

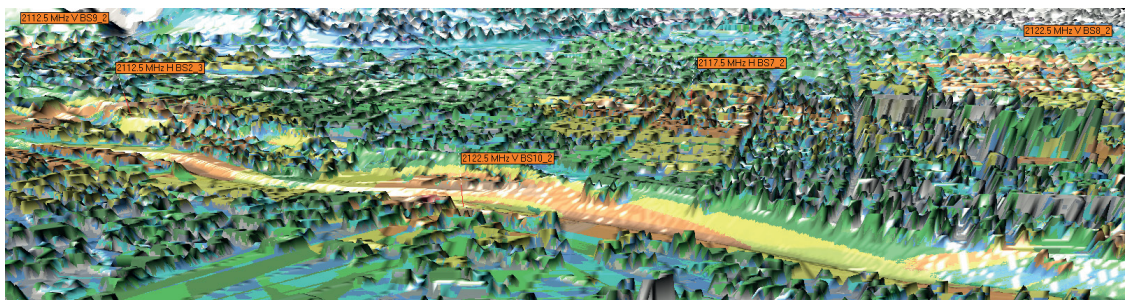


UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

“SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE COBERTURA PARA TECNOLOGÍA LTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CUENCA”



AUTORA:
Daniela Estefanía Barrera Salamea

DIRECTORA;
Ing. Sofía Priscila Arévalo Maldonado

CUENCA - 2015

RESUMEN

La nueva red de banda ancha inalámbrica Long Term Evolution (LTE) ofrece velocidades de transmisión de datos de enlace descendente (300 Mbps) y de enlace ascendente (75 Mbps) más altas y menor latencia, en comparación con tecnologías 3G, para mejorar la experiencia del usuario en servicios multimedia, voz HD, video llamada, conferencia en vivo de alta definición, televisión interactiva, etc., garantizando la competitividad de las redes móviles en el futuro.

LTE está basada en OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), soporta modulaciones de mayor orden (hasta 64 QAM), mayores anchos de banda (hasta 20 MHz), multiplexación espacial en enlace descendente (hasta 4x4) y manejo de servicios de voz y datos sobre protocolo IP.

Este proyecto analiza el comportamiento de cobertura, interferencia y capacidad de este tipo de red implementada en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca. En primer lugar, se presenta un fundamento teórico para la comprensión de la tecnología LTE y sus especificaciones técnicas presentadas en el estándar 3GPP versión 8. También se incluyen algunos aspectos regulatorios aplicados para el desarrollo de LTE en Ecuador y concretamente en Cuenca.

Después de un estudio acerca de las herramientas de planificación de radio, la plataforma de simulación de redes de telecomunicaciones utilizada es ICS TELECOM, del cual se aprovecha sus capacidades en planificación de frecuencias, gestión del espectro radioeléctrico, predicción de la cobertura y análisis de interferencia.

El despliegue de la red simulada prioriza el uso de torres de antenas existentes en la zona, pertenecientes a las operadoras de telefonía móvil, debido a la complejidad de instalar nuevas estaciones base en el área de estudio que posee valor patrimonial. Finalmente, se analiza la red simulada y se realiza una comparación del rendimiento de técnicas MIMO, del uso de diferentes anchos de banda asignados a cada nodo, y del uso de diferentes bandas de frecuencia de transmisión (700MHz y 1700-2100MHz).

ABSTRACT

The new wireless broadband Long Term Evolution (LTE) network provides higher downlink/uplink data speeds and lower latency compared to 3G technologies to enhance the user experience for multimedia services, HD voice, video calling, live HD conferences, interactive TV, etc. to ensure the competitiveness of the mobile networks for the future.

LTE, is based on OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), supports higher order modulations (up to 64QAM), large bandwidths (up to 20 MHz), spatial multiplexing in the downlink (up to 4x4) and both voice and data services are carried by the IP protocol.

This project analyze the coverage, interference and capacity performance of this type of network implemented on “Centro Histórico” of the city of Cuenca. First, a theoretical explanation is introduced for a better understanding of LTE technology and its technical specifications presented in 3GPP Release 8 standard. Also some regulatory aspects applied for the development of LTE in Ecuador, specifically Cuenca are included.

