra Rocafuerte Tomalá

Geomayra Mariela Rocafuerte Tomalá

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios por brindarme la fortaleza, por guiarme por el buen camino, por darme sabiduría para superar cada obstáculo y permitir culminar este importante logro académico.

A mis padres y a mi familia, mi mayor pilar y fuente de inspiración, por su amor incondicional, sacrificio, comprensión y apoyo constante. Gracias por creer en mi incluso cuando yo misma dude, por acompañarme en cada etapa de este camino y por motivarme a no rendirme jamás.

A mi pequeño(a) que hoy vive en mi vientre. Tu presencia lleno mis días de esperanza y me dio la fortaleza necesaria para seguir adelante aun en los momentos más difíciles.

A mi esposo Andrés, a mi hijo Dilan, quienes han sido mi mayor motivación y fortaleza en este camino. Gracias por su amor, paciencia y comprensión durante cada etapa de este proceso, por acompañarme en los momentos de esfuerzo y sacrificio, y por bríndame ánimo cuando el cansancio parecía vencer.

A mi tutor el Ing. Daniel Jaramillo Chamba quien estuvo guiándome para poder llevar a término este trabajo de titulación, por la paciencia, su esfuerzo y dedicación.

A mis amigos José Daniel, Gabriela y Melanie, por su apoyo sincero y constante a lo largo de este proceso. Gracias por estar presentes en los momentos de cansancio y duda, por sus palabras de ánimo, su paciencia y su amistad incondicional.

A los docentes de la carrera, por cada enseñanza impartida a lo largo de mi formación universitaria por su compromiso con la educación y por contribuir de manera significativa a mi crecimiento académico y profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra forma estuvieron presentes en este proceso, brindándome apoyo, ánimo y confianza para culminar con éxito esta etapa tan importante en mi vida.

Geomayra Mariela, Rocafuerte Tomalá

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a Dios que ha sido fuente de mi fortaleza, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera ha sido mi guía en cada paso de este camino, por darme sabiduría y fuerza para superar cada desafío.

A mi mamita Lucila, quien me crio con amor y dedicación, y ha sido para mí como una madre. Gracias por su entrega incondicional, por sus cuidados, paciencia y sacrificio, y por acompañarme en cada etapa de mi vida. Tu amor y apoyo han sido fundamentales para llegar hasta aquí.

A mi amado hijo Dilan quien ha sido mi pilar fundamental, mi fuente de motivación e inspiración para poder superar cada obstáculo presentado en este trayecto y así poder luchar para darle un futuro mejor.

De manera muy especial, a mi hijo que crece en mi vientre, quien sin saberlo me dio fuerza para no rendirme y seguir adelante cada día. Tu llegada ha sido una bendición y una fuente infinita de esperanza; este logro también es para ti

A mi amado esposo Andrés por apoyarme en todo este duro proceso por su sacrificio y esfuerzo, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre ha estado brindadme su amor, cariño y comprensión.

A mis padres María y Carlos por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad. Gracias por

sus consejos, su apoyo y por enseñarme a no rendirme ante las dificultades, por darme la fuerza necesaria para alcanzar este logro.

A mis hermanos Alexander, Jonathan, Maribel y Viviana por su apoyo, compañía y cariño incondicional. Gracias por estar presentes en los momentos de dificultad, por brindarme palabras de ánimo y por acompañarme siempre que lo necesite.

A mi abuela Rosa por su amor inmenso, sabiduría y cuidado incondicional. Gracias por cada consejo, abrazo y enseñanza.

A Sebastián y Sabina, aunque no estén físicamente, permanecen vivos en mi corazón y en cada uno de mis recuerdos. Su amor, enseñanza y han sido una guía silenciosa que me acompañó durante este camino, sé que desde el cielo me cuidan, me protegen y me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

Geomayra Mariela, Rocafuerte Tomalá

ÍNDICE GENERAL

TITULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	IV
DECLARO QUE:	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	IX
ÍNDICE GENERAL	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
RESUMEN	XIX
ABSTRACT.....	XX
INTRODUCCIÓN	19
Capítulo 1.....	20
1.1 Antecedentes.	20
1.2 Descripción del Proyecto.	21
1.3 Objetivos.	22
1.4 Problemática.....	23
1.5 Justificación.....	24
1.6 Alcance del Proyecto.....	25
1.7 Metodología.	26
CAPÍTULO II	28

2.1. Marco Contextual.....	28
2.1.1. Situación del espectro radioeléctrico en el Ecuador	28
2.1.1.1. Asignación de bandas a operadores móviles	29
2.1.1.2. Problemáticas en la gestión eficiente del espectro.....	30
2.1.2. Evolución de las redes móviles	31
2.1.2.1. Operadores móviles de Ecuador	34
2.1.2.2. Crecimiento del tráfico móvil y necesidad de mayor capacidad	35
2.1.3. Relevancia del estudio del <i>Carrier Aggregation</i> en el contexto nacional	36
2.1.3.1. Ventajas operativas del CA para operadores	37
2.2. Marco Conceptual	37
2.2.1. Redes LTE y tecnologías de acceso radioeléctrico.....	37
2.2.1.1. Arquitectura y funcionamiento de la red LTE.....	38
2.2.1.2. Acceso al medio, modulación y espectro en LTE	41
2.2.1.3. Evolución hacia LTE-Advanced y necesidades espectrales.....	42
2.2.2. Carrier Aggregation: concepto técnico y estructura funcional	43
2.2.2.1. Definición y objetivos de la agregación de portadoras.....	44
2.2.2.2. Tipos de agregación: intra-banda contigua, no contigua e inter-banda	44
2.2.2.3. Componentes involucrados: eNodeB, UE, scheduler	46
2.2.2.4. Condiciones necesarias para la implementación de CA	47
2.2.3. Normativa internacional sobre Carrier Aggregation (3GPP)	48
2.2.3.1. Rol del 3GPP y releases asociados a Carrier Aggregation	49
2.3 Perspectiva del CA y del Marco Regulatorio del Espectro.....	50
2.3.1. Políticas nacionales de asignación y uso del espectro	50
2.3.1.1. Entes reguladores (ARCOTEL, MINTEL).....	51
2.3.1.2. Estructura de asignación por operador y tecnología	52
CAPÍTULO III.....	54

3. Metodología y Parámetros a evaluar en la simulación en ATOLL.....	54
3.1. Descripción del software Atoll.....	54
3.1.1. Características generales del software	54
3.1.2. Funcionalidades aplicadas a redes LTE/LTE-A	55
3.2. Metodología de simulación	57
3.2.1. Justificación de la metodología empleada	57
3.3. Modelos de propagación y parámetros técnicos de red	58
3.3.1. Modelos de propagación aplicados en entorno urbano.....	58
3.4 Parámetros de red LTE considerados (frecuencias, potencias, ancho de banda)..	59
3.4.1. Configuración de bandas LTE en Atoll según asignación en Ecuador.....	59
3.5. Indicadores de desempeño a evaluar.....	60
CAPÍTULO IV	63
4.1 Dimensionamiento de la red.....	63
4.2. Reconocimiento y Característica.....	63
4.3 Bandas de Frecuencia.....	64
4.4 Selección del modelo de propagación.....	66
4.5 Configuración de los parámetros globales del sistema LTE.....	68
4.6 Configuración de la plantilla LTE.....	70
4.7 Parámetros de cobertura LTE en la zona geográfica del cantón LA Libertad provincia de Santa Elena	72
4.8 Configuración de las radios base.....	73
4.9 Mapas de cobertura y tráfico	75
4.10 Red LTE de la provincia de Santa Elena	76
CAPITULO V	77
5. Optimización de la red	77
5.1 Configuración la plantilla LTE	77
5.2 Configuración de transmisores.....	78
5.3 Implementación de <i>Carrier Aggregation</i>	79
5.4 Comparativa de los resultados	80

5.5 Resultados de simulación	81
5.6 Predicción de <i>coverage by signal level</i>	81
5.7 Análisis de la señal efectiva	82
5.7.1 Señal efectiva DL.....	82
5.7.1.2 Señal efectiva UL.....	83
5.8 Análisis del rendimiento	84
5.8.1 Rendimiento DL	84
5.8.1.2 Rendimiento UL	85
5.9 Mediciones de desempeño con SpeedTest y G-NetTrack.....	86
5.9.1 SpeedTest	86
5.9.1.2 G-NetTrack	87
5.9.1.3 Análisis comparativo de las dos aplicaciones y el software Atoll	88
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES	96
ANEXOS.....	97
ANEXO 1 TABLA DE DATOS	97
ANEXOS DE FIGURA	99
BIBLIOGRAFÍA	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las bandas de frecuencias. Elaborado por el autor	28
Tabla 2 Asignación del espectro por operador	29
Tabla 3 Características de la red móvil 1G.....	31
Tabla 4 Característica de la red celular 2G.....	32
Tabla 5 Característica de la red celular 3G.....	33
Tabla 6 Característica de la red celular 4G.....	33
Tabla 7 Característica de la red celular 5G.....	34
Tabla 8 Bandas y Frecuencias de los Operadores Móviles.	53
Tabla 9 Definición de variables y constante en la ecuación.	58
Tabla 10 bandas de frecuencias utilizadas por los operadores móviles de Ecuador.....	60
Tabla 11 Valores de RSRP	61
Tabla 12 Características de la provincia de Santa Elena.	64
Tabla 13 Datos de la banda de frecuencia.	64
Tabla 14 Tipos de modelos de propagación en Atoll.	66
Tabla 15 parámetros de restricción del modelo Cost-Hata.....	67
Tabla 16 Parámetros globales LTE.....	68
Tabla 17 Configuración de los parámetros la plantilla LTE.....	71
Tabla 18 Parámetros de las 15 radio bases.	72
Tabla 19 Resultados de las velocidades DL y UL	76
Tabla 20 Resultados de las velocidades DL y UL aplicando el CA.....	79
Tabla 21 Comparativa de las velocidades tanto para LTE y LTE-A.....	80
Tabla 22 Datos recolectados por la aplicación SpeedTest.....	87

Tabla 23 Datos extraídos de la aplicación G-NetTrack.....	87
Tabla 24Camparación de DL y UL en el software Atoll y en la aplicación SpeedTest .	89
Tabla 25 Datos proporcionados por CNT de las Radio Bases.....	97
Tabla 26 Parámetros de las 15 estaciones proporcionadas por la empresa CNT	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Arquitectura LTE	39
Figura 2 configuración del CA intra-band contigua	45
Figura 3 Configuración del CA intra-band no contigua	46
Figura 4 Configuración del CA inter-banda	46
Figura 5 configuración de la banda E-Utra.....	65
Figura 6 configuración en Atoll del modelo de propagación.	68
Figura 7 configuración de los parámetros globales.	69
Figura 8 Configuración de los parámetros avanzados.	70
Figura 9 configuración del Radio Network setting.....	70
Figura 10 configuración de los sectores de transmisión.	73
Figura 11 Red LTE con sus 15 radio bases	74
Figura 12 configuración del tráfico de mapa.	75
Figura 13 Simulación a las 15 radio bases.....	75
Figura 14 configuración de la plantilla LTE-A	78
Figura 15 Configuración de tipo de celda en el transmisor	79
Figura 16 Configuración de la segunda portadora Elaborado por el autor	79
Figura 18 Coverage by signal level optimizada.....	81
Figura 17 Coverage by signal level	81
Figura 19 Effective Signal Analysis PDSCH C/N Level (DL)	82
Figura 20 Histograma Effective Signal Analysis PDSCH C/N Level (DL).....	82
Figura 21 Histograma Effective Signal Analysis PDSCH C/N Level (DL) Optimizada	82
Figura 22 Histograma Effective Signal Analysis PUSCH & PUCCH Signal Level (UL)	83

Figura 23 Histograma Effective Signal Analysis PUSCH & PUCCH Signal Level (UL)	83
.....	
Figura 24 Histograma Effective Signal Analysis PUSCH & PUCCH C/N (UL)	
Optimizada.....	84
Figura 25 Histograma Effective Signal Analysis PUSCH & PUCCH C/N (UL)	84
Figura 26 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL) Optimizada.....	85
Figura 27 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL).....	85
Figura 28 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL).....	85
Figura 29 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL) Optimizada.....	85
Figura 30 Datos de la aplicación G-NetTrack de la estación base La Libertad.....	88
Figura 31 datos extraídos de la aplicación SpeedTest de la estación base La Libertad. .	88
Figura 32 Nivel de señal de RSRP de la estación base LA Libertad	90
Figura 33 Histograma del valor RSRP	90
Figura 34 Nivel de RSSI de la estación La libertad.....	91
Figura 35 Histograma del valor RSSI.....	91
Figura 36 Nivel de señal RSRQ de la estación la Libertad	92
Figura 37 Histograma del valor RSRQ.....	93
Figura 40 Coordenadas de la estación base La Libertad	99
Figura 41 visita técnica de la estación base la libertad	99
Figura 42 punto de medición para la extracción de datos de la estación base la libertad	
.....	99

RESUMEN

Esta tesis lleva a cabo un análisis exhaustivo del *Carrier Aggregation* (CA) como método sofisticado para mejorar la utilización del espectro radioeléctrico que se le ha otorgado a las compañías de telecomunicaciones móviles de Ecuador. Su propósito principal es analizar el desempeño técnico del CA y su relevancia en el entorno nacional, basado en las directrices definidas por el 3GPP. La metodología abarca: un análisis conceptual y operativo del CA en las redes LTE/LTE-A, así como su adopción por los proveedores nacionales; una evaluación de las regulaciones globales que rigen su aplicación; y la simulación comparativa en el software *Atoll* de situaciones de LTE sin CA y LTE-*Advanced* con CA. Los resultados demuestran que, al implementar CA, se producen aumentos significativos en la capacidad, la eficiencia espectral y el rendimiento del enlace. Se determina que esta funcionalidad es una opción tecnológica eficiente para optimizar el uso del espectro en Ecuador y robustecer la planificación regulatoria futura

Palabras claves: Atoll, Carrier Aggregation, 3GPP

ABSTRACT

This thesis presents a comprehensive analysis of Carrier Aggregation (CA) as a sophisticated method for improving the utilization of the radio spectrum allocated to mobile telecommunications companies in Ecuador. Its main purpose is to analyze the technical performance of CA and its relevance in the national context, based on the guidelines defined by 3GPP. The methodology includes: a conceptual and operational analysis of CA in LTE/LTE-A networks, as well as its adoption by national providers; an evaluation of the global regulations governing its application; and a comparative simulation using Atoll software of LTE scenarios without CA and LTE-Advanced scenarios with CA. The results demonstrate that implementing CA leads to significant increases in capacity, spectral efficiency, and link performance. It is determined that this functionality is an efficient technological option for optimizing spectrum use in Ecuador and strengthening future regulatory planning Keywords.

Keywords: Atoll, Carrier Aggregation, 3GPP

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de telefonía móvil han atravesado una rápida evolución incluyendo en un breve lapso de tiempo muchos progresos tecnológicos que han hecho del teléfono celular un dispositivo esencial para la vida cotidiana de las personas. Hoy en día, es casi inconcebible imaginar un ambiente completamente distinto al que conocemos. El avance del teléfono móvil desde un servicio de voz, a uno que proporciona una extensa gama de servicios gracias a técnicas recientes de cifrado, acceso, multiplexación y codificación.

Fue la 3GPP quien desarrollo el estándar LTE debido a la necesidad de datos móviles y para reducir la saturación en el tráfico de datos que enfrentaban los operadores móviles en sus redes.

El *Carrier Aggregation* (CA) es una función fundamental de LTE-A, que se introdujo a partir de 3GPP Release 10. Se trata de un recurso estratégico que permite mejorar el rendimiento y la capacidad de las redes mediante la combinación de múltiples portadoras de frecuencias. Esta técnica no solamente mejora el empleo del espectro que existe, sino que además ayuda a optimizar la experiencia del usuario al proporcionar velocidades de transmisión más altas y una estabilidad superior frente a situaciones de congestión,

La administración y el aprovechamiento efectivo del espectro radioeléctrico son fundamentales para garantizar un funcionamiento ideal de estas redes, dado que el espectro es un recurso escaso que influye de manera directa en la capacidad, en alcance y la calidad del servicio prestado.

El propósito de este estudio es examinar el concepto, la operabilidad y aplicabilidad del *Carrier Aggregation* en Ecuador, basándose tanto en las regulaciones internacionales del 3GPP como en un análisis del uso práctico de esta tecnología para los operadores móviles ecuatorianos. Así mismo utilizara un entorno comparativo en el software *Atoll* analizar las diferencias de rendimiento entre una red LTE sin CA y otra con CA. Los resultados posibilitaran evaluar las ventajas técnicas de esta funcionalidad y sugerir concejos para reforzar el marco regulatorio del país y fomentar una utilización más eficaz del espectro radioeléctrico

Capítulo I

1.1 Antecedentes.

El aumento del interés de los usuarios de telefonía móvil por servicios y aplicaciones de banda ancha lleva a las compañías a explorar nuevas tecnologías para cumplir con las necesidades de sus clientes. Así, las tecnologías se desarrollan con el objetivo de mejorar su rendimiento. Para el análisis de estas tecnologías se ha llevado a cabo diversas investigaciones que posibilitan determinar de manera experimental la capacidad de transmisión en un sistema con Carrier Aggregation.

En el trabajo de Guido Fernando Ibarra Pastas[1] se realizó un estudio para optimizar el aumento de la velocidad de datos en una estación móvil con tecnología LTE fundamentados en segunda portadora y *Carrier Aggregation*.

Inicialmente, la estación funcionaba con una única portadora, lo que restringía la rapidez de descarga. Para optimizar el desempeño de la red, se añadió una segunda portadora con una banda de 1900 MHz de acuerdo con lo establecido por la 3GPP se implementó el CA intra-banda no contigua, con la instauración de esta segunda portadora se realizaron modificaciones físicas como Antenas, módulos de RF y energía también se realizaron configuraciones de potencia por sector y portadoras.

Los análisis realizados demostraron un aumento notable en la rapidez de descarga indicando que la agregación de portadoras es una estrategia efectiva para mejorar el rendimiento de la red en zonas con mucho tráfico.

En el trabajo de investigación[2] de Alava Lara Darley Steven de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo se propone la adopción de *Carrier Aggregation* (CA) como una estrategia para mejorar el uso del espectro radioeléctrico que las empresas de telecomunicaciones en Ecuador han recibido. Este análisis evalúa minuciosamente las frecuencias asignadas a los proveedores, el aumento en la necesidad de servicios de datos móviles y las restricciones actuales en términos de capacidad y velocidad.

El estudio sugiere escenarios técnicos donde se plantean combinaciones de portadoras para ser añadidas, ya sea intra o Inter banda, teniendo en cuenta las condiciones reales de distribución de espectro en el país. Adicionalmente, se utilizaron herramientas de simulación y estudio para anticipar avances en aspectos como la eficiencia espectral, velocidades de descarga y una experiencia más satisfactoria para el usuario final.

Este estudio fue fundamental para comprender la posibilidad de implementar *Carrier Aggregation* en Ecuador y resalto la relevancia de examinar no solo los elementos técnicos de agregación de portadoras, sino también el marco regulatorio y las limitaciones operativas a las que se enfrentan los proveedores de servicios móviles al incorporar nuevas funcionalidades.

En Colombia [3], el aumento del tráfico móvil y la necesidad de servicios de datos ha demostrado la importancia de implantar nuevas tecnologías que posibiliten el uso más eficaz del espectro radio eléctrico. En el trabajo realizado por Ortiz Casallas Diana Carolina y Gómez Saavedra José Jhonatan en la Universidad Piloto de Colombia analiza la viabilidad de implementar *Carrier Aggregation* (CA) en las redes LTE de los principales operadores móviles del país, como solución para mejorar el rendimiento y capacidad de red.

El trabajo parte de una evaluación detallada de la distribución actual del espectro radioeléctrico y la asignación por bandas a cada operador (Claro, Movistar y Tigo), proponiendo combinaciones de portadoras intra e inter-banda basadas en las configuraciones definidas por el 3GPP. Se desarrollaron múltiples escenarios técnicos en los que se planteó cómo los operadores podrían usar sus bloques de espectro fragmentado para configurar agregación de portadoras y así habilitar anchos de banda compuestos mayores a 20 MHz, cumpliendo con las condiciones para *LTE-Advanced*.

1.2 Descripción del Proyecto.

El presente proyecto de investigación tiene como propósito analizar el uso del *Carrier Aggregation* (CA) en redes LTE como método para maximizar el

aprovechamiento del espectro radioeléctrico que se ha asignado a los operadores móviles en Ecuador. Esta técnica, establecida en la norma LTE-A 3GPP, permite a los operadores combinar múltiples portadoras de diferentes bandas de frecuencias, con el propósito de aumentar el ancho de banda disponible para el usuario final, optimizar el desempeño de la red y utilizar el espectro de manera más eficaz.

Considerando que el espectro radioeléctrico representa un recurso limitado y valioso en el ámbito de las telecomunicaciones, su administración efectiva se ha transformado en una meta tanto para las entidades reguladoras como para las operadoras. En Ecuador la distribución del espectro entre las empresas de telefonía móvil ha resultado en una asignación fragmentada en múltiples bandas, lo que restringe en numerosas situaciones la capacidad de redes móviles para satisfacer la demanda creciente de datos. La técnica de *Carrier Aggregation* emerge como una solución tecnológica capaz de potenciar notablemente el rendimiento de las redes LTE, siempre que su uso sea técnicamente correcto y tenga el respaldo regulatorio y técnico.

1.3 Objetivos.

Objetivo General

- Efectuar un estudio acerca de *Carrier Aggregation* para optimizar el uso del espectro radioeléctrico que se ha asignado a las empresas de telecomunicaciones móviles del Ecuador, fundamentado en la normativa internacional

Objetivos específicos

- Investigar y explicar el concepto de *Carrier Aggregation* (CA) en redes LTE/LTE-A, especificando su funcionamiento.
- Analizar las normativas internacionales establecidas por 3GPP en relación con la funcionalidad del *Carrier Aggregation* para valorar su utilidad y basándose en los hallazgos sugerir recomendaciones

que puedan aportar al fortalecimiento del marco regulatorio en Ecuador.

- Implementar y validar en software Atoll la funcionalidad en *Carrier Aggregation* en LTE para comparar el rendimiento sin CA vs LTE-A con CA mediante simulaciones.

1.4 Problemática

El incremento del tráfico de datos móviles en los últimos años ha provocado una demanda creciente de espectro radioeléctrico, un recurso limitado y de gran importancia estratégica para las telecomunicaciones. Este incremento se ve principalmente estimulado por el uso masivo de smartphones, aplicaciones de transmisión en línea, videoconferencias, redes sociales y servicios de almacenamiento en la nube.[4] En esta situación, los operadores de dispositivos móviles se encuentran ante el reto de asegurar una buena la calidad del servicio (*QoS*) y una experiencia satisfactoria para los usuarios, pese a las restricciones en la disponibilidad de espectro[5]. Esta circunstancia es especialmente crítica en naciones como Ecuador, donde la distribución de bandas de frecuencia está fragmentada y, en numerosas situaciones, su utilización no ha sido optimizada de forma eficaz.

La tecnología de *Carrier Aggregation* (CA), implementada en LTE-A por el 3GPP, emerge como una solución esencial para optimizar el desempeño de las redes móviles. CA posibilita combinar varias portadoras (*carriers*) en una misma o distintas bandas de frecuencia, consiguiendo de esta manera velocidades de transmisión de datos superiores, un mejor uso del espectro y una capacidad de red considerablemente superior.[3] Sin embargo, para que esta técnica sea eficaz, no solo es necesaria una infraestructura compatible, sino también una organización estratégica de las bandas disponibles, en conformidad con las regulaciones a nivel nacional e internacional.

En Ecuador, el desarrollo hacia aceptación de mecanismo como *Carrier Aggregation*. Además, se requiere sistemas móviles más veloces y eficaces ha

sido influenciado por elementos como la división del espectro asignado, la presencia de antiguas tecnologías (2G, 3G) y la gradual que el marco regulatorio este en sintonía con las sugerencias internacionales del 3GPP y con las normas que han adoptado otros países que ya utilizan CA de forma exitosa.

A pesar de que los operadores móviles de Ecuador han logrado avances significativos en la implementación de LTE, siguen existiendo dudas sobre el uso que le están dando al espectro disponible como la cantidad y el tipo de bandas que están integrando mediante el *Carrier Aggregation* y si realmente están aprovechando este enfoque de forma efectiva. Además, en Ecuador existe muy poca información tanto académica como técnica que analice esta situación.

Por lo tanto, es crucial llevar a cabo un análisis exhaustivo que facilite entender hasta qué punto *Carrier Aggregation* se ha implementado en Ecuador, reconocer las frecuencias empleadas por las compañías de telefonía móvil y determinar si esta metodología realmente apoya un uso eficiente del espectro radioeléctrico, con el propósito de ofrecer sugerencias técnicas o normativas que impulsen su adopción.

1.5 Justificación.

El espectro radioeléctrico es un recurso natural escaso y esencial para el avance de las telecomunicaciones

El espectro radio eléctrico es un recurso natural limitado y estratégico para el progreso de las telecomunicaciones, sobre todo hoy en día donde existen una creciente demanda de servicios móviles de alta velocidad. Este recurso ha sido otorgado por los operadores móviles en varias frecuencias, muchas de las cuales están divididas. Esto supone un desafío importante para lograr una utilización eficaz de este recurso, tanto en Ecuador como en otros países de la región.[6]

Ante esta situación, la técnica de *Carrier Aggregation* (CA), presentada en el estándar LTE-A por el 3GPP, constituye una alternativa tecnológica factible para potenciar la capacidad y eficiencia espectral de las redes móviles. Esta técnica permite la combinación de múltiples portadoras a través de diferentes bandas de

frecuencias, logrando así velocidades de transmisión más altas, una calidad de servicio superior, y un uso más eficiente del espectro disponible. Sin embargo, en el caso de Ecuador, todavía no hay suficiente información técnica, ni investigaciones minuciosas sobre como los operadores están aplicando *Carrier Aggregation*, así como su efecto real en la gestión del espectro.

Por lo tanto, es esencial realizar esta investigación. Este análisis ofrecerá la oportunidad de examinar en detalle el uso actual del espectro por los operadores de telefonía móvil en Ecuador, reconocer las frecuencias que se están agregando y determinar si se está utilizando las funciones del *Carrier Aggregation* conforme a lo sugerencias por 3GPP.

La importancia de esta investigación radica en que sus hallazgos serán valiosos para autoridades reguladoras, empresas de telecomunicaciones y universidades, al proporcionar pruebas técnicas que apoyen en la elaboración de decisiones vinculadas a una correcta administración del espectro y el progreso de las redes de telecomunicaciones en el país.

1.6 Alcance del Proyecto.

Este proyecto de titulación tiene como objetivo principal el análisis técnico y normativo de la funcionalidad del *Carrier Aggregation* (CA) en redes LTE, con la finalidad de analizar su capacidad para mejorar el rendimiento del espectro radioeléctrico que se les ha otorgado a las compañías de telecomunicaciones móviles en Ecuador. El estudio abarca la revisión detallada de conceptos CA, su funcionamiento y sus componentes, además de examinar las especificaciones técnicas definidas por el 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP).

El trabajo implicara y sistematizar datos que se obtengan de fuentes nacionales e internacionales, incluyendo documentos técnicos, artículos científicos, normativas de las telecomunicaciones y regulaciones actuales en el país. Para determinar las combinaciones de bandas que podrían ser posibles y su compatibilidad con las configuraciones del *Carrier Aggregation* establecidas por

el 3GPP, se utilizara como referencia la distribución vigente del espectro radioeléctrico concedido a los operadores móviles en Ecuador.

Además, este proyecto solo abarcará redes LTE y LTE-A, no se profundizará en tecnologías de generaciones anteriores como 2G o 3G tampoco en la implantación de la 5G.

Los hallazgos alcanzados ayudarán a crear un diagnóstico técnico que sirva como fundamento para diseñar recomendaciones enfocadas en optimizar la gestión del espectro y la planificación en Ecuador. De esta forma se fortalecerá el marco regulatorio y se logrará una utilización más eficaz de este recurso escaso. De esta manera, el proyecto busca aportar tanto a la comunidad académica como a las autoridades y empresas del sector de telecomunicaciones, generando información útil para la toma de decisiones estratégicas.

1.7 Metodología.

Este análisis se basa en un método combinado que incorpora el estudio de documentos, simulaciones técnicas y la revisión de normativas para determinar de qué manera técnica la agregación de portadoras (CA) puede mejorar la utilización del espectro radioeléctrico que se destina a los operadores móviles en Ecuador. La base técnica y teórica se respalda en fuentes académicas pertinentes a la agregación de portadoras, su utilización en redes LTE-A y las metodologías utilizadas para su simulación y evaluación.

➤ Investigación Documental

En primera instancia, se recopila información técnica y académica relevante mediante la revisión de tesis, artículos científicos, normativa internacional del 3GPP y reportes emitidos por entidades como ARCOTEL. Como referencia destacada se encuentra una tesis orientada al estudio del impacto de *Carrier Aggregation* en redes *LTE-Advanced*, enfocada en la capacidad y

la calidad de servicio bajo escenarios reales y simulados, la cual resulta fundamental para el desarrollo del análisis

➤ **Investigación Experimental – Simulada**

Posteriormente, se emplean herramientas como Atoll o simuladores especializados (por ejemplo, NS-3 o LTE-Sim) para modelar redes LTE con soporte de CA. Estas herramientas permiten emular escenarios con agregaciones intra-banda y entre bandas asignadas en Ecuador, con el fin de evaluar métricas clave como el throughput, la eficiencia espectral y la capacidad de celda. En particular, la implementación de CA en NS-3 con hasta cinco *Component Carriers* para el análisis del desempeño en enlaces descendentes y ascendentes constituye una guía técnica relevante para el desarrollo de las simulaciones.

➤ **Investigación Inductiva**

En conclusión, basándose en los descubrimientos documentales y los resultados de las simulaciones, se elaboran sugerencias y conclusiones que buscan mejorar la utilización del espectro en Ecuador. Este proceso es de naturaleza inductiva, ya que establece una conexión entre la teoría, las simulaciones y el entorno local, con el objetivo de presentar directrices técnicas y normativas precisas.

CAPÍTULO II

2.1. Marco Contextual

2.1.1. Situación del espectro radioeléctrico en el Ecuador

El espectro radioeléctrico constituye un recurso natural limitado, fundamental para el correcto funcionamiento de las telecomunicaciones inalámbricas. En Ecuador, la agencia de regulación y control de las telecomunicaciones (ARCOTEL) tiene la responsabilidad de asignar y regular este recurso, otorgando concesiones de espectro a los operadores móviles a través de licitaciones públicas y planes nacionales de frecuencias.[7]

El espectro radioeléctrico se estructura en nueve bandas de frecuencias, las cuales están numeradas con números enteros de forma ascendente. Como el Hertzio (Hz) es la unidad básica de medida, las frecuencias se representan en distintas magnitudes dependiendo de su valor:

- En kilohercios (KHz) para rangos que llegan hasta 3000 KHz
- En Megahercios (MHz) para aquellas que son mayores a 3MHz y llegan hasta 3000 MHz
- En Gigahercios (GHz) para las que superan los 3 GHz y alcanzan hasta 3000 GHz.[8]

Tabla 1 Clasificación de las bandas de frecuencias. Elaborado por el autor

Nro. De banda	Simbología	Rango de frecuencia (comprende el límite superior, pero no el límite inferior)	Subdivisión métrica relacionada
4	VLF	3 a 30 KHz	Ondas milimétricas
5	LF	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3000 KHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas

11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12		300 a 3000 GHz	Ondas decimimétricas

2.1.1.1. Asignación de bandas a operadores móviles

Debido al posicionamiento y despliegue de las tecnologías móviles, tanto en 4G como en 5G, la industria se encuentra en la necesidad de disponer de un mayor espectro radioeléctrico en diversas frecuencias. De esta manera permitirá a los proveedores combinar los beneficios de cobertura geográfica que ofrecen las bandas bajas, con la habilidad de manejar grandes volúmenes de datos que tiene las bandas altas o milimétricas.[9]

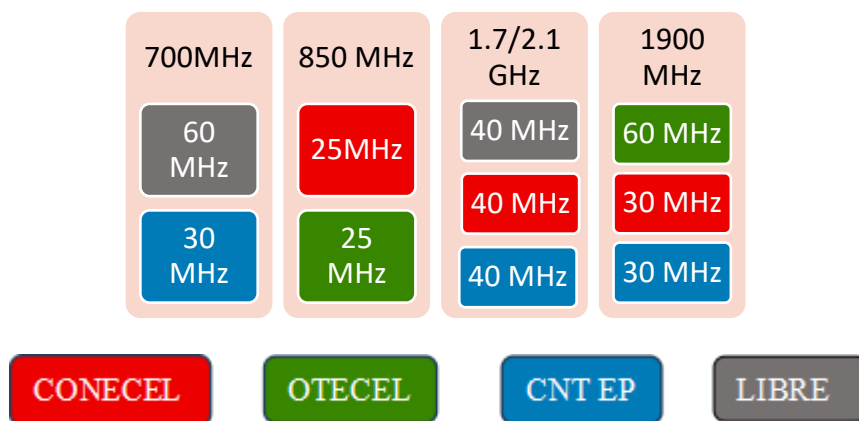


Tabla 2 Asignación del espectro por operador

En lo que respecta a la distribución del espectro radioeléctrico, Ecuador posee en la actualidad 280 MHz asignados a servicios móviles lo que equivale solamente al 26.9% de los 1.040 MHz que se han determinado para tales usos. Aunque hay 630 MHz listos para ser utilizados de inmediato y otros 130 MHz están en procesos de reordenación para asignaciones futuras, la cantidad que realmente se ha otorgado sigue siendo restringida en comparación con el total de potencial espectral identificado para fomentar servicios móviles avanzados en el país. [10]

2.1.1.2. Problemáticas en la gestión eficiente del espectro

En Ecuador, la ausencia de continuidad en los procedimientos de asignación para servicios móviles es uno de los retos más importantes en el manejo del espectro radioeléctrico. A pesar de que el país cuenta con una cantidad significativa de espectro disponible para su uso desde el 2015, no se han realizados nuevas asignaciones, lo que ha restringido el empleo de bandas estratégicas como la de 700 MHz. Esta banda es especialmente importante debido a sus magníficas características de propagación, ya que es fundamental para aumentar la cobertura de las redes LTE en áreas rurales y posibilitar la implementación de tecnologías emergentes como 5G.[9]

El espectro disponible que no ha sido asignado constituye una oportunidad latente que, si no se gestiona adecuadamente y no existen métodos de distribución claros, terminan siendo en un recuso poco aprovechado. Estas circunstancias ocasionan restricciones significativas para los proveedores de servicios móviles, que deben lidiar con una demanda de datos en aumento con porciones de espectros inadecuados o dispersas. Esta dispersión impacta de manera inmediata la posibilidad de aplicar estrategias de optimización como la agregación de portadoras (CA), que necesita la combinación de diversas bandas para mejorar la calidad del enlace inalámbrico.

La falta de procedimientos claros para renovar las concesiones actuales crea confusión en el entorno regulatorio. La ambigüedad con relación a los plazos y términos de renovación tienen un impacto negativo en las inversiones futuras de los operadores. Por otro lado, la incompatibilidad entre la estructura actual de asignación del espectro y los requerimientos técnicos esenciales para la implementación eficaz del Carrier Aggregation limita el uso total del espectro disponible.

Por otro lado, el debate acerca de la utilización futura de bandas de frecuencias como la de 6 GHz, que todavía no se ha resuelto en términos globales, muestra lo necesario de que Ecuador implemente una perspectiva estratégica, alineadas con las sugerencias de organismos tales como: la GSMA y la unión internacional de telecomunicaciones (UIT). La falta de decisiones oportunas sobre estas frecuencias

podría demorar aún más el desarrollo de las redes móviles avanzadas y profundizar la brecha digital en comparación con otros países de la región.

2.1.2. Evolución de las redes móviles

PRIMERA GENERACIÓN 1G

La primera generación de redes celulares se presentó en los años 80 y se distinguió porque era totalmente analógica. Se llamaba AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) y operaba a través de conmutación de circuito. El servicio móvil de primera generación era de baja calidad y no había seguridad en el sistema, esto se debía a que el sistema proporcionaba servicio de voz a través de canales analógicos, lo que restringe el número de usuario.[11]

Tabla 3 Características de la red móvil 1G.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Año	1980
Estándar	AMPS (Advanced Mobile Phone System)
Modulación	FM (Frequency Modulation)
Velocidad	1kbps a 2.4 kbps
Multiplexación	FDMA (frequency Division Multiple Access)
Canales	832 canales dúplex disponibles
Frecuencia	800 MHz y 900 MHz

SEGUNDA GENERACIÓN 2G

La segunda generación de redes celulares surgió en los años 90, diseñadas como redes de circuito conmutadas semejantes a las antiguas redes telefónicas fijas. GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles) fue la primera tecnología de segunda generación que brindó servicios digitales de voz y datos.[11]

Tabla 4 Característica de la red celular 2G.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Año	1990
Estándar	GSM, IS-95, JDC
Modulación	GMSK
Velocidad	14 kbps hasta 64 kbps
Multiplexación	TDMA CDMA
Canales	8 canales por bloque
Frecuencia	900 MHz y 1800 MHz Europa, Asia, África 850 MHz y 1900 MHz en América
Ancho de banda	200 KHz en bloques de 25 KHz

Utiliza bandas de frecuencia entre 900 MHz y 1800 MHz en Europa Asia y África y en América utiliza bandas de frecuencia de 850 MHz y 1900 MHz. GSM emplea una mezcla de TDMA Y FDMA con el fin de repartir los recursos materiales entre varios usuarios.[11]

TERCERA GENERACIÓN 3G

La tercera generación a través de UMTS (servicio universal de telefonía móvil) se desarrolló a finales de los 90, combina conmutación de paquetes para transmisión de datos y conmutación de circuito para la transmisión de voz.[11]

El proceso IM-2000 fue el que estableció los estándares de los sistemas 3G. se establecieron ciertos requisitos en este procedimiento, como 2Mbit/s de transferencia de datos en espacios cerrados y 384 kbit/s en entornos abiertos. En la tabla 5 se presenta las características más relevantes.[12]

Tabla 5 Característica de la red celular 3G.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Año	1990
Tecnología	WCDMA, CDMA2000 1X, HSPA
Estándares	Interfaz de radio TD-SCDMA, UMTS, CDMA
Banda de frecuencia	8 a 2,5 GHz
Velocidad	Desde 384 kbps a 2 MBps
Ancho de banda	De 5 a 20 MHz

CUARTA GENERACIÓN 4G

La cuarta generación de redes celulares también conocida como LTE consiste en emplear la tecnología IP, esto significa que todas las redes estarán conectadas, haciendo posible que los módems y teléfonos inteligentes se comuniquen de forma inalámbrica.[13] Se lanzaron en el 2010. Las redes de alta velocidad proporcionan velocidades de transmisión de 100 Mbps para terminales móviles y hasta 1 Gbps para terminales baja movilidad, permite el uso de TDD (Dúplex por división de tiempo) y FDD (dúplex por división de frecuencia), FDD es el modo dúplex más común en todo el mundo. En la tabla 6 se muestran las características. [11]

Tabla 6 Característica de la red celular 4G.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Año	2010
Velocidades	Cuando se encuentra en reposo alcanza 1G y tiene 100 Mbps en transmisión
Ancho de banda	De 5 a 20 MHz
Bandas de frecuencia	En nuestro continente americano, el sistema LTE emplea las bandas de 700, 800,900,1800 y 2600 MHz

Tecnología de acceso múltiple	WiMAX: móvil (802.16m) LTE TDD Y LTE FDD
Tecnología	IP

QUINTA GENERACIÓN 5G

La quinta generación de redes celulares está enfocada en los bordes de la celda, lo cual permite multiplicar por 100 la velocidad actual. Esto se conoce como *Edge computing* y está siendo desarrollada a frecuencias muy altas, como 73.000 MHz. En la tabla 7 se muestran los cambios significativos de 5G.[13]

Tabla 7 Característica de la red celular 5G.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Interfaz	Interfaz de radio NR
Canales	De hasta 240 KHz para alcanzar mayores velocidades
Velocidades	Superiores a 1Gbps
Frecuencias	3GHz y 300 GHz

2.1.2.1. Operadores móviles de Ecuador

En Ecuador, la telefonía móvil comenzó en 1993 con AMPS, una tecnología analógica proporcionada por las compañías Porta Celular (CONECEL) y Celular Power (OTECCEL). La digitalización se inicia en 1997, con la incorporación de TDMA, lo que permitió el acceso a servicios como SMS. No obstante, debido a que AMPS y TDMA tenían fallos de seguridad, la Suptel mando a retirarlos en el año 2007. [14]

En el 2003 se inició la transición a la segunda generación móvil. CDMA fue adoptada por *Bellsouth* (anteriormente Celular Power) y Porta eligió GSM, tecnología que tuvo más aceptación. Alegro (TELECSA) se fundó también en ese periodo, primero con tecnología CDMA y luego, a través de redes arrendadas, paso

a ofrecer servicios GSM. *Bellsouth* se convirtió en Movistar en el año 2005, y los servicios de datos se expandieron en GPRS, MMS y WAP.[14]

La tercera generación apareció en 2008, cuando Movistar y Porta pusieron en marcha UMTS, que incluía el estándar HSPA+, video llamadas y velocidades de datos más altas. La empresa pública CNT EP fue establecida en el 2010 y al año siguiente se unió a Alegro, además de implementar UMTS. Ese mismo año Porta paso a llamarse Claro.