After a study about radio planning tools, the simulation platform for telecommunication networks ICS TELECOM is used to exploit its capabilities on frequency planning, spectrum management, coverage prediction and interference analysis.

The deployment of the simulated network prioritizes the use of existing antenna towers belonging to mobile operators, due to the complexity to install new base stations on the studied area which holds patrimonial value. Finally, the simulated network is analysed and the performance of MIMO techniques, the use of different bandwidths allocated to each eNodeB and the use of different transmission frequency bands (700MHz and 1700-2100MHz) are compared.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	10
1. VISIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA DE RED LONG TERM EVOLUTION (LTE)	22
1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LTE	24
1.2. FRECUENCIAS DE OPERACIÓN LTE	25
1.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE	27
1.3.1. Equipo de Usuario UE	28
1.3.2. EUTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network)	28
1.3.3. EPC (Evolved Packet Core)	30
1.4. TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN EN EL SISTEMA LTE	30
1.4.1. OFDMA	30
1.4.2. SC-FDMA	33
1.4.3. Técnicas Multi-Antena	35
1.5. REÚSO DE FRECUENCIAS	36
1.6. CAPA FÍSICA	38
1.6.1. Diseño de Capa Física para Enlace Descendente	38
1.6.2. Señales de Referencia	42
1.6.3. Canales de Físicos	43
1.7. CÁLCULO DE RENDIMIENTO (THROUGHPUT).	44
2. ANÁLISIS REGULATORIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES LONG TERM EVOLUTION (LTE)	50
2.1. BANDAS DE FRECUENCIAS ASIGNADAS PARA SISTEMAS IMT EN ECUADOR.	52
2.1.1. BANDA 700 MHz	53
2.1.2. BANDA 1700/2100 MHz	54
2.1.3. BANDA 2.5 GHz	55
2.2. ESPECTRO OTORGADO A LAS OPERADORES MÓVILES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LTE EN ECUADOR	56
2.2.1. Frecuencias asignadas a la Corporación Nacional De Telecomunicaciones Empresa Pública (CNT E.P.)	57
2.2.2. Frecuencias asignadas al Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones S.A- CONECEL	58
2.3. ORDENANZA MUNICIPAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE ESTACIONES RADIOELÉCTRICAS FIJAS EN CUENCA	59
2.4. REGLAMENTO DE ACCESO Y USO COMPARTIDO DE TELECOMUNICACIONES.	61

3. ANALISIS DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN	64
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES	66
3.1.1. ICS TELECOM	66
3.1.2. ATOLL	67
3.1.3. XIRIO ONLINE	67
3.2. PARAMETROS DE SIMULACIÓN	68
3.2.1. Cartografía Digital	68
3.2.2. Modelos de Propagación	69
3.2.3. Técnicas MIMO	70
3.2.4. Predicciones Disponibles	71
3.3. ELECCIÓN DE SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE RED LTE	72
3.4. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE ICS TELECOM	73
3.4.1. Escenario	73
3.5. DEFINICIÓN DE LA BANDA DE FRECUENCIA	78
3.6. ELECCIÓN DE MODELO DE PROPAGACIÓN	79
3.6.1. Okumura Hata	79
3.6.2. Método ITU-R 525/526 Bullington	80
3.6.3. Método ITU-R 525/526 Deygout	82
 4. EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA.	 86
4.1. SIMULACIÓN DE MODELOS DE PROPAGACIÓN	88
4.2. DISEÑO DE RED LTE CNT	91
4.3. SIMULACIÓN DE LA RED LTE CNT ACTUAL CON UNA CANALIZACIÓN DE 20MHZ	99
4.4. RED LTE: 7 ESTACIONES ACTIVAS.	105
4.5. RED LTE: 10 ESTACIONES ACTIVAS.	113
4.6. RED LTE: 12 ESTACIONES ACTIVAS.	118
4.7. COMPARACIÓN DE ANCHO DE BANDA	126
4.8. COMPARACION TECNICAS MIMO	136
4.9. RED EN 700MHZ	141
4.10. CÁLCULO DE CAPACIDAD	146
 CONCLUSIONES	 152
RECOMENDACIONES	156
BIBLIOGRAFÍA	157
ANEXO 1	161