CNT EP contaba con la base de usuarios más pequeña en 2013, lo cual la impulso a ser la primera compañía en brindar LTE en el país, convirtiéndose en la pionera de la cuarta generación móvil. En 2015, Movistar y Claro adquirieron su espectro LTE, lo que termino de completar la oferta nacional del 4G.[14]

En la actualidad, en Ecuador hay tres compañías móviles CNT EP, Claro y Movistar que ofrecen servicios hasta la cuarta generación LTE.

2.1.2.2. Crecimiento del tráfico móvil y necesidad de mayor capacidad

El avance de las tecnologías móviles (3G,4G) permiten a la población utilizar servicios de telefonía móvil e internet de alta velocidad (3G,4G) mediante dispositivos inalámbricos móviles, principalmente mediante tabletas y smartphones, que son los dispositivos más utilizados en la actualidad. El incremento de internet de alta velocidad impulsa el crecimiento económico del país, al incidir directamente en el producto interno bruto (PIB). La conectividad se establece como una herramienta crucial para promover el acceso a servicios digitales fundamentales, incluyendo la telemedicina, la educación remota, el teletrabajo y diversas formas de inclusión social digital.[15]

En cuanto a la cobertura de red, se informó en diciembre de 2020 que las tecnologías móviles de segunda y tercera generación (2G y 3G) llegaron al 97,11% de la población de Ecuador, lo que representa más de 17 millones de individuos con acceso a un servicio móvil avanzado. Esto significa que 97 de cada 100 habitantes tenían acceso a estas tecnologías. En cuanto a la tecnología 4G, registro un aumento significativo, llegando a una cobertura del 60.74% lo que equivale

cerca de 10.6 millones de individuos, lo que significa que 60 de cada 100 ecuatorianos tenían acceso a servicios móviles de cuarta generación.[15]

2.1.3. Relevancia del estudio del *Carrier Aggregation* en el contexto nacional

En las últimas décadas, la demanda de servicios móviles de alta velocidad ha tenido un aumento constante, dentro del ámbito de las telecomunicaciones de Ecuador, impulsado por la proliferación de smartphones, el uso de video en línea y el aumento de aplicaciones en tiempo real. El aumento ha causado una presión más fuerte sobre la infraestructura LTE sobre todo en zonas urbanas y periurbanas, donde la saturación del espectro provoca que las velocidades disminuyan y que empeore la experiencia de los usuarios.

A partir del 3GPP Release10, la técnica de Carrier Aggregation, se introdujo en el LTE-A, surge como una alternativa eficaz para optimizar el rendimiento y la capacidad de la red sin necesidad de asignar nuevo espectro. En Ecuador, su uso ha permitido a los operadores móviles ofrecer el estándar conocido comercialmente como 4G+, al unir dos o más bloques de espectro ya sea intra-banda o inter-banda para lograr velocidades superiores a 100 Mbps en condiciones favorables. [16]

Investigaciones recientes han evidenciado la utilidad y beneficio de esta tecnología en el país. En la pontificia Universidad Católica del Ecuador[1], se analizó el efecto de activar una segunda portadora LTE en una estación base, demostrando aumento significativo en la velocidad de descarga y en la eficiencia espectral. De manera complementaria, en la Escuela Politécnica Nacional[16], se sugirió la reutilización de la banda GSM 1900 MHz para habilitar una segunda portadora LTE, corroborando su factibilidad técnica y económica en áreas de gran concentración de usuarios.

La Agencia de Regulación y Control de las telecomunicaciones (ARCOTEL), admite que un uso eficaz del espectro es esencial para asegurar un servicio de calidad, dado que el país cuenta con una asignación de espectro móvil que se encuentra por debajo del promedio de la región.[17] En este contexto, la

agrupación de portadoras no solo mejora la utilización de los recursos ya disponible, sino que también existen la duración de las redes LTE mientras se llevan a cabo los tramites regulatorios para nuevas frecuencias que serán destinadas a 5G.

Finalmente, estudios independientes confirman que las redes 4G+ basadas en CA en Ecuador exhiben avances significativos en la velocidad de descarga en comparación con el 4G tradicional, lo cual impacta en la competitividad del sector y la satisfacción del usuario final.

2.1.3.1. Ventajas operativas del CA para operadores

Según los estudios la técnica de *Carrier Aggregation* ofrece a los operadores en Ecuador ventajas operativas claras:

- Mejora del espectro actual: aumenta la capacidad sin depender por completos de nuevas licitaciones.
- Optimización de la experiencia de usuario: aumentado las velocidades y disminuye la latencia percibía.
- Facilitador del cambio a 5G: optimiza la eficiencia de LTE durante la transición a nuevas tecnologías

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Redes LTE y tecnologías de acceso radioeléctrico

Las redes *Long Term Evolution* (LTE) representan uno de los logros más significativos en el progreso de las telecomunicaciones móviles, siendo reconocidas como la tecnología de cuarta generación (4G). Su diseño tiene como objetivo asegurar una mayor capacidad de transmisión, disminuir la latencia y mejorar la calidad del servicio (*QoS*), elemento clave ante el aumento constante en la necesidad de conectividad y servicios de banda ancha móvil.

La red LTE se establece en el *Release 8* de la 3GPP como una evolución de las redes de tercera generación (3G); se trata de una red completamente IP, lo que

implica que no hay separación entre la comunicación de paquetes para datos y la conmutación de circuitos para voz. LTE emplea ciertas funcionalidades ya presente en HSP, como *scheduling* para canales y la rápida adaptación del enlace. Permitiendo a la red mejorar de manera dinámica el rendimiento de cada celda. En lugar de utilizar canales específicos para transmitir datos a usuarios determinados, se fundamenta completamente en canales compartidos y de difusión. De este modo, se incrementa la eficiencia tanto de la interfaz aérea E-UTRA *Evolved universal Terrestrial Radio Access* (el acceso universal evolucionado de radio terrestre) como de la red, ya que no es necesario asignar recursos fijos a cada usuario, sino que se distribuyen según la demanda en tiempo real.[18]

La arquitectura de LTE se basa en el *Evolved Packet Core* que simplifica el núcleo de la red y en un sistema avanzado de acceso radioeléctrico. Este último emplea técnicas eficaces demodulación y multiplexación en el enlace ascendente usa SCFDMA y en el OFDMA permite la optimización de la disminución de interferencias entre usuarios reducir el consumo energético en los dispositivos móviles y el rendimiento espectral.

La arquitectura de LTE se basa en el *Evolved Packet Core (EPC)*, que simplifica el núcleo de red, y en un sistema de acceso radioeléctrico sofisticado, que utiliza métodos eficientes de multiplexación y modulación. En el enlace descendente (*downlink*), LTE emplea OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), en cambio, en el enlace ascendente (*uplink*), utiliza SCFDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*). Esta combinación optimiza la eficiencia espectral y disminuye la interferencia entre los usuarios, mientras reduce el uso de energía en los aparatos móviles.

2.2.1.1. Arquitectura y funcionamiento de la red LTE

El propósito de la arquitectura de *Long Term Evolution (LTE)* fue simplificar la estructura de red y maximizar la utilización de recursos radioeléctricos. Principalmente se compone de dos bloques: el núcleo de paquetes evolucionados

(EPC) y la red de acceso radioeléctrico (*E-UTRAN*). Estos componentes operan en conjunto para proporcionar conexiones veloces, poca latencia y un respaldo eficaz de servicios basados en IP. [3]

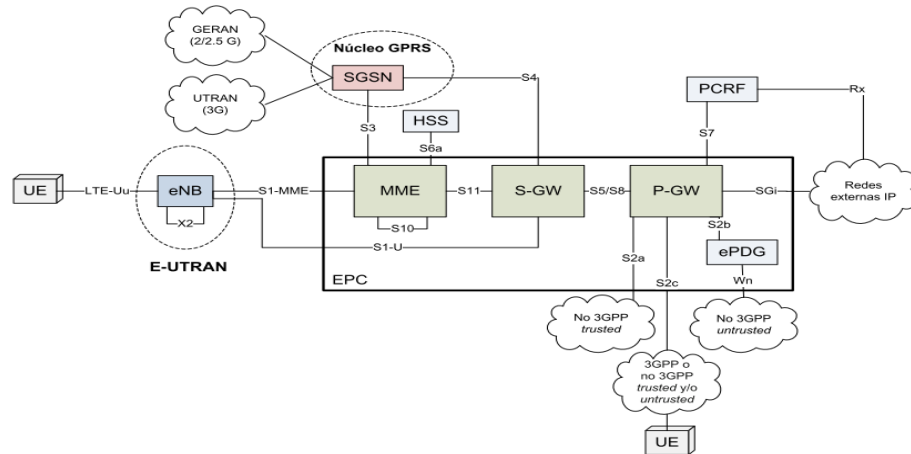


Figura 1Arquitectura LTE

El núcleo de la red LTE es el *Evolved Packet Core* (EPC). Entre sus elementos fundamentales se incluyen:

- **MME (Entidad de gestión de movilidad / *Mobility Management Entity*)**. Es responsable de la señalización (actúa a nivel del plano de control) que regula los nodos en las redes LTE, facilitando que el volumen de red y el tráfico se incremente de manera autónoma. El MME administra la movilidad hacia las redes externas al seleccionar la puerta de enlace a red de paquetes de datos (P-GW), la cual se lleva a cabo a través del protocolo NAS. Asimismo, tiene la tarea de comunicarse con la puerta de enlace servicio (S-GW), estableciendo el enlace entre un nuevo *eNB* (*evolved Node B*/ Nodo B evolucionado) y un UE. Además, verifica la entidad de los usuarios mediante una conexión instantánea con el HSS (*home Subscriber Server* / Servidos de Suscriptores de Abonado). También cuenta con un sistema de control de portadoras que simplifica la administración del tráfico, estableciendo un enlace para otorgar alta prioridad a los servicios

que requieran de alguna categoría en el transporte de paquete video conferencia, voz entre otros. [19]

- **S-GW (Puerta de acceso de Servicio / Gateway de Servicio).** Es responsable de la ruta de todos los paquetes de datos. El S-GW es un dispositivo del nivel de usuario que es gestionado por el MME. Funciona como un soporte de anclaje retransmitido y recibiendo los paquetes de movilidad local al eNB y proporcionando protección a la UE. Facilita el desplazamiento con las redes del sistema global para las comunicaciones móviles (GSM). En la configuración "Idle" del UE, el S-GW permite liberar la vía de datos del enlace descendente, lo que facilita el uso del ancho de banda disponible. Además, el S-GW gestiona y almacena datos del UE, tales como los del servicio de transmisión y los del enrutamiento. [19]
- **P-GW o PDNGW (Puerta de Enlace a red de paquetes de datos).** facilita la interacción con las redes externas de paquetes de datos tales como internet y el subsistema multimedia IP (IMS). Regula la actividad movilidad del UE ya que atribuye la dirección IP y define las medidas de seguridad filtrado de paquetes y ruta de transporte. [19]
- **HSS (Servidor de Suscriptores de Abonados / Home Subscriber Server).** Guarda y gestiona toda la información referida a los abonados. Se conecta de manera directa con el MME para llevar a cabo la verificación. [19]

La E-UTRAN está formada por las estaciones base avanzadas denominadas *eNodeB*, que agrupan funciones de gestión de recursos de recursos de radio y procesamiento de señales. En contraste con tecnologías previas, que requerían un controlador central (como el RNC en UMTS), en LTE los *eNodeB* interactúan directamente a través de la interfaz X2, lo cual disminuye la latencia y potencia la eficiencia en las operaciones. [19]

El funcionamiento de la interfaz radioeléctrica, LTE emplea OFDMA transmisión descendentes y SC-FDMA para la ascendente. Esta decisión facilita una utilización más efectiva del espectro, ofreciendo una experiencia superior al usuario, puesto que minimiza la interferencia y mejora la eficiencia energética en los dispositivos móviles. Además, la tecnología permite anchos de banda adaptables que oscila entre 1.4 MHz y 20 MHz, ajustándose a los requerimientos de los operadores y a la disponibilidad del espectro. [19]

Esta arquitectura permite que LTE alcance velocidades de transmisión elevadas (hasta 100 Mbps en descarga y 50 Mbps en subida en sus primeras versiones), mientras establece los cimientos para el progreso hacia LTE-*Advanced* y 5G, en los que se integran técnicas como la Agrupación de Carrier (CA), el MIMO en masa y modulaciones de orden superior.

2.2.1.2. Acceso al medio, modulación y espectro en LTE

En LTE, el acceso al medio se organiza para aumentar la eficiencia del espectro y minimizar la interferencia entre usuarios. El canal descendente utiliza OFDM, que segmenta el canal en varias subportadoras ortogonales, permitiendo así una asignación de recursos flexibles en términos de frecuencia y tiempo, dependiendo de las condiciones de la señal y las necesidades de cada usuario. El canal ascendente se basa en SC-FDMA, que preserva la ortogonalidad, pero presenta un menor PAPR, lo que mejora la eficiencia del amplificador de potencia en los dispositivos de los usuarios y disminuye el gasto energético.

La modulación es el procedimiento a través del cual se alteran las características de la señal. La portadora es alterada de acuerdo con la señal modulante, que es la que contiene los datos a transmitir. En LTE se emplean dos formas de modulación digital para enviar datos en el plano de usuario:

- La modulación de amplitud en cuadratura (QAM)
- La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QSPK)

La modulación QPSK emplea cuatro fases diferentes de la portadora, lo que exige que la entrada digital se agrupe en dibits (pares de dos bits), porque estos producen las cuatro combinaciones requeridas para cada fase. Por otro lado, en QAM la modulación se basa tanto en la amplitud como en la fase, lo que posibilita contar con más estados, como el 16 QAM y el 64 QAM, que envían 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente.

En LTE se utilizan estos esquemas dado que posibilita un incremento en la cantidad de información transmitida por símbolo. La modulación 64 QAM tiene una eficiencia espectral superior, pues trasmite más bits por segundo por Hertz. Por eso es la modulación más eficaz de las mencionadas para enviar información en el plano de usuario. [3]

2.2.1.3. Evolución hacia LTE-Advanced y necesidades espectrales.

El desarrollo de las telecomunicaciones móviles hacia LTE-A(LTE-*Advanced*) aparece como una respuesta a las demandas crecientes de los usuarios que buscan velocidades de datos superior, una mejor calidad de servicio (*QoS*) y una mayor eficiencia en la utilización del espectro radioeléctrico. Aunque LTE marco un progreso notable en comparación con tecnologías previas como UMTS y HSPA, el aumento constante del tráfico móvil derivado de servicios de video en alta definición, aplicaciones en tiempo real y la expansión del internet de las cosas (*IoT*) hizo evidente la necesidad de contar con una arquitectura más sólida y adaptable.[20] ,[21]

En este escenario, el 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP) describió a LTE-A como una evolución directa de LTE, integrando tecnologías avanzadas como la agregación de portadoras (CA), MIMO de orden mayor, multipunto coordinado (CoMP) y soporte para anchos de banda más grande. Dentro de estas el *Carrier Aggregation* se destaca como fundamental, dado que posibilita la unión de varias portadoras no contiguas incluso en distintas bandas de frecuencias para conseguir anchos de bandas eficaces hasta 100 MHz, superando de esta manera las

restricciones de espectro fragmentado que afectan la mayoría de los operadores globalmente. [21]

Para Ecuador, este progreso adquiere una importancia especial debido a la falta y fragmentación del espectro radioeléctrico asignado a los operadores móviles. Las bandas existentes, tales como 700 MHz, 1700/2100 MHz (AWS) y 2600 MHz, a menudo no están alineadas ni cuentan con bloques de ancho adecuado para asegurar servicios de alta banda. Así pues, la puesta en marcha de *LTE-Advanced* con *Carrier Aggregation* se presenta como una alternativa factible para maximizar el uso de los recursos espectrales existentes, incrementando la capacidad de la red sin requerir de inmediato nuevas asignaciones frecuenciales.

2.2.2. Carrier Aggregation: concepto técnico y estructura funcional

De acuerdo con lo establecido por el 3GPP, el ancho de banda que se debe utilizar en LTE oscila entre 1.4 MHz y 20 MHz. No obstante, la mayoría de los operadores tiene asignaciones de espectro menores a 20 MHz, ya sea en bloques continuos o en varias bandas fragmentadas y no contiguos. Esto impide el uso de una única portadora LTE con un ancho de banda de 20 MHz, lo cual es un impedimento aún más grande si se tiene en cuenta que una de las metas primordiales de LTE-A es llegar a anchos de banda de hasta 100 MHz. Además, la disponibilidad de bloques amplios y la asignación de frecuencias en cada banda definida por el 3GPP se ven obstaculizada debido al uso limitado del espectro radioeléctrico. Para sobrepasar estas limitaciones y atender al aumento de tráfico originado por la masificación de los servicios de voz y datos, a partir de su *Release 10* LTE-A aplica el método de *Carrier Aggregation* (CA). Según lo establecido por el 3GPP, esta tecnología posibilita que un equipo de usuario (UE) envíe y reciba en cinco portadoras independientes, cada una de ellas con un máximo de 20 MHz, alcanzando así un ancho de banda total de hasta 100 MHz.[3]

2.2.2.1. Definición y objetivos de la agregación de portadoras

La técnica de agregación de portadora (CA, por sus siglas en inglés), que se aplica en las redes móviles, posibilita la combinación de banda con frecuencia bajas, medias y altas para incrementar el ancho de banda y cobertura disponible. Esto implica que la velocidad de transmisión de datos mejora. El modelo del terminal y la tecnología de la red empleada determinan cuantos *Component Carrier* (CC) pueden manejar un dispositivo, lo cual ha ido cambiando a medida que se ha actualizado las especificaciones del 3GPP. La posibilidad aumentar significativamente el ancho de banda total asignado a un dispositivo se logra mediante la combinación de varias portadoras, lo que permite una tasa de transferencia de datos más alta y mejora la experiencia del usuario.[2] [3]

Los principales objetivos de la CA son:

- Incrementar el ancho de banda efectivo, sumando varias portadoras de hasta 20 MHz cada una.
- Mejorar la eficiencia espectral, al aprovechar fragmentos de espectro no contiguos.
- Garantizar la compatibilidad, permitiendo que los dispositivos que no soportan CA sigan operando en la portadora primaria.
- Aumentar el rendimiento de la red en escenarios con alta densidad de usuarios o servicios de gran consumo de datos

2.2.2.2. Tipos de agregación: intra-banda contigua, no contigua e inter-banda

Es factible combinar varias portadoras LTE en la técnica del *Carrier Aggregation* (CA) por medio del enlace ascendente y también del descendente, independientemente de que se encuentren o no en bandas contiguas. Esta propiedad posibilita que los operadores incrementen el ancho de banda disponible al utilizar mediante el uso simultaneo de recursos de radio varias portadoras lo que resulta en una capacidad más alta de la red y velocidades de transmisión superiores donde cada portadora individual denominada *component carriers* pueden funcionar con anchos de banda que oscilan entre 1.4 MHz y 20 MHz incluyendo

valores intermedios como 3,5,10 o 15 MHz. Según las especificaciones se pueden añadir hasta cinco *component carriers* lo que permite alcanzar un ancho total de banda de hasta 100 MHz.

El 3GPP ha establecido tres tipos de *Carrier Aggregation* para abordar diferentes situaciones de disponibilidad espectral, lo que posibilita a los operadores adaptar este método a sus propias combinaciones específicas de bandas de frecuencias.[3]

Estos esquemas se clasifican en intra-banda contigua, intra-banda no contigua e inter-banda, según la ubicación relativa de las portadoras dentro de las bandas de frecuencia asignadas.

Intra-banda contigua: Sucede cuando las portadoras utilizadas están en la misma banda de frecuencias y se sitúan contiguas entre sí, formando un bloque continuo de espectro. Esta modalidad es más fácil de aplicar y, al tener un canal con mayor ancho de banda, posibilita que la velocidad de transmisión aumente. [22]

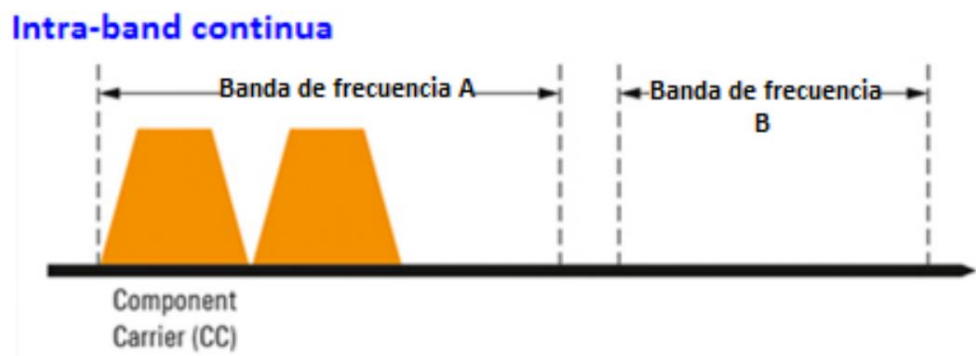


Figura 2 configuración del CA intra-band contigua

Intra-banda no contigua: ocurre cuando las portadoras son de la misma banda de frecuencia, pero se encuentran distanciadas por bandas de guarda o espacios que no se utilizan para la transmisión. Esta técnica, en comparación con la modalidad contigua, es más compleja de implementar; no obstante, brinda más flexibilidad y un uso del espectro disponible más eficaz.[22]

Intra-band discontinua

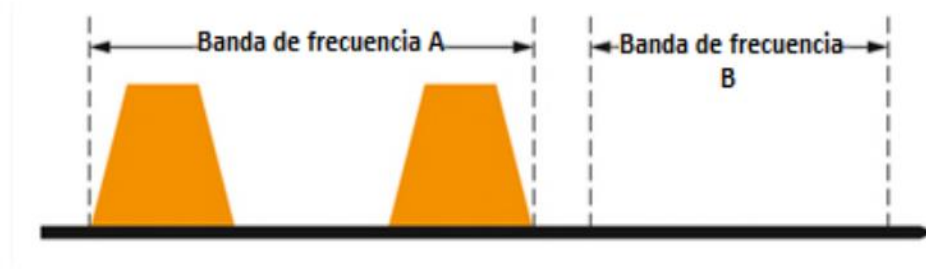


Figura 3 Configuración del CA intra-band no contigua

Inter-banda: la forma más compleja de Carrier Aggregation es la agregación inter-banda, pues fusiona portadoras que están en bandas de frecuencias distintas. Este esquema posibilita que los operadores saquen provecho de los recursos espectrales que se distribuyen en diferentes bandas, lo cual brinda un servicio más sólido y una cobertura superior. Asimismo, especialmente beneficiosos en situaciones en las que ciertas bandas tienen limitaciones o congestión en su alcance, optimizando de esta manera la capacidad y la calidad de red.[22]

Inter-band

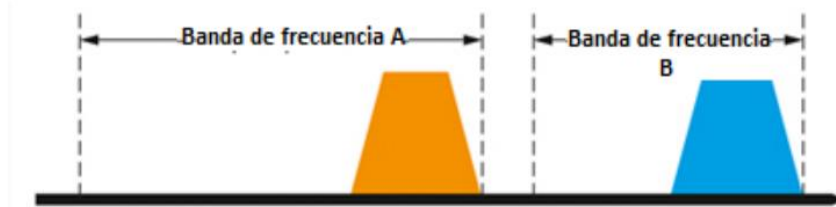


Figura 4 Configuración del CA inter-banda

2.2.2.3. Componentes involucrados: eNodeB, UE, scheduler

La puesta en práctica de *Carrier Aggregation (CA)* en la arquitectura LTE y LTE-A necesita la colaboración de tres elementos esenciales: el *eNodeB*, el *scheduler* y el *User Equipment (UE)*. Cada uno de ellos tiene un rol particular en la administración eficaz del espectro y en la provisión de un servicio de calidad superior al usuario final.

El *eNodeB (Evolved Node B)* constituye el elemento central de la red de acceso radioeléctrico (RAN). Gestiona recursos de radio supervisando la transmisión de

datos y organizando la agrupación de portadoras, es responsable de proporcionar la conectividad entre los usuarios y la red del operador. Su relevancia se debe a que se concentra las tareas de modulación, transmisión, codificación y control de potencia. Es responsable de llevar a cabo órdenes del programador y de transmitir constantemente al núcleo de la red los parámetros de calidad de la señal.

El equipo del usuario / *User Equipment* (UE) es el dispositivo que utiliza el usuario para conectar a la red. Por lo general, son dispositivos específicos, como las tarjetas de datos que se emplean en las redes 2G y 3G, o equipos portátiles como los teléfonos inteligentes.[23] Este componente no solo recibe y transmite datos, sino que también realiza mediciones de la calidad de la señal (RSRP, RSRQ, SINR), reportándolas al *eNodeB*. Dichos reportes son esenciales para la toma de decisiones del *scheduler* y para la asignación dinámica de recursos, especialmente en escenarios donde se utilizan múltiples portadoras agregadas

El *scheduler* tiene la responsabilidad de programar como se asignan los recursos de radio dependiendo de la política del operador, el tráfico que se requiere y las condiciones del canal. En situaciones con Carrier Aggregation su función se vuelve esencial porque debe determinar en qué portadora y en que bloque de recursos se envían los datos, con el objetivo de optimizar la eficiencia espectral sin comprometer la calidad de servicio (QoS). Para hacerlo se basa en la capacidad del *eNodeB* de repartir los recursos dinámicos y en las métricas reportadas por el UE, como el SINR y el RSRP.

En conjunto, la interacción entre el *eNodeB*, el UE y el *scheduler* constituye el núcleo operativo de LTE con *Carrier Aggregation*. Sin la coordinación de estos elementos, la agregación de portadoras no podría garantizar los beneficios esperados en términos de eficiencia espectral y mejora de la calidad del servicio.

2.2.2.4. Condiciones necesarias para la implementación de CA

Para la implantación del CA se considera los siguientes lineamientos técnicos, el 3GPP establecido tres elementos fundamentales:

1. El ancho de banda de transmisión agregada (ATBC): representa la suma total de bloques de recursos físicos (PRB) agrupados entre las portadoras.
2. Clases de ancho de banda de CA: vinculan la cantidad máxima de ATBC con el número admitido de *Component Carrier* (CC). Los Release 10 y 11 abordan tres tipos:
 - (a) $ATBC \leq 100$ y un máximo de 1 CC),
 - (b) $ATBC \leq 100$ con hasta 2 CC
 - (c) $100 \leq ATBC \leq 200$ con un máximo de 2 CC

Por último, la configuración de CA combina las clases de ancho de banda disponible con las bandas operativas de E-UTRAN. Aunque *Release 10* establece hasta tres combinaciones de portadora, *release 11* las extiende, conservando un ancho de banda agregado máximo de 40 MHz y un total máximo de dos *Component Carriers*. Asimismo, en ambos *releases*, cada portadora debe tener un ancho de banda en el enlace ascendente que sea idéntico al de su par de enlaces descendentes. En configuraciones inter-banda, solo se permite un CC en *uplink*, lo que imposibilita la implementación de CA en ese sentido.[24]

2.2.3. Normativa internacional sobre Carrier Aggregation (3GPP)

La evolución de las redes de cuarta generación (4G) no se ha limitado únicamente a mejoras en capacidad y cobertura, sino también a la necesidad de establecer una normativa internacional que asegure la interoperabilidad entre fabricantes y operadores. En este contexto, el 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP) se constituye como el organismo encargado de estandarizar las tecnologías de acceso radioeléctrico y de núcleo de red en LTE y LTE-*Advanced*.

Dentro de estos estándares, la Agregación de Portadoras (*Carrier Aggregation*, CA) surge como una de las innovaciones clave, ya que permite combinar múltiples bloques de espectro, contiguos o no, con el fin de incrementar el ancho de banda efectivo y, en consecuencia, la eficiencia espectral y la calidad de servicio.

El 3GPP establece en sus diferentes *Releases* los lineamientos técnicos para la implementación de CA, los cuales se ajustan a los requerimientos definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para que LTE-*Advanced* pueda ser reconocido como una tecnología IMT-*Advanced*. De este modo, los operadores móviles cuentan con una guía estandarizada para desplegar la agregación de portadoras bajo condiciones técnicas y regulatorias homogéneas, evitando fragmentación tecnológica entre regiones.

2.2.3.1. Rol del 3GPP y releases asociados a Carrier Aggregation

El 3GPP desempeña un rol central en la evolución de LTE hacia LTE-*Advanced*, ya que define los aspectos técnicos que rigen la agregación de portadoras y otros mecanismos avanzados. Esta evolución ha sido plasmada en una secuencia de *Releases*, en donde cada versión introduce mejoras significativas:

- *Release 10* (2011): Marca el inicio de LTE-*Advanced*, incorporando la *Carrier Aggregation* como técnica fundamental para cumplir con los requisitos de las redes IMT-*Advanced*. se puede combinar hasta un máximo de 5 portadoras cada una de 20 MHz lo que permite alcanzar un ancho de banda de hasta 100 MHz.
- *Release 11* (2012): implementa mejoras en la flexibilidad de CA y aumenta la capacidad de la red con métodos como el Coordinated Multi-Point (CoMP)
- *Release 12* (2015): permite la agregación de hasta 3 portadoras inter-banda extendiendo así la funcionalidad del CA con soporte de bandas mayores y con nuevas configuraciones que mejoran la experiencia del usuario.
- *Release posteriores (13 y 14)*: Para la transición de la 5G ampliaron las combinaciones posibles de bandas aún más, el CA sigue siendo un componente primordial para la administración eficiente del espectro. La normativa del 3GPP garantiza de esta manera que CA evolucione de manera compatible y escalonada en los despliegues comerciales a nivel mundial. Consolidándose como un eje

primordial en la mejora de la calidad de servicio y la eficacia espectral en las redes LTE-A

2.3 Perspectiva del CA y del Marco Regulatorio del Espectro en Ecuador

Para el desarrollo de las telecomunicaciones en el Ecuador, el espectro radioeléctrico es un recurso escaso y de gran importancia estratégica. Se encuentra regulada su gestión por el Estado a través de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), entidad encargada de administrar, planificar y supervisar el uso eficiente de las bandas de frecuencia disponibles. En este contexto, la evolución hacia tecnologías de cuarta generación (4G LTE y LTE-*Advanced*) ha impulsado la necesidad de optimizar la utilización del espectro para garantizar una mayor cobertura, capacidad y calidad de servicio.

Es un eje fundamental la implementación de la técnica del *Carrier aggregation* (CA) porque permite combinar diferentes bloques de frecuencia a los operadores móviles con el fin de incrementar el ancho de banda disponible. De esta forma se puede responder a la creciente demanda de servicios de banda ancha móvil y mejorar la eficiencia espectral del país.

El marco regulatorio también establece condiciones económicas y técnicas para la viabilidad de aplicar *Carrier Aggregation* y no solo determina las asignaciones del espectro a los operadores en Ecuador. La adecuada administración de las bandas, junto a políticas de *refarming* y licencias flexibles, son elementos cruciales para permitir situaciones de agregación de portadoras, como lo demuestra la experiencia a nivel internacional. Por lo tanto, para entender los beneficios y el impacto que el CA pueda tener en el entorno nacional, es esencial examinar la normativa actual y las perspectivas de evolución del espectro.

2.3.1. Políticas nacionales de asignación y uso del espectro

Art.5 Definición de las telecomunicaciones

Se conoce como telecomunicaciones a cualquier emisión, recepción o transmisión, video, sonido, signo, señales, textos o dato de cualquier tipo de naturaleza, por medio de sistemas alámbricos, inalámbricos u ópticos, ya sea inventados o que aún están por inventarse. La actual definición no tiene un carácter taxativo, por lo tanto, cualquier medio quedara incluido en ella, modalidad o tipo de transmisión que surge de la innovación tecnológica.[25]

Art6. Espectro radioeléctrico

Conjunto de ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio sin requerir un medio artificial que facilite su circulación, empleado para ofrecer servicios de telecomunicaciones, seguridad, defensa, emergencias, transporte, radiodifusión sonora y televisión e investigación científica, entre otros. Su uso deberá alinearse con los principios y normativas constitucionales.[25]

Art.18 Uso y explotación del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un bien público y una propiedad escasa del Estado, que no se puede vender ni embargar. El uso y explotación de esta actividad requieren primero que la agencia de regulación y control de las telecomunicaciones emita un título habilitante, conforme lo determina la ley.[2], [25]

Las bandas de frecuencias para la asignación a estaciones de televisión y radiodifusión ya sean comunitarias, privadas o públicas, se regirán por lo establecido en la ley orgánica de comunicación y su reglamento general [25]

2.3.1.1. Entes reguladores (ARCOTEL, MINTEL)

En Ecuador, dos entidades principales se encargan de la regulación y gestión del espectro radioeléctrico: la agencia de regulación y control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) y El Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad De La Información (MINTEL).

La función de MINTEL es formular políticas públicas relacionadas con la conectividad, las telecomunicaciones y la transformación digital, con el objetivo

de fomentar una sociedad de la información inclusiva. Algunas de sus responsabilidades son las siguientes: la coordinación entre instituciones con entidades internacionales para garantizar el cumplimiento de estándares regulatorios y técnicos, la definición de objetivos nacionales en cuanto a conectividad y la planificación de estrategias del uso del espectro.

Por otra parte, la ARCOTEL es la organización técnica encargada de administrar, regular y supervisar el espectro radioeléctrico. Sus responsabilidades abarcan la supervisión de los proveedores de servicios móviles y fijos, el seguimiento de la ocupación del espectro en el país y la asignación de frecuencias. Esta entidad tiene un papel fundamental en la transición a tecnologías de vanguardia como LTE-A y 5G, en las que la eficacia en la gestión del espectro es determinante para garantizar una alta calidad de servicio y mantener la competitividad del sector.

Uno de los desafíos que se enfrenta ARCOTEL es la dispersión de datos relacionados con el espectro. Esta circunstancia ha promovido la creación de plataformas integradas para afianzar información sobre la ocupación radioeléctrica. Además de aumentar la transparencia en la asignación, estas herramientas posibilitan también que se planifique nuevas tecnologías que requieren esquemas complejos de gestión espectral, como el acoplamiento de portadoras para LTE-A y las bandas para 5G.

En términos generales, la cooperación entre ARCOTEL y MINTEL sienta las bases para un marco regulatorio que garantiza una utilización eficiente, equitativa y sostenible del espectro radioeléctrico en Ecuador. De este modo, se garantiza que los avances tecnológicos estén de acuerdo con las necesidades nacionales y con las normas internacionales por entidades como UIT y el 3GPP.

2.3.1.2. Estructura de asignación por operador y tecnología

En Ecuador, la asignación del espectro de radiofrecuencia para los diversos operadores móviles ha sido llevada a cabo con un enfoque que busca asegurar una cobertura en todo el país, mejorar el uso de recursos y facilitar el cambio hacia generaciones tecnológicas avanzadas. Claro, Movistar y CNT, cada uno tiene

frecuencias que ha sido otorgadas por la autoridad reguladora para ofrecer servicios de 2G, 3G y 4G, y estas frecuencias servirán de base para la futura llegada de 5G.

Claro tiene una parte importante del espectro en las frecuencias de 1900 MHz y AWS (1700/2100 MHz), que se utilizan mayormente para el funcionamiento de LTE. En otro orden, Movistar tiene asignado las frecuencias de 850 MHz y 1900 MHz con un enfoque de la implantación de servicios 3G y 4G. Finalmente CNT tiene frecuencias en la banda de 700 MHz, lo cual le permite brindar una mejor cobertura para servicios de internet móvil en las bandas de 1900 y 2100 MHz.

De acuerdo con el estudio efectuado CNT tiene la intención de utilizar nuevas bandas espectrales en el 5G, incluidas las frecuencias de 24 GHz y el bloque de 3,5 GHz. Esto demuestra una diferencia significativa en cómo se distribuyen los recursos según la técnica y la clase de servicio (FWA, 4G o 5G).

En resumen, la disposición de asignación en Ecuador es un reflejo del desarrollo tecnológico de los operadores y de su preparación para la transición a 5G. Esto demuestra un patrón en el que las bandas bajas (700 y 850 MHz) se emplean sobre todo para cobertura, mientras que las bandas medias y altas (AWS, 1900, 2100 Y 3,5 GHz) se usan para capacidad y velocidades más altas, lo cual asegura una sólida base para la futura agrupación de portadoras. En la tabla 8 se muestran las frecuencias y bandas que trabajan los operadores móviles de Ecuador

Tabla 8 Bandas y Frecuencias de los Operadores Móviles.

Elaborado por el autor

Operador	Tecnología	Frecuencia	Red
Claro	GSM	850/1900 MHz	2G-3G
	Banda 4 LTE	1700/2100 MHz	4G

Movistar	Banda 2	1900 MHz	2G-3G- 4G LTE
	Banda 5	850 MHz	2G-3G
CNT	AWS o Banda 4	1700/2100 MHz	4G LTE
	APT o Banda 28	700 MHz	

CAPÍTULO III

3. Metodología y Parámetros a evaluar en la simulación en ATOLL

3.1. Descripción del software Atoll

Atoll es un producto desarrollado por la compañía Forks que proporciona un software multitecnológico para diseñar y optimizar redes inalámbricas. Su propósito es asistir a los operadores de redes inalámbricas durante todo el ciclo de estas, desde que se diseñan hasta que se optimizan. Es compatible con tecnologías como 5G NR, LTE, UMTS, GSM y CDM, además de los más recientes desarrollos como MIMO masivo, formación de haz en tres dimensiones y propagación de ondas milimétricas.[26]

3.1.1. Características generales del software

Entre las principales características tenemos:

- Capacidades superiores en el diseño de redes: instrumentos para calcular propagaciones de gran calidad, que admiten redes de tipo jerárquico y multicapa, modelado del tráfico, planeación automática de frecuencia optimización de red y codificación.
- Arquitectura adaptable y abierta: debido a una base de datos novedosa que posibilita el intercambio de datos y la administración

de la integridad fácil con otros sistemas de telecomunicaciones, es capaz de gestionar entornos multiusuarios.

- Cálculos paralelos y distribuidos: Atoll favorece la distribución de tareas informáticas entre distintas estaciones de trabajo y posibilita la ejecución de cálculos paralelos en servidores con varios procesadores, lo que reduce significativamente los plazos requeridos para simulaciones y predicciones optimizando así el empleo del hardware existente.
- Gis avanzado: Atoll puede trabajar con datos geográficos en diversas resoluciones y formatos, además de poder entregar herramientas GIS. Ofrece la posibilidad de cargar base de datos complejas que contienen información geográfica y visualizarlas de forma interactiva utilizando múltiples capas.[26]

Con la implementación de herramientas de planificación, seremos capaces de acceder a bases de datos topográficos con alta resolución y utilizarlas para obtener perfiles del terreno y datos que se usaran para hacer los cálculos de propagación. Nos posibilitara utilizar procedimientos más complejos y cálculos muchos más arduos para predecir la propagación radioeléctrica. Asimismo, nos ayudará a planificar al poder verificar diferentes alternativas de configuración de red (cambiar ubicaciones, potencias, orientar antenas, etc.), lo que hace más sencillo el proceso de optimización.

3.1.2. Funcionalidades aplicadas a redes LTE/LTE-A

El software Atoll es una herramienta que se ha convertido en un estándar dentro de la industria de las telecomunicaciones, por lo cual es esencial examinar sus capacidades para planear y optimizar redes LTE y LTE-A en el contexto de esta investigación. Atoll es esencial para analizar el desempeño de una red móvil previo a su puesta en marcha, pues posibilita no solo el diseño de la red inicial sino también la simulación de parámetros como los de calidad de calidad de servicio, capacidad y cobertura.

Una de las tareas más importantes que se utilizan en este estudio es la predicción por cobertura, que se hace basándose en modelos de propagación calibrados con el medioambiente. Esta función posibilita la creación de mapas de SINR, RSRP y RSRQ, los cuales son parámetros fundamentales para determinar la calidad de la señal y que tan buena es para el usuario. Se pudo ver en varias tesis que se examinaron en Atoll permite comparar el estado de la red antes y después de los ajustes técnicos, lo que facilita identificar zonas con coberturas limitadas y proponer soluciones mediante cambios en el azimut y la inclinación o la altura de la antena.

Atoll puede incluir datos de usuarios y tendencias de demanda en el área analizada, gracias a la simulación de tráfico y capacidad, otra característica importante. Esta propiedad posibilita analizar el rendimiento de la red con diferentes cargas de tráfico y verificar la proporción entre la capacidad que se ofrece y la que se requiere, algo fundamental para garantizar un servicio de calidad en situaciones de alta densidad.

Asimismo, el programa ofrece herramientas de optimización automática (AFP/ACP) que facilitan la programación de celdas y frecuencias. En este estudio, esta funcionalidad permitió probar diferentes escenarios de configuración y evaluar su impacto en el rendimiento general de la red. De manera complementaria, se empleó el módulo de simulación de estrategias de *packet Scheduling (Round Robin, Proportional Fair, Maximum C/I y Proportional Demand)*, permitiendo así la comparación de la asignación de recursos y la eficiencia espectral en los enlaces ascendentes y descendentes. Atoll tiene la habilidad de modelar estas estrategias y anticipar el impacto que tiene en indicadores como *throughput* y la calidad de experiencia de usuario final.

Es importante mencionar que *Atoll* facilita la planificación en ambientes heterogéneos y multi-RAT, lo cual hace posible integrar situaciones de LTE-A con agregación de portadoras, MIMO avanzado y celdas pequeñas. Las capacidades del software en LTE-A posibilitan un análisis más exhaustivo en arquitectura de última generación.

Entre las funcionalidades que se utilizan en redes LTE/LTE-A a través de Atoll incluyen:

- Pronóstico de calidad y cobertura (RSRP, RSRQ, SINR)
- Análisis de la capacidad de la red y simulación del tráfico
- Optimización automática de frecuencias y celdas (AFP/ACP)
- Análisis de tácticas para la propagación de paquetes.
- Soporte para LTE-A: agregación de portadoras, MIMO y redes disimiles

3.2. Metodología de simulación

3.2.1. Justificación de la metodología empleada

El método de simulación seleccionado para este análisis se basa en la necesidad de evaluar el efecto del *Carrier Aggregation* (CA) en un ambiente controlado, reproduciendo las condiciones reales de funcionamiento de las redes móviles LTE en Ecuador sin los elevados costos y la complejidad logísticas que supondría una implementación directa a través de la infraestructura de los operadores.

Los profesionales e investigadores tienen la posibilidad de modelar con exactitud las propiedades del medio radioeléctrico gracias al empleo de instrumentos de simulación como Atoll, muy conocidas en el sector de las telecomunicaciones para la optimización y planificación de redes móviles. La distribución territorial de las estaciones base, el tráfico de los usuarios, la propagación y la asignación de bandas de frecuencia son algunos de los parámetros que se tienen en cuenta en el modelo mencionado. A través de esta perspectiva, es posible analizar la eficiencia espectral que se logra por medio de la agregación de portadoras y hacer comparaciones entre situaciones con CA y sin CA, asegurando resultados que sea reproducibles y técnicamente coherente.

3.3. Modelos de propagación y parámetros técnicos de red

3.3.1. Modelos de propagación aplicados en entorno urbano

Un modelo de propagación es el grupo de ecuaciones matemáticas que posibilitan la estimación de cómo se comportan las ondas de radio según varios parámetros del diseño de red. En telecomunicaciones, estos modelos son esenciales porque ayudan a examinar la forma en que se propaga la señal al transmitir datos.

Este estudio escoge el modelo COST-HATA entre los distintos modelos disponibles, porque sus rasgos se adecuan apropiadamente a la banda de frecuencia contemplada. Este modelo se utiliza para antenas que tienen alturas de entre 4 y 50 metros y en rangos de frecuencia entre 800 MHz y 2GHz.

$$L = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(hb) - ahm + (44,9 - 6,55 \log(hb)) \log(d) + cm$$

En la tabla 9 se explica a detalle los símbolos usados

Tabla 9 Definición de variables y constante en la ecuación.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
L	Perdidas por trayectoria
F	Frecuencia
Hb	Altura de antena
D	Distancia entre transmisor y receptor
Cm	Su valor es 0 y 3 en centros metropolitanos
Ahm	Representa su valor de corrección de la altura de la antena móvil

Fórmulas para ciudades pequeñas y medianas

$$ahm = (1,1 \log(1710) - 0,7)1,5 - (1,6 \log(1710) - 0,8)$$

$$ahm = 8,29(\log(1,54hre)^2 - 1,1db) \quad f < 300 \text{ MHz}$$

$$ahm = 3,2(\log(11,75hre)^2 - 4,97 \text{ db}) \quad f > 300 \text{ MHz}$$

3.4 Parámetros de red LTE considerados (frecuencias, potencias, ancho de banda)

FRECUENCIA

En el ámbito de las telecomunicaciones móviles, la frecuencia sirve para enviar datos de un lugar a otro por el aire entre teléfonos móviles y estaciones base.[22]

POTENCIAS

La potencia es un parámetro técnico que se vincula directamente con la infraestructura emisora de las señales radioeléctricas, dado que esta influenciada por las condiciones ambientales a través de las cuales la señal se desplaza y las propiedades de propagación. Los equipos transmisores que funcionan en frecuencias bajas, por lo general necesitan niveles de potencia más altos, mientras que los que transmiten en frecuencias altas requieren niveles de potencia más bajo debido a sus características de propagación.[27]

ANCHO DE BANDA

El ancho de banda de las redes móviles es la capacidad de transmisión de una conexión en red, que establece el límite superior de datos que pueden ser transmitido por un canal de comunicación en un periodo de tiempo específico. Este se suele expresar en bits por segundo (bps). La calidad de conexión a internet móvil, así como su velocidad, dependen directamente del ancho de banda.[22]

3.4.1. Configuración de bandas LTE en Atoll según asignación en Ecuador

En Ecuador, existen varias compañías que se encuentran enfocadas en proporcionar servicios de telecomunicaciones. La Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT) es una de las empresas que ha liderado este sector, y

ha tenido un rol fundamental en el progreso del sector, y ha tenido un rol fundamental en el progreso del sector a escala nacional. Esta compañía emplea, entre otras frecuencias, las de 700 MHz APT y las de 1700/2100 MHz AWS.

Se opto por la banda 4 para la ejecución del presente proyecto, ya que posee beneficios técnicos y porque en la actualidad CNT y CONECEL S.A. la utilizan. En la tabla 8 se detalla los operadores móviles de Ecuador con su respectiva banda de operación.

Tabla 10 bandas de frecuencias utilizadas por los operadores móviles de Ecuador.

Elaborado por el autor

Banda	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Duplex	Banda en Frecuencia (MHz)	Operador
2	1850-1910	1930-1990	FDD	1900	CNT, CONECEL, OTECEL
4	1710-1755	2110-2155	FDD	1700	CNT, CONECEL
5	824-849	869-894	FDD	850	CONECEL.OTECCEL
7	2500-2570	2620-2690	FDD	2600	Sin asignar

3.5. Indicadores de desempeño a evaluar

RSRP (cobertura)

La evaluación de la cobertura en LTE es crucial para que los dispositivos de usuarios seleccionen las celdas y realicen el proceso de programación. El RSRP (Potencia de señal de referencia recibida) es una variable que evalúa la señal que el eNodeB le brinda al equipo del usuario (UE) en el enlace descendente, con una resolución de 1dB los valores de potencia de RSRP varían de -40 dBm a -140 dBm.

Identificar la celda optima de la interfaz de radio es el propósito principal de RSRP y elegirla como la celda encargada para acceder o llevar a cabo un traspaso inter-LTE. Sin embargo, la sensibilidad de recepción del usuario puede diferir según

el modelo del dispositivo, por esta razón, los usuarios pueden experimentar calidades de servicio dentro de LTE. [28]

El UE tiene la responsabilidad de transmitir al *eNodeB* los valores de RSRP a través de mensaje de RRC, donde cada valor de RSRP se asocia con un rango del 0 al 97 antes de ser incluido en los mensajes RRC. Existen distintos niveles de potencia que permiten estimar la calidad de servicio del enlace de radio, los cuales se dividen en tres categorías. Si el RSRP es mayor a -75 dBm, el *eNodeB* ofrece una excelente calidad de servicio, y no hay muchos usuarios compitiendo por el ancho de banda disponible en la celda. El rango entre -75dBm y -95 dBm corresponden a un nivel intermedio, y se puede experimentar una ligera degradación en la calidad del servicio con una disminución del rendimiento de entre el 30% y el 50%. [28]

A medida que el valor de RSRP se reduce, la calidad del servicio también se ve afectada y el *throughput* disminuye, gracias a la modulación adaptativa que proporciona LTE. Por lo tanto, valores de RSRP entre -100 y -108 dBm en espacios interiores como edificios o casas enfrentaran cortes o inestabilidad en el servicio de datos. [28]

Reported value	Measured quantity value	Unit
RSRP_00	$RSRP < -140$	dBm
RSRP_01	$-140 \leq RSRP < -139$	dBm
RSRP_02	$-139 \leq RSRP < -138$	dBm
...
RSRP_95	$-46 \leq RSRP \leq -45$	dBm
RSRP_96	$-45 \leq RSRP \leq -44$	dBm
RSRP_97	$-44 \leq RSRP$	dBm

Tabla 11 Valores de RSRP

SINR (calidad de señal)

El procedimiento para calcular el SINR en el UE no se incluye en las mediciones de potencia de la 3GPP, por lo que el valor puede variar según el fabricante del equipo de radio del UE. Generalmente, este indicador se define como la relación entre la señal deseada y la potencia del ruido e interferencia provenientes de otras celdas y fuentes externas. La potencia de la señal abarca toda la potencia recibida, incluyendo los elementos de recursos que no están dedicados al transporte de datos de usuario. La interferencia y el ruido representan los niveles promedio para los elementos de recursos destinados a la transmisión de datos.[28]

En la práctica, el UE puede registrar distintos valores de SINR en un entorno con poca movilidad; para varios dispositivos telefónicos, este valor puede llegar a estar entre -5dB y -23dB. No obstante, si el UE está en movimiento, esta cifra disminuye. El SINR contribuye a la estimación de CQI en el *eNodeB*. La potencia que se mide corresponde a todos los componentes del recurso. [28]

Throughput promedio por usuario

Indica la tasa promedio de transmisión efectiva que un usuario experimenta en la red LTE. Este parámetro muestra la capacidad real que percibe el usuario final, teniendo en cuenta condiciones del canal, la interferencia, la carga de la celda y los mecanismos de asignación de recursos.

En Atoll, el rendimiento se determina en función del tráfico de usuarios, la capacidad de ancho de banda, el esquema de modulación y codificación (MCS) y la cantidad de portadoras que están en uso. El rendimiento por usuario se reduce a medida que crece el número de usuarios concurrentes debido a la distribución de los recursos de radio

Capacidad de la celda con múltiples usuarios

Indica el total de información que se envía al mismo tiempo en una celda LTE. Este factor se ve afectado por la cantidad de usuarios activos, el ancho de banda disponible, el MCS y las condiciones del canal.

Al implementar la agregación de portadoras, se aumenta el ancho de banda útil al fusionar múltiples portadoras, lo que mejora la capacidad de la celda y disminuye la saturación en zonas de alta demanda

Impacto en la eficiencia espectral

La eficiencia espectral posibilita la evolución de cuán eficientemente se está utilizando espectro de frecuencia. A mayor eficiencia espectral, es posible transmitir más datos en un ancho de banda de frecuencia determinado. La eficiencia espectral es un elemento importante en las redes móviles 5G porque define la manera en que se emplean las bandas de frecuencia disponibles con el objetivo de optimizar la capacidad y el desempeño de las redes, [22]

CAPÍTULO IV

4.1 Dimensionamiento de la red

En este capítulo se lleva a cabo un reconocimiento del área en el que se busca realizar el estudio; para ello se implementará una red LTE sin Carrier Aggregation (CA) y una red LTE-A con (CA). El primer apartado presentara información contextual básica pero necesaria del sector, como parte del análisis del entorno en la provincia de Santa Elena. En la segunda parte, se realizará una simulación de la red LTE que está actualmente en funcionamiento en la provincia, con el objetivo de examinar su cobertura, rendimiento y otras características técnicas que facilitan la comprensión del estado actual de la red y que servirá como base para la posterior evaluación del CA.

4.2. Reconocimiento y Característica

La provincia de Santa Elena está situada en el occidente del país, en la zona geográfica conocida como región litoral o costa, esta conforma sus límites geográficos al norte con la provincia de Manabí, al este y sur con la provincia del Guayas y al oeste con el Océano Pacífico.

Tabla 12 Características de la provincia de Santa Elena.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Provincia	Santa Elena
Cantón	Santa Elena
Fecha de creación de la provincia	7 de noviembre del 2007
Fecha de creación del cantón	22 de enero de 1837
Zona de planificación	N.º 5
Rango climático	Máximo 25-32°C, y Mínimo 16-24°C

4.3 Bandas de Frecuencia

En la herramienta *Atoll*, es factible elegir una extensa variedad de bandas de frecuencias, que van desde la banda 1 hasta la banda 43. Estas bandas posibilitan el ajuste de sistemas en modo TDD o dúplex FDD, lo que ofrece versatilidad al diseñar redes de telecomunicaciones. En este estudio, se ha decidido utilizar la banda de E-UTRAN 4, que tiene un ancho de banda de 20 MHz porque su ancho de banda garantiza una ejecución apropiada en cuanto a capacidad y una gestión eficaz del espectro radioeléctrico, lo que lo convierte en una alternativa conveniente para los fines de simulación y análisis establecidos.

Tabla 13 Datos de la banda de frecuencia.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Nombre	E-UTRA Band 4-20 MHz
Duplexing Method	FDD
TDD: Start Frequency, FDD: DL Start frequency (MHz)	2110

FDD: UL Start Frequency (MHz)	1710
Channel Width (MHz)	20
Number of Frequency Blocks	100
Sampling Frequency (MHz)	30.72
First channel	2050
Last channel	2250
Step	200
Adjacent Channel Suppression Factor (dB)	25.23

Para la configuración de los transmisores que se encuentran en cada uno de los lugares donde están las estaciones base, se precisó realizar una calibración independiente de los parámetros de cada sitio, asegurando de esta manera que la simulación represente correctamente las condiciones reales de funcionamiento. La banda E-UTRAN 4 Bajo modalidad dúplex FDD ha sido elegida para este estudio porque las antenas que han sido oficialmente instalada en la región funcionan con esta tecnología, como lo muestra la infraestructura que el operador ha reportado.

General Transmitter Cells Propagation Display	
	1
Name	STE_LIB_AUTODROMO_L_1(0)
ID	
Active	<input checked="" type="checkbox"/>
Order	1
Layer	Macro Layer
Cell Type	LTE
Frequency Band	E-UTRA Band 4 - 20MHz
Channel Number	2.050
Channel Allocation Status	Allocated
Physical Cell ID Domain	

Figura 5 configuración de la banda E-Utra.

Elaborado por el autor

4.4 Selección del modelo de propagación

Es importante señalar que, según lo expuesto en el capítulo anterior en la parte de modelos de propagación, estos son expresiones matemáticas utilizadas para representar cómo se comporta las ondas de radio en el entorno analizado. La elección adecuada es esencial, ya que posibilita una estimación exacta de la cobertura, las pérdidas de trayectoria y las condiciones reales de operación de la red. En *Atoll*, la selección del modelo de propagación se basa en su habilidad para adaptarse a los rangos topográficos, urbanos y geográficos de la provincia y de la zona concreta que se estudia. En la tabla 12 se describen los modelos de propagación que están disponibles en la herramienta, y se escogerá el que mejor se ajuste a las condiciones reales.

Tabla 14 Tipos de modelos de propagación en Atoll.

Elaborado por el autor

Modelos de propagación
Cost-Hata
Erceg-Greenstein (SUI)
ITU1546
ITU370
ITU526
ITU529
Longley-Rice
Microwave E-Band Propagation Model
Microwave ITU-R P.452 Model
Microwave Point-to-Area Model
Microwave Propagation Model
Okumura-Hata
Sakagami Extended
Standard Propagation Model
WLL

Se eligió el modelo de propagación *Cost-Hata* para esta simulación porque se adapta correctamente a las propiedades reales del entorno en el que la red LTE está siendo evaluada. Este modelo es uno de los más utilizados en entornos suburbanos y urbanos, que son las áreas donde opera CNT. Asimismo, brinda un rendimiento óptimo en las bandas de frecuencias que LTE emplea en Ecuador. Este modelo se considera útil para lograr evaluaciones más exactas de la disminución de la señal, ya que tiene en cuenta elementos como altura de las antenas, la distancia y el entorno. Por esta razón, se emplea para asegurar resultados coherentes en la evaluación de la cobertura, la calidad de la señal y el rendimiento total de la red, tanto en situaciones sin *Carrier Aggregation* como en aquellas que incluye dicha agregación.

Tabla 15 parámetros de restricción del modelo Cost-Hata.

Elaborado por el autor

Datos	Descripción
Frecuencia	800-2000 MHz
Altura de receptor	1-3 m
Altura de transmisor	4-50 m
Altura relativa del transmisor recto a los edificios	> 0 m
Distancia entre transmisor y receptor	0.02-50 km

En Atoll, el modelo de propagación se establece directamente a partir de las propiedades de la tecnología LTE; en la sección “Modelo de propagación” se escoge el modelo que se quiere. Desde este apartado se puede activarlo, modificar sus parámetros y establecer las condiciones del entorno, para que todas las simulaciones de cobertura emplean automáticamente esa configuración y los cálculos hechos en el área de estudio sean coherentes y realista

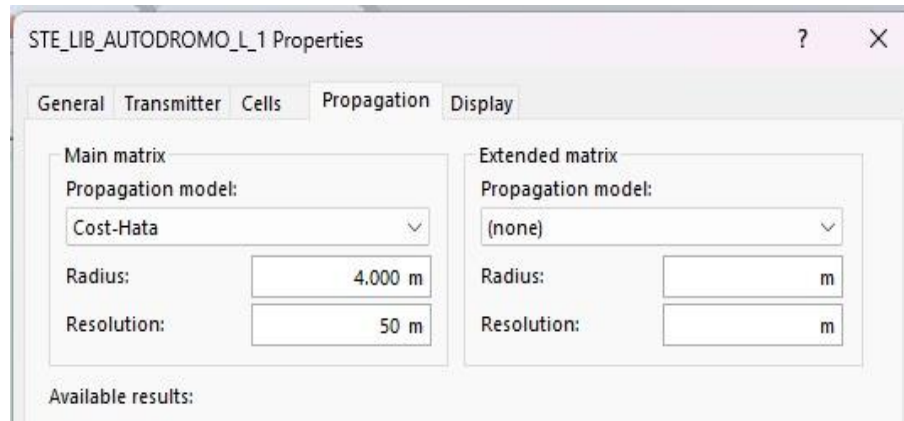


Figura 6 configuración en Atoll del modelo de propagación.

Elaborado por el autor

4.5 Configuración de los parámetros globales del sistema LTE

Una vez que se ha ajustado los parámetros de cada estación y se ha determinado los modelos de propagación respectivos, se avanza a definir los parámetros generales del sistema en la herramienta *Atoll*. La tabla 14 muestra la configuración de estos parámetros tanto globales, avanzados y de cálculos.

Tabla 16 Parámetros globales LTE.

Elaborado por el autor

Radio network settings properties		
Global Parameters	Default cyclic prefix	0- Normal
	Default PDCCH overhead	1
	Default PUCCH overhead	4 RB
	Default special subframe	0
Advanced Parameters	RS EPRE	0
	Criterion	RSRP
	Method	Standard
	SU-MIMO criterion	RS C/N
	MU-MIMO Criterion	RS C/N
	AAS criterion	RS C/N
Margin	1dB	

Calculation Parameters	Min interferer C/N Threshold	-20 dB
	Height /ground	1,5 m

En *Radio Network settings Properties* configuramos los parámetros globales donde el *Default PDCCH overhead* lo dejamos en 1 y el *Default PUCCH overhead* 4 RB. En la figura 7 se muestra la configuración de los parámetros globales

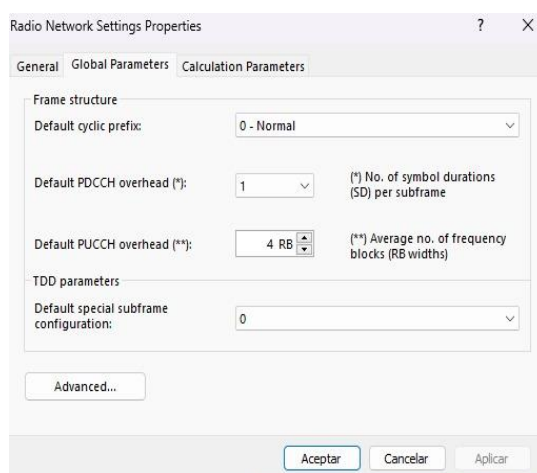


Figura 7 configuración de los parámetros globales.

Elaborado por el autor

En la figura 8 se muestran la configuración de los parámetros avanzados como *criterion, method, diversity mode*.

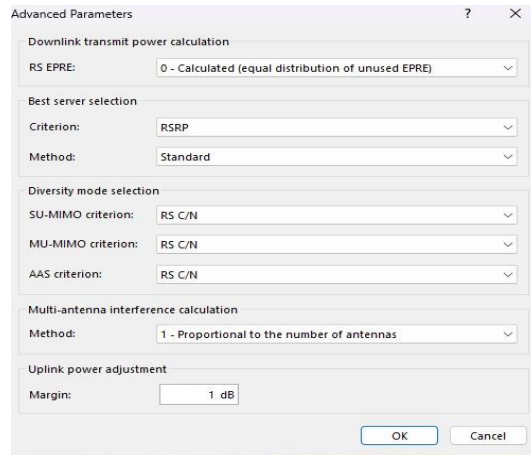


Figura 8 Configuración de los parámetros avanzados.

Elaborado por el autor

En *Calculation Parameters* configuramos los siguientes parámetros como: *Min Interferer C/N Threshold* con un valor de -20 dB el *Height/ground* que tiene un valor de 1.5 m. La configuración se muestra en la figura 9.

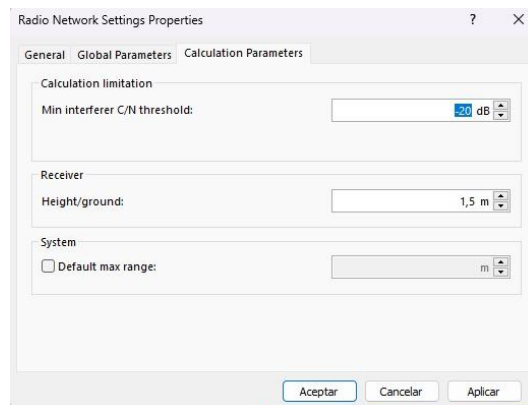


Figura 9 configuración del Radio Network setting.

Elaborado por el autor

4.6 Configuración de la plantilla LTE

Dentro de la configuración de la plantilla LTE en *Atoll* es posible especificar los parámetros esenciales que la red empleará en la simulación,

como el ancho de banda, la potencia de transmisión, el tipo de duplexación y la banda de frecuencia.

Tabla 17 Configuración de los parámetros la plantilla LTE.

Elaborado por el autor

	Parámetro	Valor
General	Sector	3
	Hexagon radius	500 m
	1st sector mechanical azimuth	0°
	Mechanical downtilt	0°
	transmission	2
	Reception	2
	Main propagation model	Cost-Hata
	Main radius	7000 m
	Main resolution	100 m
	Transmitter	TMA
Feeder		1/2" at 2100 MHz
Trasmitter		Default
Feeder length/ transmission		5 m
Feeder length/ Reception		5 m
Miscellaneous losses/ transmission		0 dB
Miscellaneous losses/ Reception		0 dB
Max power		46 dBm
Frecuency band	E-UTRA Band 4-20 Mhz	
LTE equipment	Default Cell Equipment	

LTE	Cell type	LTE
	Min RSRP	-140 dBm
	DL traffic load	100 %
	UL traffic load	100 %
	Max DL traffic load	100 %
	Max UL traffic load	100 %
	UL noise rise	0 dB
	DL noise rise	0 dB
Neighbours	Intra-technology	16
	Inter-technology	16

4.7 Parámetros de cobertura LTE en la zona geográfica del cantón LA Libertad provincia de Santa Elena

Se recopiló datos sobre la cobertura LTE proporcionada por la empresa CNT del cantón la Libertad, esta información incluyen los parámetros de 15 radio bases que funcionan con tecnología 4G, los cuales fueron utilizadas para obtener la información de localización.

Tabla 18 Parámetros de las 15 radio bases.

Elaborado por el autor

Nombre de sitio	Latitud	Longitud	Height	Azumit
STE_LIB_AUTODROMO_L	-2,2382	-80,8877	30.4	50
STE_LIB_CALDERON_L	-2,23372	-80,9143	24	50
STE_LIB_KENNEDY_L	-2,222659	-80,912804	30	50
STE_LIB_LA_LIBERTAD_L	-2,220233	-80,87769	30	355
STE_LIB_NORESTE_L	-2,226043	-80,905841	23.7	40
STE_LIB_NORTE_L	-2,22599	-80,91942	30	320
STE_LIB_PETROLEROS_L	-2,21928	-80,894648	30	355
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L	-2,247197	-80,918902	35.5	50
STE_LIB_SUBURBIO_L	-2,24074	-80,8993	30	355
STE_LIB_SUR_L	-2,23288	-80,90617	30	280

STE_LIB_SURESTE_L	-2,23092	-80,88897	27.5	355
STE_LIB_SUROESTE_L	-2,24178	-80,91224	24	340
STE_LIB_UPSE_L	-2,22908	-80,87769	30	70
STE_LIB_VALDIVIA_L	-2,232729	-80,901092	30	355
STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L	-2,24094	-80,92094	36	70

4.8 Configuración de las radios base

De acuerdo con los parámetros obtenidos por la empresa CNT, se configuran las 15 radio bases, a cada radio base le corresponde 3 sectores de transmisión.

Site	Transmitter	Active	Transmitter Type	Antenna
STE_LIB_AUTODROMO_L	STE_LIB_AUTODROMO_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_AUTODROMO_L	STE_LIB_AUTODROMO_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_AUTODROMO_L	STE_LIB_AUTODROMO_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_CALDERON_L	STE_LIB_CALDERON_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_CALDERON_L	STE_LIB_CALDERON_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_CALDERON_L	STE_LIB_CALDERON_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_KENNEDY_L	STE_LIB_KENNEDY_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_KENNEDY_L	STE_LIB_KENNEDY_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_KENNEDY_L	STE_LIB_KENNEDY_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_LA_LIBERTAD_L	STE_LIB_LA_LIBERTAD_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_LA_LIBERTAD_L	STE_LIB_LA_LIBERTAD_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_LA_LIBERTAD_L	STE_LIB_LA_LIBERTAD_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_NORESTE_L	STE_LIB_NORESTE_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_NORESTE_L	STE_LIB_NORESTE_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_NORESTE_L	STE_LIB_NORESTE_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_NORTE_L	STE_LIB_NORTE_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_NORTE_L	STE_LIB_NORTE_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_NORTE_L	STE_LIB_NORTE_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_PETROLEROS_L	STE_LIB_PETROLEROS_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_PETROLEROS_L	STE_LIB_PETROLEROS_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_PETROLEROS_L	STE_LIB_PETROLEROS_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L	STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L	STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L	STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUBURBIO_L	STE_LIB_SUBURBIO_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUBURBIO_L	STE_LIB_SUBURBIO_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUBURBIO_L	STE_LIB_SUBURBIO_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUR_L	STE_LIB_SUR_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUR_L	STE_LIB_SUR_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUR_L	STE_LIB_SUR_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SURESTE_L	STE_LIB_SURESTE_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SURESTE_L	STE_LIB_SURESTE_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SURESTE_L	STE_LIB_SURESTE_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUROESTE_L	STE_LIB_SUROESTE_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUROESTE_L	STE_LIB_SUROESTE_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_SUROESTE_L	STE_LIB_SUROESTE_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_UPSE_L	STE_LIB_UPSE_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_UPSE_L	STE_LIB_UPSE_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_UPSE_L	STE_LIB_UPSE_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_VALDIVIA_L	STE_LIB_VALDIVIA_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_VALDIVIA_L	STE_LIB_VALDIVIA_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_VALDIVIA_L	STE_LIB_VALDIVIA_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L	STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L_1	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L	STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L_2	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz
STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L	STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L_3	✓	Intra-net	65deg 18dbi 4Tilt 2100MHz

Figura 10 configuración de los sectores de transmisión.

Elaborado por el autor

En la figura se muestra la red LTE_CNT, conformada por las 15 radio bases configurada con sus parámetros Antena, tilt, azumit.

El azumit o ángulo, hacia el que se dirigen los tres sectores de transmisión de cada estación base, es una de las primeras características examinadas; no obstante, el

diseño final puede cambiar dependiendo de los requerimientos y criterios individuales. Esta orientación establece la dirección principal de irradiación y facilita la optimización de cobertura y la capacidad en el área de estudio.

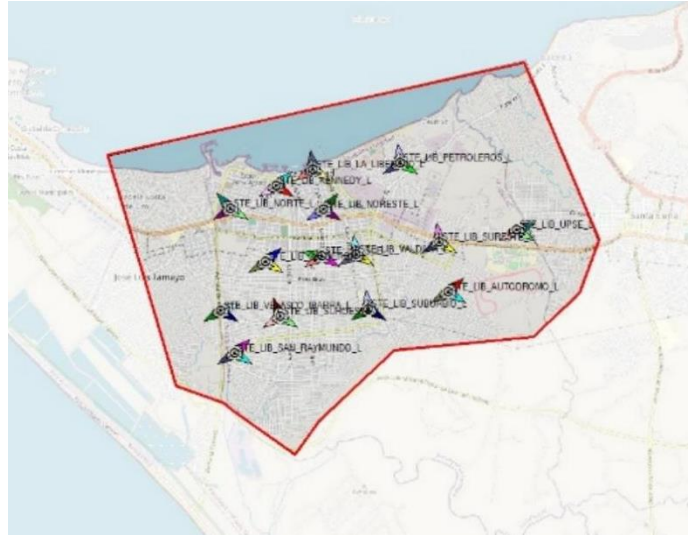


Figura 11 Red LTE con sus 15 radio bases

Elaborado por el autor

Una vez terminada la red LTE con todos sus parámetros, procedemos a configurar la zona del tráfico donde se realizará la predicción de cobertura. Teniendo en cuenta que La Libertad es una de las regiones con mayor densidad de población, se escoge el perfil de Densidad Urbana, lo que posibilita modelar con mayor exactitud la propagación de la señal y el comportamiento del tráfico en áreas urbanas. En la figura 12 se muestra la zona de estudio con las características urbanas que se ha establecido, lo que representa esta configuración.

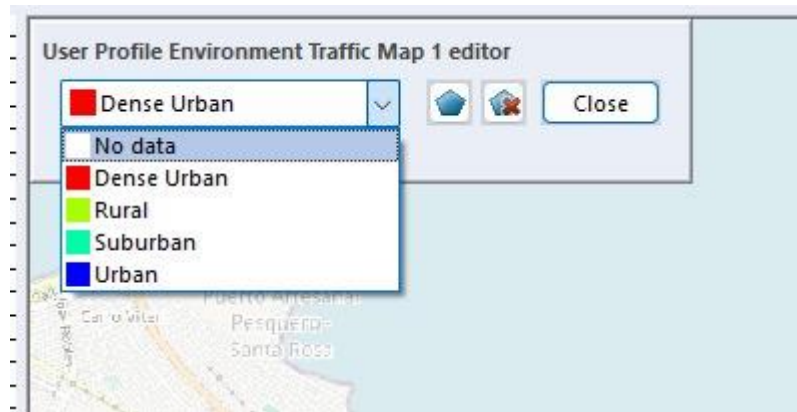


Figura 12 configuración del tráfico de mapa.

Elaborado por el autor

4.9 Mapas de cobertura y tráfico

Se procede a evaluar los datos de *Downlink* y *Uplink* para las 15 radio bases con los datos ingresados de la investigación realizada y los datos que tiene por defecto Atoll.

Con el fin de calcular los valores de velocidad se realizaron 15 grupos de simulaciones para cada radio base. En cada ejecución Atoll asignó automáticamente un número aleatorio de usuarios conectados a la red.

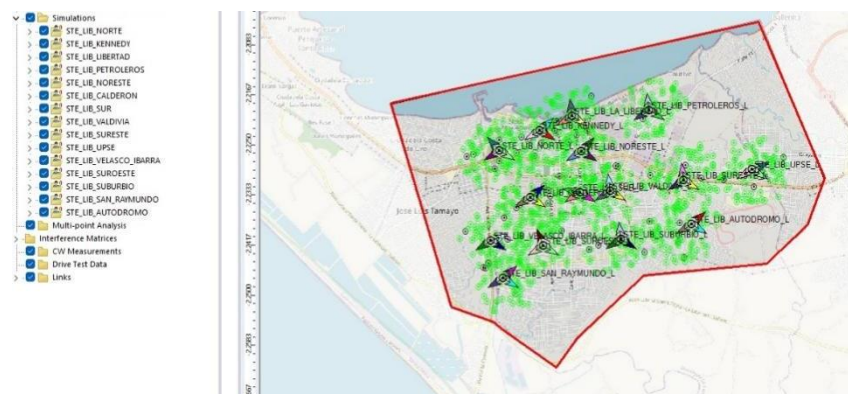


Figura 13 Simulación a las 15 radio bases.

Elaborado por el autor

4.10 Red LTE de la provincia de Santa Elena

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos por el software Atoll de la velocidad de *Downlink* y *Uplink* de las 15 radio bases.

Los valores que se toman como referencia son tantos para el DL y UL:

- *Peak RLC comulated Throughput*
- *Effective RLC comulated Throughput*
- *Comulated Application Throughput*

Radio Base	DL			UL		
	Peak RLC Cumulated Throughput	Effective RLC Cumulated Throughput	Cumulated Application Throughput	Peak RL Cumulated Throughput	Effective RLC Cumulated Throughput	Cumulated Application Throughput
STE_LIB_NORTE	41.67 Mbps	41.22 Mbps	39.16 Mbps	9.85 Mbps	9.75 Mbps	9.27 Mbps
STE_LIB_KENNEDY	44.85 Mbps	44.22 Mbps	42.01 Mbps	12.46 Mbps	12.35 Mbps	11.73 Mbps
STE_LIB_LIBERTAD	50.05 Mbps	49.47 Mbps	47 Mbps	12.69 Mbps	12.59 Mbps	11.96 Mbps
STE_LIB_PETROLEROS	43.33 Mbps	42.66 Mbps	40.53 Mbps	11.9 Mbps	11.78 Mbps	11.19 Mbps
STE_LIB_NORESTE	42.1 Mbps	41.77 Mbps	36.68 Mbps	9.6 Mbps	9.52 Mbps	9.05 Mbps
STE_LIB_CALDERON	50.39 Mbps	49.87 Mbps	47.37 Mbps	11.35 Mbps	11.26 Mbps	10.7 Mbps
STE_LIB_SUR	46.2 Mbps	45.28 Mbps	43.01Mbps	9.2 Mbps	9.14 Mbps	8.68 Mbps
STE_LIB_VALDIVIA	43.3 Mbps	42.84 Mbps	40.7 Mbps	9.73 Mbps	9.65 Mbps	9.17 Mbps
STE_LIB_SURESTE	44.4 Mbps	43.76 Mbps	41.57 Mbps	10.65 Mbps	10.57 Mbps	10.04 Mbps
STE_LIB_UPSE	31.87 Mbps	31.41 Mbps	29.84 Mbps	11.22 Mbps	11.14 Mbps	10.58 Mbps
STE_LIB_VELASCO_IBARRA	46.11 Mbps	45.57 Mbps	43.3 Mbps	12.35 Mbps	12.25 Mbps	11.64 Mbps
STE_LIB_SUROESTE	37.35 Mbps	36.82 Mbps	34.98 Mbps	7.78 Mbps	7.72 Mbps	7.33 Mbps
STE_LIB_SUBURBIO	44.04 Mbps	43.46 Mbps	41.28 Mbps	10.58 Mbps	10.49 Mbps	9.97 Mbps
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO	48.46 Mbps	47.87 Mbps	45.47 Mbps	11.04 Mbps	10.97 Mbps	10.42 Mbps
STE_LIB_AUTODROMO	49.45 Mbps	48.87 Mbps	46.42 Mbps	11,89 Mbps	11.8 Mbps	11.21 Mbps

Tabla 19 Resultados de las velocidades DL y UL

Elaborado por el autor

CAPITULO V

En este capítulo se realizará el proceso de optimización de una red LTE, convirtiéndola en una red LTE-A mediante la utilización de técnicas de *Carrier Aggregation*. Esta técnica facilita un uso más efectivo del espectro radioeléctrico al unir varias portadoras, lo que eleva la capacidad, optimiza la velocidad de transmisión y refuerza el rendimiento general de la red.

5. Optimización de la red

En este apartado se detalla el procedimiento de optimización de la red enfocado en el *Carrier Aggregation* simulada en Atoll. Para ello se modifican los ajustes de las portadoras, se comprueba su compatibilidad y se establece la configuración necesaria para que los sectores puedan funcionar con varias bandas al mismo tiempo.

5.1 Configuración la plantilla LTE

Los parámetros siguen siendo los mismo lo único que se modificara es el tipo de celda como vamos a realizar la técnica de CA seleccionaremos el tipo de celda *LTE-A PCell*

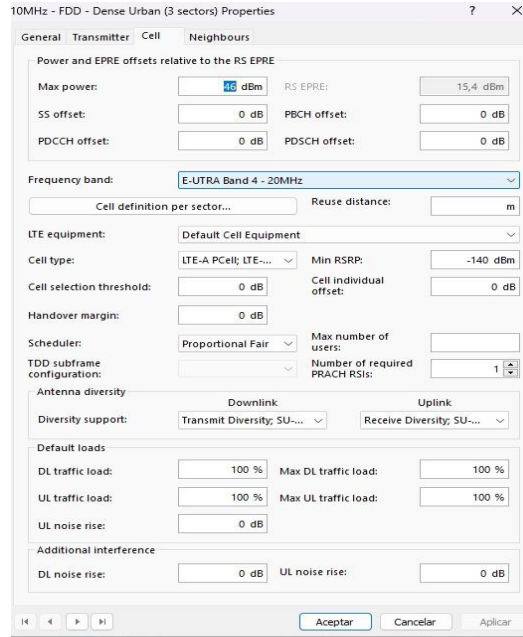


Figura 14 configuración de la plantilla LTE-A

Elaborado por el autor

5.2 Configuración de transmisores

Procedemos a configurar de manera individual cada transmisor el tipo de celda cambiamos a LTE-A PCell así como se muestra en la figura 15.

STE_LIB_AUTODROMO_L_1 Properties	
General Transmitter Cells Propagation Display	
	1
Name	STE_LIB_AUTODROMO_L_1(0)
ID	
Active	<input checked="" type="checkbox"/>
Order	1
Layer	Macro Layer
Cell Type	LTE-A PCell
Frequency Band	E-UTRA Band 4 - 10MHz
Channel Number	2.100
Channel Allocation Status	Allocated
Physical Cell ID Domain	

Figura 15 Configuración de tipo de celda en el transmisor

Elaborado por el autor

5.3 Implementación de Carrier Aggregation

Para realizar la implantación CA en Atoll, procedemos a configurar de manera individual cada transmisor. En este apartado se definirán dos celdas con la misma frecuencia intra-banda pero con el mismo anchos de banda. Se define la primera celda como la portadora principal (*LTE-A PCell*) y la segunda celda como portadora secundaria para CA (*LTE-A SCell DL*).

General Transmitter Cells Propagation Display		
	1	2
Name	STE_LIB_AUTODROMO_L_1(0)	STE_LIB_AUTODROMO_L_1(1)
ID		
Active	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Order	1	2
Layer	Macro Layer	Macro Layer
Cell Type	LTE-A PCell	LTE-A SCell DL;LTE-A SCell UL
Frequency Band	E-UTRA Band 4 - 20MHz	E-UTRA Band 4 - 20MHz
Channel Number	2.050	2.250
Channel Allocation Status	Allocated	Allocated
Physical Cell ID Domain		

Figura 16 Configuración de la segunda portadora Elaborado por el autor

Radio Base	DL			UL		
	Peak RLC Cumulated Throughput	Effective RLC Cumulated Throughput	Cumulated Application Throughput	Peak RLC Cumulated Throughput	Effective RLC Cumulated Throughput	Cumulated Application Throughput
STE_LIB_NORTE	110.69 Mbps	108.09 Mbps	102.98Mbps	17.85 Mbps	17.31 Mbps	16.45 Mbps
STE_LIB_KENNEDY	120.75 Mbps	118.46Mbps	112.54Mbps	15.85Mbps	15.19Mbps	14.43Mbps
STE_LIB_LIBERTAD	149.61 Mbps	147.28 Mbps	139.92Mbps	22.28 Mbps	21.47 Mbps	20.39 Mbps
STE_LIB_PETROLEROS	73.41 Mbps	72.19 Mbps	68.58 Mbps	11.39 Mbps	10.95 Mbps	10.4 Mbps
STE_LIB_NORESTE	124.56 Mbps	122.71 Mbps	116.58Mbps	17.02 Mbps	16.43 Mbps	15.61 Mbps
STE_LIB_CALDERON	120.47 Mbps	118.91 Mbps	112.96Mbps	17.12 Mbps	16.44 Mbps	15.62 Mbps
STE_LIB_SUR	90.06 Mbps	88.62 Mbps	84.19 Mbps	12.5 Mbps	12.07 Mbps	11.47Mbps
STE_LIB_VALDIVIA	80.27 Mbps	78.86 Mbps	74.92 Mbps	10.84 Mbps	10.36 Mbps	9.84Mbps
STE_LIB_SURESTE	82.84 Mbps	81.26 Mbps	77.2 Mbps	13.79 Mbps	13.15 Mbps	12.49 Mbps
STE_LIB_UPSE	81.94 Mbps	80.58 Mbps	76.56 Mbps	14.5 Mbps	13.86 Mbps	13.17 Mbps
STE_LIB_VELASCO_IBARRA	91.36 Mbps	89.76 Mbps	85.27 Mbps	16.19 Mbps	15.49 Mbps	14.71 Mbps
STE_LIB_SUROESTE	93.35 Mbps	92.05 Mbps	87.44 Mbps	17.81 Mbps	17.22 Mbps	16.36 Mbps
STE_LIB_SUBURBIO	67.88 Mbps	66.97 Mbps	63.62Mbps	12.53 Mbps	11.92 Mbps	11.33Mbps
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO	108.41 Mbps	106.78 Mbps	101.44Mbps	14.21 Mbps	13.72 Mbps	13.03, Mbps
STE_LIB_AUTODROMO	140.07 Mbps	137.66Mbps	130.78Mbps	19.31 Mbps	18.44 Mbps	17.52 Mbps

Tabla 20 Resultados de las velocidades DL y UL aplicando el CA
Elaborado por el autor.

5.4 Comparativa de los resultados

Este apartado se compara los resultados tanto de velocidades DL Y UL para la red LTE y la red LTE-A con CA.

Tabla 21 Comparativa de las velocidades tanto para LTE y LTE-A

Nombre de la radio base	DL	UL	DL	UL
	RED LTE		RED LTE-A	
	Peak RLC comulated Throughput	Peak RLC comulated Throughput	Peak RLC comulated Throughput	Peak RLC comulated Throughput
STE_LIB_NORTE	41.67 Mbps	9.85Mbps	110.69 Mbps	17.85 Mbps
STE_LIB_KENNEDY	44.85 Mbps	12.46 Mbps	120.75 Mbps	15.85Mbps
STE_LIB_LIBERTAD	50.05 Mbps	12.69 Mbps	149.61 Mbps	22.28 Mbps
STE_LIB_PETROLEROS	43.33 Mbps	11.9 Mbps	73.41 Mbps	11.39 Mbps
STE_LIB_NORESTE	42.1 Mbps	9.6 Mbps	124.56 Mbps	122.71 Mbps
STE_LIB_CALDERON	50.39 Mbps	11.35 Mbps	120.47 Mbps	17.02 Mbps
STE_LIB_SUR	46.2 Mbps	9.2 Mbps	90.06 Mbps	12.5 Mbps
STE_LIB_VALDIVIA	43.3 Mbps	9.73 Mbps	80.27 Mbps	10.84 Mbps
STE_LIB_SURESTE	44.4 Mbps	10.65 Mbps	82.84 Mbps	13.79 Mbps
STE_LIB_UPSE	31.87 Mbps	11.22 Mbps	81.94 Mbps	14.5 Mbps
STE_LIB_VELASCO_IBARRA	46.11Mbps	12.35 Mbps	91.36 Mbps	16.19 Mbps
STE_LIB_SUROESTE	37.35 Mbps	7.78 Mbps	93.35 Mbps	17.81 Mbps
STE_LIB_SUBURBIO	44.04 Mbps	10.58 Mbps	28,53 Mbps	12.53 Mbps
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO	48.46 Mbps	11.04 Mbps	108.41 Mbps	14.21 Mbps
STE_LIB_AUTODROMO	49.45 Mbps	11,89 Mbps	140.07 Mbps	19.31 Mbps

5.5 Resultados de simulación

En este apartado de este capítulo se analizarán los resultados tanto de la red LTE como la red LTE-A por medio de las predicciones que nos proporciona el software Atoll como de señal efectiva y cobertura por rendimiento.

5.6 Predicción de *coverage by signal level*

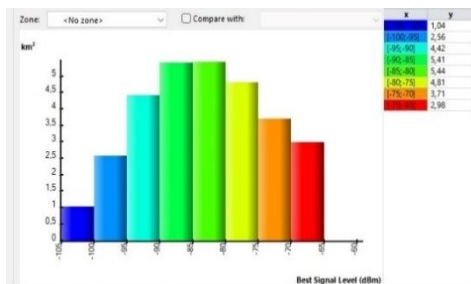


Figura 18 Coverage by signal level



Figura 17 Coverage by signal level optimizada

Al comparar los escenarios simulados para LTE y LTE-A muestran avances notables en la cobertura efectiva y en la calidad de la señal. Los resultados evidencian una reducción notable en las áreas con nivel de señal deficiente y un aumento en las zonas con niveles óptimos, lo cual corrobora que el *Carrier Aggregation* tiene un efecto positivo en el rendimiento general de la red.

En el escenario LTE de la figura 17, se observa un nivel de señal de -73,89 dBm con mayor cantidad de superficie que muestra niveles entre -95 dBm y -85dBm, además de una parte significativa del área por debajo de -95 dBm, lo cual indica condiciones de cobertura limitada o deficiente.

En cambio, en el escenario de LTE-A de la figura 18, el nivel promedio de la señal mejora a -70,94 dBm, lo que indica una mejora en la calidad total del enlace de radio. También se nota una redistribución beneficiosa de la cobertura, resaltando una disminución de las áreas con señal entre -105 dBm y -95 dBm y un aumento significativo de las zonas con niveles entre -75 dBm y -65 dBm, que se consideran como condiciones de señal buena o excelente.

distribución más uniforme y concentrada, con una de 17,87 dB y una desviación estándar de 7,88. Además, en una zona moderada de alrededor de 2.5 km^2 se logran niveles óptimos de servicio, que sobrepasan los 30 dB.

5.7.1.2 Señal efectiva UL

se refiere a la calidad con la que la estación base recibe la señal enviada por el usuario en enlace ascendente (*Uplink*)

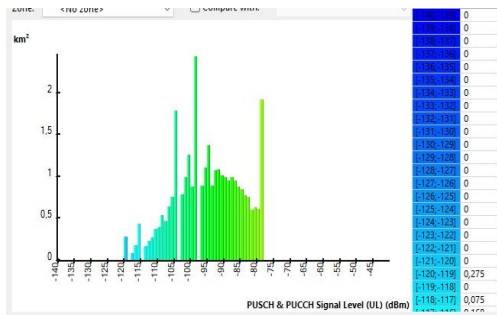


Figura 22 Histograma Effective Signal Analysis PUSCH & PUCCH Signal Level (UL)

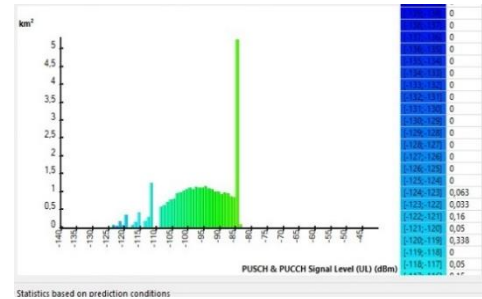


Figura 23 Histograma Effective Signal Analysis PUSCH & PUCCH Signal Level (UL)

En ambas figura muestran un histograma del analisis de señal efectiva UL, de la señal PUSCH & PUCCH. En la figura 20 muestra una distribucion de señal más extensa y variada, se puede visualizar que los valores mayores a -95 dBm tienen una potencia aceptable, lo que refleja la variabilidad natural de la calidad en el área de cobertura, estas zonas tienen en las barras de color verde.

En cambio en la red LTE-A con CA de la figura 21 presenta una distribución mucho más ajustada y un evidente efecto de saturación (*clamping*) en el límite superior, donde alrededor de 5.0 km^2 del territorio llega al valor máximo de -85 dBm. También se puede apreciar que las zonas de menor nivel que son las barras de color celeste redujeron, estas zonas van desde -125 y -110 Este comportamiento señala que la implementación de LTE-A y las mejoras realizadas, permitieron que una proporción considerable del área de

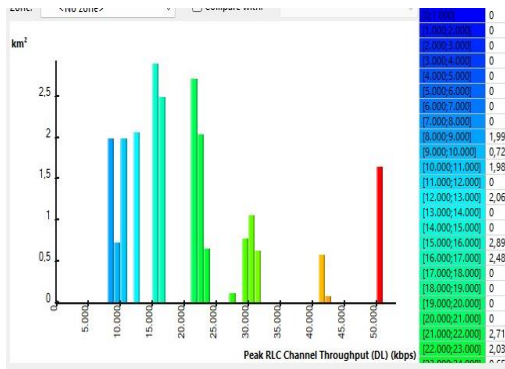


Figura 27 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL)

En la figura 23 y 24 se

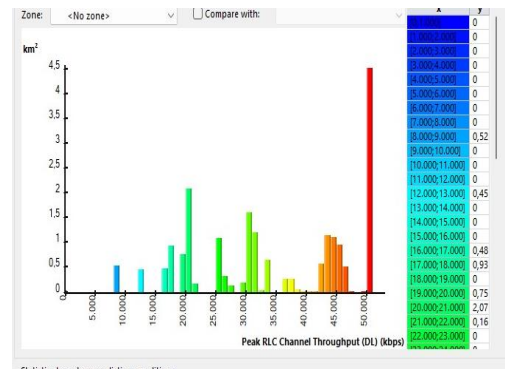


Figura 26 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL) Optimizada

muestran los resultados obtenidos sobre *Coverage by throughput* (DL). En la figura 23 en el rango de los 80 Mbps hasta 16 Mbps el rendimiento de la cobertura no es satisfactorio, mientras que en el rango de 20 hasta 50 Mbps destacan un buen desempeño. En figura 24 obtuvimos los resultados de la red optimizada aquí se muestra una reducción en cuanto al área de cobertura donde la señal no llega, 17 Mbps dentro de un área de 0,0525 km². Por otra parte, el máximo de ancho de banda va desde 20 hasta los 50 Mbps dentro de un área de 4,5 km².

5.8.1.2 Rendimiento UL

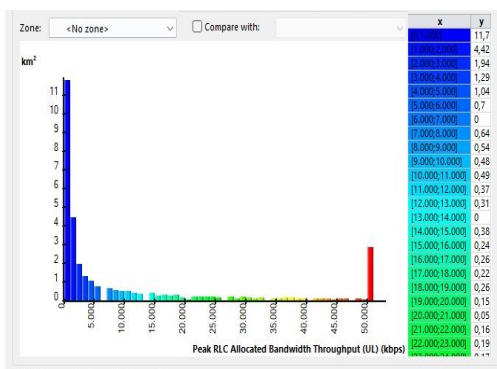


Figura 28 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL)

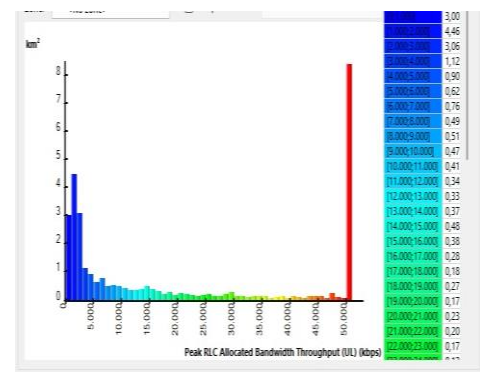


Figura 29 Histograma Peak RLC Chanel Throughput (DL) Optimizada

Ambas figuras representan la predicción de *Coverage by Throughput* como enlaces ascendentes. La figura 25 se concentra en valores bajos abarca en el rango de los 50 Mbps y dentro del área de 11,79 km², esto nos indica que el rendimiento de la red no es recomendable para los usuarios en esa área. Por otra parte, se presenta un máximo de ancho de banda de 50 Mbps que abarca un área de 2.84 km².

En cambio, en la figura 26 notamos una disminución en los valores bajos en el rango de 18 Mbps y dentro del área 4,463 km², es decir que ha disminuido el área donde la señal de rendimiento no está buena. Por otro lado, el máximo del ancho de banda va desde 20 hasta los 50 Mbps dentro de un área 8,398 km² indicando que toda esta área puede alcanzar las capacidades máximas asignadas gracias a la CA, mejorando la eficiencia del espectro y el rendimiento en enlaces ascendentes.

5.9 Mediciones de desempeño con SpeedTest y G-NetTrack

En esta sección, se muestran dos aplicaciones gratuitas para Android que posibilitan el seguimiento de indicadores de red, como el tipo de servicio disponible y las velocidades de carga (UL) y descarga (DL) del dispositivo. Para obtener estas métricas, el dispositivo tiene que estar registrado en la red de CNT, porque el análisis se enfoca en el rendimiento de esta red móvil.

5.9.1 SpeedTest

SpeedTest, desarrollado por Ookla, es una aplicación muy usada para medir la velocidad de la conexión a Internet en dispositivos móviles. Su operación está fundamentada en el cálculo de parámetros esenciales, como la latencia, la velocidad de carga y la de descarga. Esto permite tener una visión precisa de la condición real de servicio que ofrece el operador móvil. La aplicación realiza pruebas directas, lo cual garantiza datos coherentes y fiables. SpeedTest es una herramienta indispensable para analizar la calidad de servicio telefónico y comparar el desempeño de varias redes en situaciones reales gracias a su capacidad de registrar, su interfaz intuitiva y almacenar historiales de prueba.

Los datos obtenidos de manera presencial por medio de la aplicación *SpeedTest* se encuentran en la tabla 20. En este caso, las evaluaciones se llevaron a cabo únicamente en una sola estación base, desde donde se recopiló toda la información requerida para

analizar el rendimiento del servicio. Los valores documentados representan las condiciones auténticas de la red en el punto de medición específico.

Tabla 22 Datos recolectados por la aplicación SpeedTest

Elaborado por el autor

SpeedTest		
Radio Base	Downlink (DL)	Uplink (UL)
La Libertad	51.3 Mbps	21.4 Mbps

5.9.1.2 G-NetTrack

G-NetTrack es una aplicación sofisticada para dispositivos Android, creada con el propósito de supervisar y examinar en tiempo real diferentes parámetros de una red móvil. Esta herramienta facilita la visualización de información minuciosa, como el tipo de tecnología empleada (2G,3G,4G,5G), la intensidad de la señal, los valores de RSRP, RSRQ y SINR, los identificadores de celda y las variaciones en el *handover*. Estos son algunos de los indicadores fundamentales para analizar el desempeño radioeléctrico.

En la siguiente tabla 21 se describen los datos recolectados de manera presencial por medio de la aplicación *G-NetTrack*.

Tabla 23 Datos extraídos de la aplicación G-NetTrack

Elaborado por el autor

G-NetTrack						
Radio base	Cel ID	F DL	F UL	RSRP	RSRQ	RSSI
La Libertad	51633	2120,0 MHz	1720,0 MHz	-107	-14	-89

5.9.1.3 Análisis comparativo de las dos aplicaciones y el software Atoll

Para el desarrollo de este análisis, se utilizó un levantamiento de campo que permitió obtener mediciones reales a través de la aplicación móvil *G-NetTrack*. Se llevó a cabo de datos en una ubicación próxima a la estación emisora, aproximadamente a 15 metros del *eNB* y del dispositivo de usuario, asegurando de esta manera valores representativo del comportamiento radioeléctrico. Estos datos obtenidos se comparan con los resultados obtenidos por el software *Atoll*. En la figura 30 se muestran los datos obtenidos por la aplicación *G-NetTrack* como RSSI, RSRQ y RSRP.



Figura 30 Datos de la aplicación *G-NetTrack* de la estación base La Libertad

Por medio de la aplicación *SpeedTest* se obtuvo los datos de velocidades tanto de *Downlink* y *Uplink* de la estación base La Libertad. La información se muestra en la figura 31.

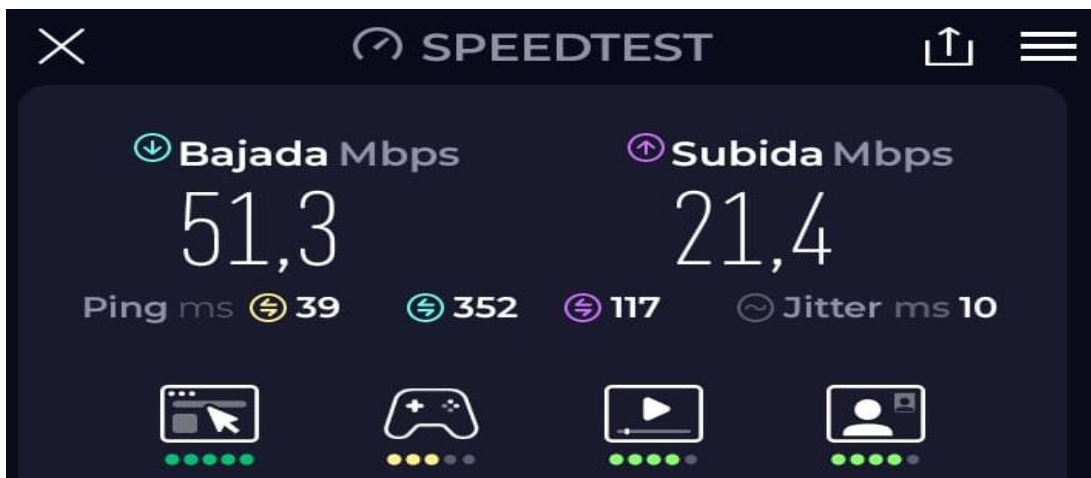


Figura 31 datos extraídos de la aplicación *SpeedTest* de la estación base La Libertad.

La estación base “STE_LIB_LA_LIBERTAD” tiene una altura de 17 m y su azimut está orientado a 355°, lo que determina su área principal de cobertura. Se utilizó la predicción *Coverage by Throughput* para analizar el rendimiento de la red en lo que respecta a carga y descarga. Esta técnica posibilita examinar las velocidades DL y UL vinculadas a la capa RLC, responsable de garantizar una transferencia confiable de datos entre el *eNodeB* y el dispositivo del usuario, *Atoll* creó automáticamente un escenario con usuarios conectados de manera dinámica durante el proceso, en una simulación de las condiciones reales de ocupación.

Tabla 24 Comparación de DL y UL en el software Atoll y en la aplicación SpeedTest

Elaborado por el autor

Comparativa de DL y UL de la estación base La Libertad		
	Datos obtenidos por el software Atoll	Datos obtenidos por la aplicación SpeedTest
DL	Peak RLC cumulated throughput: 55.13 Mbps Effective RLC cumulated throughput: 54,09 Mbps Cumulated application throughput: 51.38 Mbps	51,3 Mbps
UL	Peak RLC cumulated throughput: 17,11 Mbps Effective RLC cumulated throughput: 16,88 Mbps Cumulated application throughput: 16,03 Mbps	21,4 Mbps

El valor de potencia de señal apropiado para el área de medición se refleja en el valor RSRP registrado a través de la aplicación G-NetTrack en la estación base La Libertad,

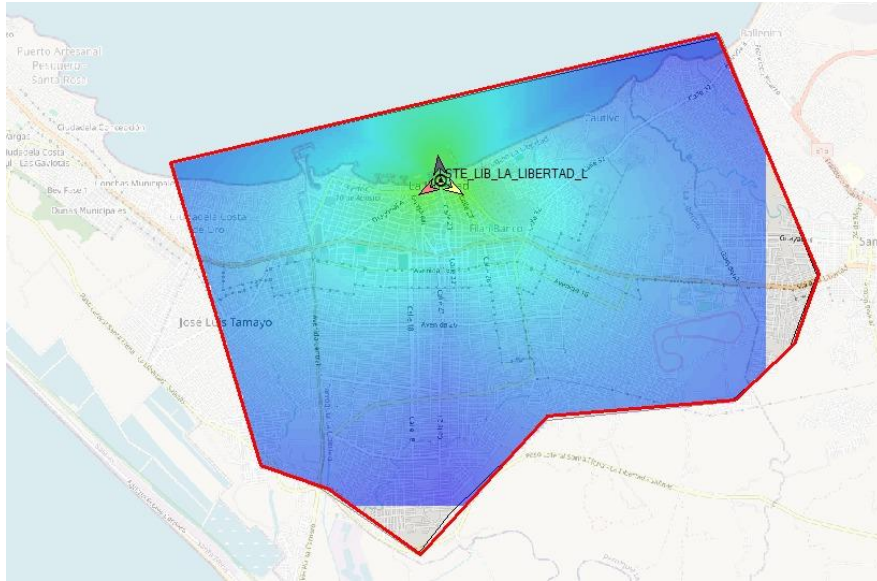


Figura 32 Nivel de señal de RSRP de la estación base LA Libertad

El la figura 32 se muestra el nivel se señal RSRP que tiene la radio base la libertad.

-107 dBm y se presenta en la figura 33. Si se compara esta información con los resultados de la predicción realizadas en el software Atoll, se nota que el RSRP sigue un rango razonable entre -109 dBm y -89 dBm aproximadamente. Esta cercanía entre las medidas simuladas y las reales demuestran una consistencia técnica entre el modelo empleado en la herramienta de simulación y el comportamiento del entorno radioeléctrico.

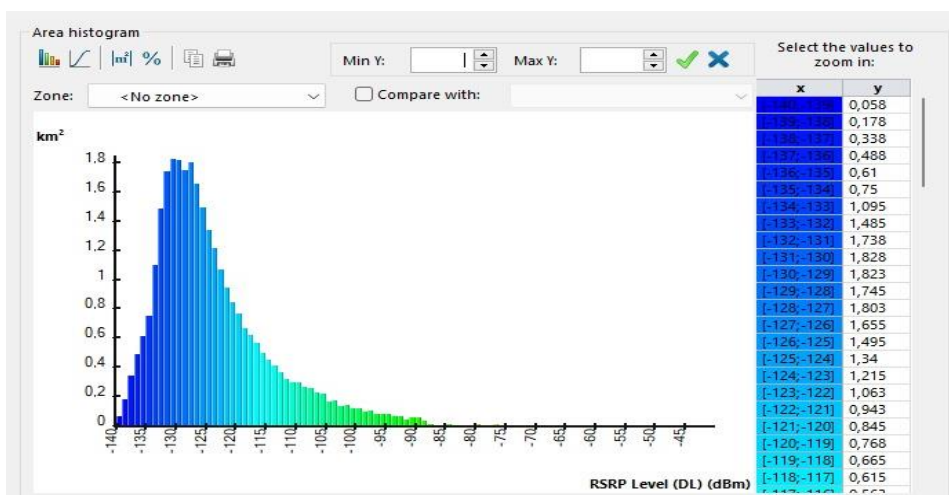


Figura 33 Histograma del valor RSRP

En la figura 34 se muestra el nivel de la señal de RSSI de la estación base de la libertad.

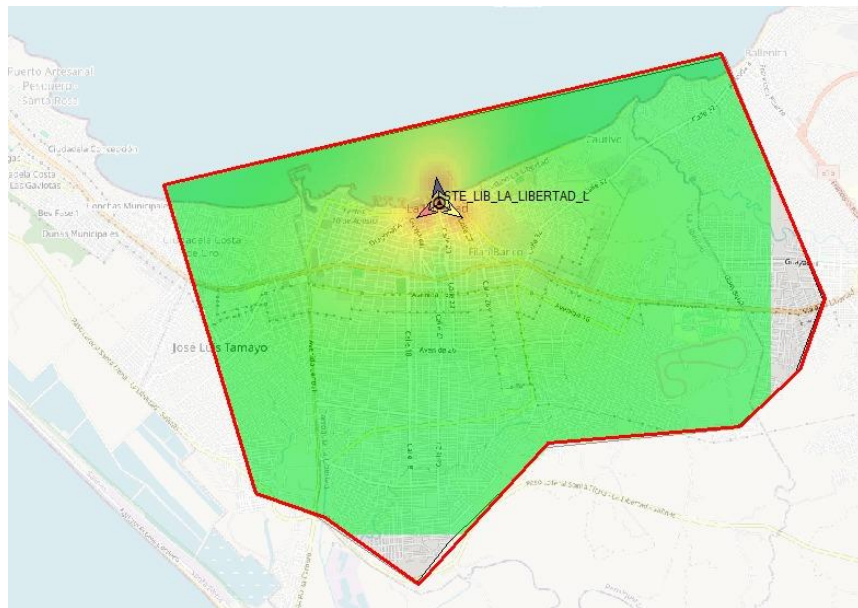


Figura 34 Nivel de RSSI de la estación La libertad

La figura 35 demuestra que en la estación transmisora de La Libertad, la medición de la intensidad de la señal recibida, obtenida por *G-NetTrack* llega a ser de -89 dBm, lo que señala una cobertura sólida en el lugar de muestreo. En cuanto a la simulación realizada en Atoll, se observa un rango de valores que oscilan entre -97 dBm y -77 dBm.

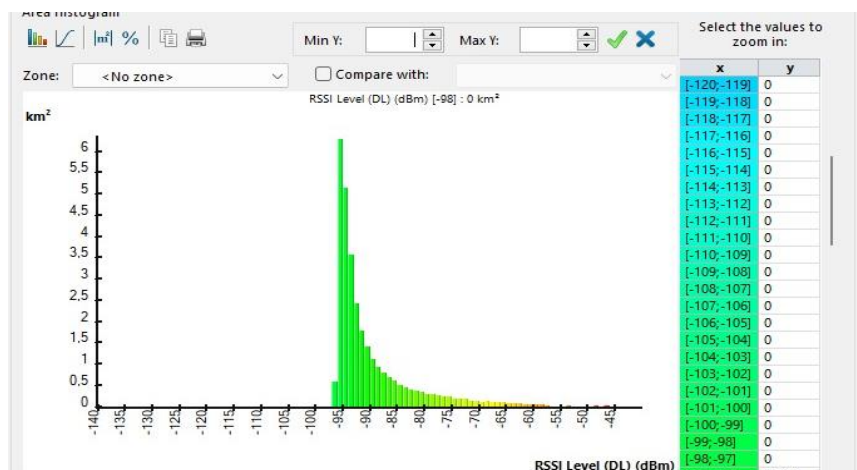


Figura 35 Histograma del valor RSSI

En la figura 36 se muestran los niveles de señal que tiene la radio base la libertad con respecto al RSRQ.

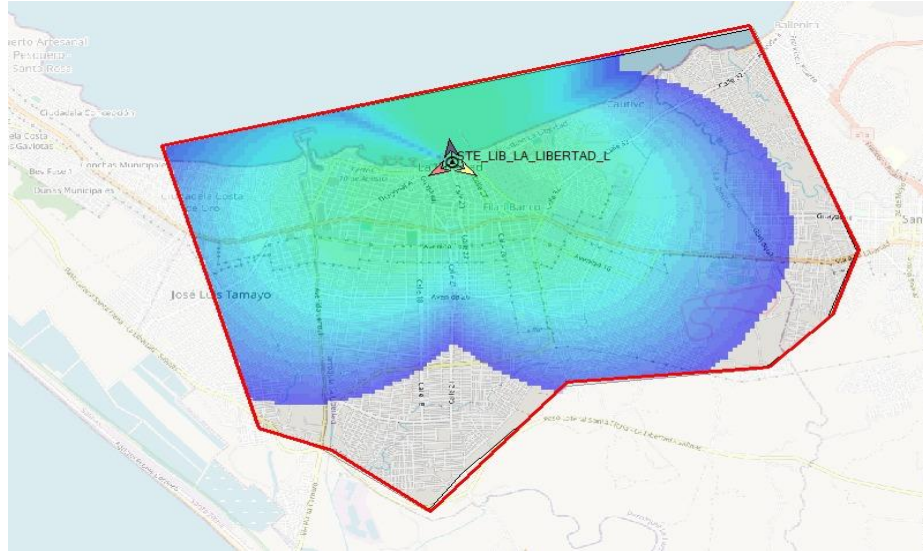


Figura 36 Nivel de señal RSRQ de la estación la Libertad

Según el análisis de G-NetTrack se muestra un valor de -14 dBm del nivel de calidad recibida. Los resultados de la simulación realizada en Atoll del nivel RSRQ muestran un valor aceptable desde 13.5 dBm hasta los 15 dBm aproximadamente. En la figura 37 se muestra el histograma con los valores de la señal RSRQ.

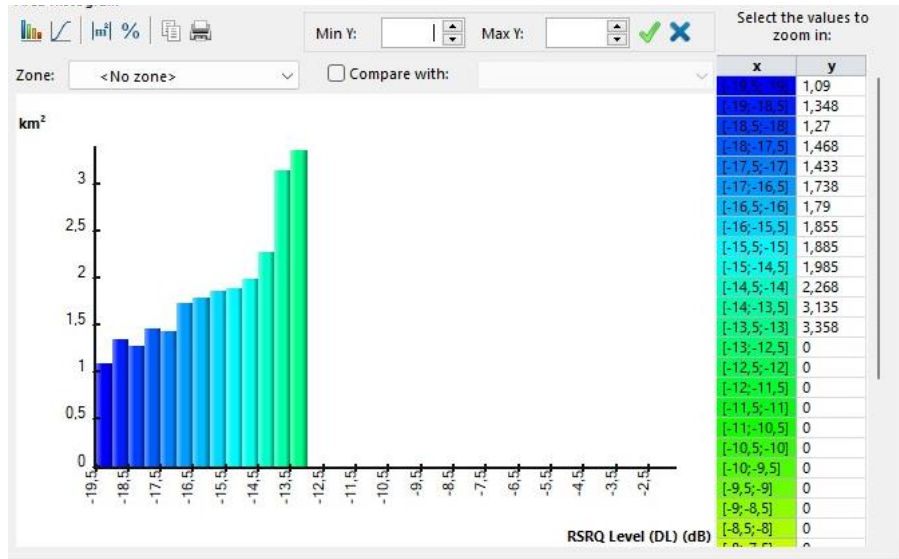


Figura 37 Histograma del valor RSRQ

CONCLUSIONES

- El análisis efectuado en el cantón La Libertad determinó que 15 radio bases están ofreciendo servicio a la red LTE de la empresa CNT. Para llevar a cabo las simulaciones, se utilizó la banda 4 (AWS), que abarca el rango de frecuencia de 1700 a 2100 MHz y tiene un total de 40 MHz asignados. Para estimar el rendimiento de la conexión descendente (*downlink*), se tomó en cuenta solamente un ancho de banda de 20 MHz, mientras que los otros 20 MHz se dejaron libres para evitar interferencias en el análisis.
- Al realizar pruebas de velocidades en enlace descendente para la estación base STE_LIB_LA_LIBERTAD, se nota un aumento considerable en el rendimiento al habilitar la segunda portadora. Con LTE-A (CA) se logra un valor de 149,61 Mbps, en contraste con la configuración de LTE que tiene un valor de 50.5 Mbps, esto demuestra la mejora significativa que aporta la agregación de portadoras en la capacidad y eficiencia de la red.
- Se ha llegado a la conclusión que las técnicas de CA incrementan significativamente la capacidad de transmisión del sistema, la calidad de servicio LTE en los diversos sectores de las estaciones bases transmisoras situadas en la provincia de Santa Elena. Las simulaciones demuestran que la red LTE-A distribuye el throughput con más uniformidad y hace posible alcanzar valores máximos más elevados, lo cual mejora el rendimiento descendente y ascendente en toda la zona de cobertura.
- LTE tiene una alta concentración en áreas con velocidades bajas de transmisión es lo que reflejan los histogramas de Throughput en la simulación, sin embargo, esto disminuye en LTE-A al incluir el CA mejora el uso del espectro radioeléctrico ya que se reduce la saturación en áreas donde la red LTE tiene restricciones en su rendimiento y permite extender el ancho de banda con la agregación de portadoras.
- Los estudios finalmente confirman que LTE-A representa una respuesta eficaz al mejorar la calidad de servicio en zonas con altas demandas de tráfico. Aumenta la

capacidad de la red al agregar portadoras permitiendo que los usuarios tengan mejor cobertura y velocidades más altas en comparación con la red LTE

RECOMENDACIONES

- Se debe determinar con exactitud el área de cálculo antes de realizar una simulación, eligiendo bien el mapa de tráfico en el que se evaluará el comportamiento de cada una de las estaciones base. Una delimitación adecuada del entorno asegura que los resultados obtenidos reflejen de manera más precisa las condiciones reales rendimiento y cobertura en la provincia de Santa Elena.
- Se sugiere aplicar Carrier en áreas urbanas o con gran concentración de usuarios ya que los resultados indican aumenta el Throughput disponible y mejora la calidad del servicio. La implementación de esta técnica permitirá a los operadores móviles mejorar la utilización del espectro existente sin la necesidad de asignar nuevas bandas.
- Para optimizar el rendimiento logrado a través de CA, se recomienda efectuar calibraciones cada cierto tiempo y modificaciones de los parámetros de potencia, balance de carga y ancho de banda en las estaciones base, la experiencia del usuario en redes LTE-A puede ser mejorada con configuraciones como la selección de portadoras primarias/secundarias o la configuración de ancho de banda agregados.

ANEXOS

ANEXO 1 TABLA DE DATOS

Tabla 25 Datos proporcionados por CNT de las Radio Bases

Nombre de sitio	Azunit	Tilt M	Conf de cable	Tipo de antena
STE_LIB_AUTODROMO_L	50	1	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_CALDERON_L	50	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_KENNEDY_L	50	2	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_LA_LIBERTAD_L	355	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_NORESTE_L	40	1	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_NORTE_L	320	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_PETROLEROS_L	355	1	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L	50	3	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_SUBURBIO_L	355	2	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_SUR_L	280	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_SURESTE_L	355	2	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_SUROESTE_L	340	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_UPSE_L	70	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_VALDIVIA_L	355	4	1/2	TDJH-182018DE-65 F
STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L	70	0	1/2	TDJH-182018DE-65 F

Tabla 26 Parámetros de las 15 estaciones proporcionadas por la empresa CNT

Nombre de sitio	Latitud	Longitud	Height	Tilt E
STE_LIB_AUTODROMO_L	-2,2382	-80,8877	30.4	2
STE_LIB_CALDERON_L	-2,23372	-80,9143	24	3
STE_LIB_KENNEDY_L	-2,222659	-80,912804	30	4
STE_LIB_LA_LIBERTAD_L	-2,220233	-80,87769	30	6
STE_LIB_NORESTE_L	-2,226043	-80,905841	23.7	8
STE_LIB_NORTE_L	-2,22599	-80,91942	30	6
STE_LIB_PETROLEROS_L	-2,21928	-80,894648	30	7
STE_LIB_SAN_RAYMUNDO_L	-2,247197	-80,918902	35.5	6
STE_LIB_SUBURBIO_L	-2,24074	-80,8993	30	4
STE_LIB_SUR_L	-2,23288	-80,90617	30	7
STE_LIB_SURESTE_L	-2,23092	-80,88897	27.5	2
STE_LIB_SUROESTE_L	-2,24178	-80,91224	24	3
STE_LIB_UPSE_L	-2,22908	-80,87769	30	5
STE_LIB_VALDIVIA_L	-2,232729	-80,901092	30	9
STE_LIB_VELASCO_IBARRA_L	-2,24094	-80,92094	36	4

ANEXOS DE FIGURA



Figura 39 visita técnica de la estación base la libertad

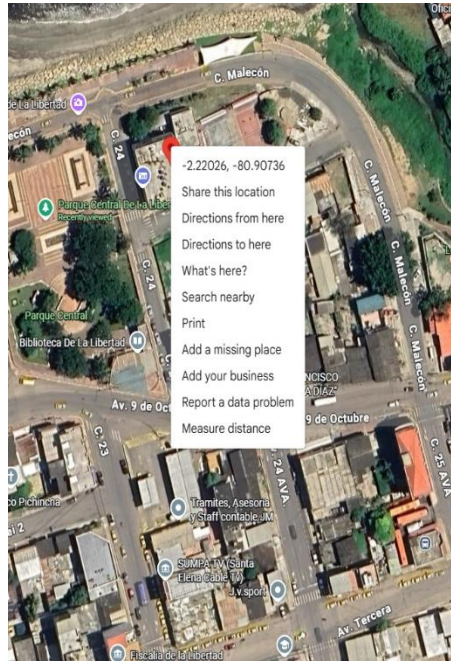


Figura 38 Coordenadas de la estación base La Libertad



Figura 40 punto de medición para la extracción de datos de la estación base la libertad

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ibarra Pastas Guido Fernando, ““Estudio para mejorar el aumento de la velocidad de datos en una estación móvil con tecnología LTE basado en Segunda Portadora y Carrier Aggregation.” Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/76b70991-92e1-4147-b787-6c916ca64a08/content>
- [2] Alava Lara Darley Steven, “Técnica de optimización para la asignación de frecuencias en redes móviles de quinta generación.” 2024.
- [3] Ortiz Casallas Diana Carolina and Gómez Saavedra José Jhonatan, “Estudio de Carrier Aggregation para optimizar el uso del espectro asignado a los operadores móviles en Colombia.” Accessed: Jul. 30, 2025. [Online]. Available: <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00002984.pdf>
- [4] W. Lehr, “Mobile Broadband Growth, Spectrum Scarcity, and Sustainable Competition,” *Telecommunications & Regulated Industries eJournal*, Jan. 2011, Accessed: Aug. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/73048774/Mobile_Broadband_Growth_Spectrum_Scarcity_and_Sustainable_Competition
- [5] M. Vargas, “Spectrum management in Latin America Impacts on economic and social development,” 2023, Accessed: Aug. 31, 2025. [Online]. Available: www.gsmainelligence.com
- [6] Correa Yupa María José, “La redistribución de frecuencias del espectro radioeléctrico, en respaldo de los medios de comunicación comunitarios en Ecuador”.
- [7] “Plan Nacional de Frecuencia.” Jun. 2021, Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf
- [8] B. F. Chere-Quiñónez, R. C. Ulloa-De Souza, and L. J. Reyna-Tenorio, “Optimización del uso del espectro radioeléctrico en Ecuador,” *Sapienza*, vol. 3, no. 3, pp. 238–249, Jun. 2022, doi: 10.51798/sijis.v3i3.524.

- [9] “Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información,” 2023, Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2023/06/Poli%CC%81tica-Pu%CC%81blica-Telecomunicaciones-2023-2025-con-ANEXOS-nuevos-signed-signed-signed-signed_firmado.pdf
- [10] C. Rivera, Z. Enrique, I. Rodríguez, and A. G. Zaballos, “Estado actual de las telecomunicaciones y la banda ancha en Ecuador,” 2020. [Online]. Available: <http://www.iadb.org>
- [11] J. E. Muñoz Cárdenas, “Prototipo de redes LTE en base a tecnología de radio definida por software e integración de la tecnología de Radio Sobre Fibra en redes móviles ,” Oct. 2022, Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23311/1/CD%2012727.pdf>
- [12] J. M. Muñoz Rodriguez, “Optimización de una red LTE en la provincia de Santa Elena mediante la herramienta de simulación Atoll para el estudio de las estrategias de Packet Scheduling: Round Robin y Proportional Fair,” 2024, Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/98d88291-e3c5-4ebe-b7de-fcdc1a16a34d/content>
- [13] G. M. Figueroa Rodríguez, “Optimización de una red LTE de la Provincia de Santa Elena mediante el software ATOLL utilizando estrategias Máximum C/I (MAX C/I) y Proportional Demand (PD) de Packet Scheduling.,” 2023, Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/ac845168-89e1-44cd-8c07-8b7ae942c458/content>
- [14] Flores Armas. Kevin Rene, “Análisis del impacto de los principales indicadores de la red para una estación Celular como consecuencia de la migración de la tecnología GSM a GSM/UMTS/LTE,” Apr. 2019, Accessed: Dec. 04, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20168/1/CD%209644.pdf>

- [15] Michelena Andres, “Informe de rendición de cuentas 2020.” Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/05/Informe-IRC-MINTEL-2020.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [16] Guerrero Pineda Guerrero Pineda and Ñacato Peña Richard Fabricio, “Análisis de la infraestructura 5G en la ciudad de Quito sector el recreo.,” 2022, Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21870/1/UPS%20-%20TTS597.pdf>
- [17] Informe para consultas públicas del proyecto normativo referente al ‘Establecimiento de topes de espectro radioeléctrico para la prestación del servicio móvil avanzado,’” Sep. 2023, Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2023/09/informe_te%CC%81cnico_topes_de_espectro_v.1_para_consulta_pu%CC%81blica19_sep_2023_sf.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [18] Muñoz Cardenas Javier Estalin, “Prototipo de redes LTE en base a tecnología de radio definida por software e integración de la tecnología de radio sobre fibra en redes móviles simulación de una red LTE utilizando el proyecto SRSRAN.,” Oct. 2022, Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23311/1/CD%2012727.pdf>
- [19] J. C. Robles and F. V Villasís, “Conociendo a LTE y LTE-Advanced”, Accessed: Sep. 05, 2025. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/110714077/Conociendo_a_LTE_y_LTE_A-libre.pdf?1705920534=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConociendo_a_LTE_y_LTE_Advanced.pdf&Expires=1757197638&Signature=QKoUREjAQN6CyLJV5WKKxJQeJ0y-bISc63juhK8QphT5t9pIolMC1U4BOGgDJeTK04d5TDWF60SUfbiJ0Z1ijTuKT-DM4hPJogjrPjWFnBU6V57IOv36xHTUV--jeeVshRjLd9dvCLrNwHyFmYIjQmuvoVrztSSYcY87Hb5c4zg0g3EpnUHRpW MmO-

Ju~8qcdrcFk63pF2PHaallgBmjIkA0q0nmNIgm9GVcNU13B6er5cqJCi~iVQ~ew
6hcCKsXRmaYdAlfuJYMj7DchF3~M8Q3ePcwsBdF3T

- [20] D. F. Rueda Pepinosa, “Calidad del Servicio en Redes LTE Advanced (Long Term Evolution-Advanced),” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/268447670>
- [21] D. Chicago and P. Lupera Morillo, “Análisis Experimental de Señales LTE y LTE_Advanced para la Evaluación del Efecto de la Agregación de Portadoras.” Accessed: Sep. 06, 2025. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24017/1/2018AJIEE-3.pdf>
- [22] D. S. Alava Lara, “Técnica de Optimización para la Asignación de Frecuencias en Redes Móviles De Quinta Generación,” 2024, Accessed: Sep. 07, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5c5ea11b-36fa-43e4-b566-d2fef7702ac1/content>
- [23] K. Muñoz, R. Lara, and R. León, “Análisis de la tecnología Long Term Evolution (LTE) para su posible implementación en el Ecuador”.
- [24] J. L. Roca *et al.*, “Redes LTE.” Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: <https://repositoriocyt.unlam.edu.ar/bitstream/123456789/546/1/Redes%20LTE.pdf>
- [25] “Ley orgánica de Telecomunicaciones”, Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/Ley-Org%C3%A1nica-de-Telecomunicaciones.pdf>
- [26] M. Mas Ferrer, “Network Deployment Studies in 5G using Atoll Radio Planning Tool.” Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/3372fd84-5b5e-4027-b9b6-1fb4d8d5a13c/content>
- [27] “Gestión del espectro radioeléctrico en Ecuador”, Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/3833/1/SM138-Llanos-Gestion.pdf>

- [28] H. M. Escalona Rios, "Introducción de redes LTE con agregación de portadoras.", Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12798/Tesis.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