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

Yo, Daniela Estefanía Barrera Salamea, autora de la tesis “Simulación y análisis de cobertura para tecnología LTE en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 06 de Abril de 2015

Daniela Estefanía Barrera Salamea
C.I: 0105244065



Universidad de Cuenca
Cláusula de derechos de autor

Yo, Daniela Estefanía Barrera Salamea, autora de la tesis “Simulación y análisis de cobertura para tecnología LTE en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 06 de Abril de 2015

Daniela Estefanía Barrera Salamea
C.I: 0105244065

AGRADECIMIENTO

Culminar esta etapa académica hubiese sido imposible sin la colaboración de grandes personas, por ello, es para mí un verdadero placer expresarles mi agradecimiento.

De manera muy especial a mi familia que me ha acompañado en este camino motivándome constantemente.

A la Ing. Sofía Arévalo por aceptar dirigir esta tesis, su esfuerzo, apoyo y confianza es invaluable.

A la institución ARCOTEL y a cada uno de sus funcionarios que de alguna manera me facilitaron todas las herramientas para llevar a cabo mi investigación, siempre apoyándome con sus ideas y críticas constructivas.

A Josué, que me acompañó en la etapa final de esta ardua tarea, gracias a su colaboración y palabras de aliento.

A todos los profesores que me han brindado sus conocimientos y contribuyeron con mi formación profesional, en fin tantas personas, amigos que me encantaría agradecer por lo que este sueño alcanzado es gracias a ustedes y para ustedes.

DEDICATORIA

A Dios que me ha dado la oportunidad de vivir y cumplir esta meta.

A mis padres, porque gracias a ustedes hoy puedo ver alcanzada este logro es su orgullo por mí lo que me ha hecho llegar a estas instancias, me han dado todo el apoyo posible, sus consejos, sus valores y sobretodo su gran amor.

A mis hermanos, por su cariño y palabras de aliento, siempre ayudándome en lo que fuera posible.

JUSTIFICACIÓN

La tecnología 3G para redes móviles desplegada actualmente en el Ecuador permite a los usuarios una conexión inalámbrica permanente a internet, con un ancho de banda y velocidad de transmisión de datos de hasta 20Mbps teóricamente, sin embargo, estas características resultan insuficientes para varios servicios tecnológicos actuales como: transmisión de video, juegos en línea, etc.

LTE (Long Term Evolution) es la tecnología de telefonía móvil que está siendo adoptada por la mayoría de países en Europa, y en América, incluyendo Ecuador, de acuerdo a lo publicado por la organización 3GPP; con el objetivo de brindar a los usuarios múltiples beneficios que incluyen: navegación web, FTP, transmisión de video, VoIP, juegos en tiempo real, push-to-talk y push-to-view.

La ciudad de Cuenca se encuentra en una primera etapa respecto al despliegue de este tipo de red, sin embargo, el diseño requiere la instalación de nuevas radio bases, sujetas a ordenanzas municipales, que ya han presentado algunas dificultades como: la instalación de nuevas estructuras para antenas de telefonía móvil, consideradas como contaminantes que afectan la percepción visual, estética y de seguridad y; además la resistencia por parte de los ciudadanos ya que en su mayoría desconfía de los posibles efectos de las radiaciones para su salud.

Por estas razones el presente trabajo plantea un análisis de cobertura de una red móvil LTE, utilizando la infraestructura física ya existente en el centro histórico de la ciudad. El objetivo será responder a la interrogante del número de radio bases que será necesario instalar con el cambio de tecnología o si la infraestructura existente es suficiente para soportar cierta cobertura demandada por los usuarios. La capacidad de la red requerida, será calculada realizando una estimación del número de usuarios móviles por operadora de la zona en estudio.

OBJETIVOS

GENERAL:

Evaluar el comportamiento de cobertura de una red LTE a través de una simulación, haciendo uso de la infraestructura física existente para redes móviles, en el centro histórico de la ciudad de Cuenca.

ESPECÍFICOS:

1. Estudiar los parámetros específicos correspondientes a redes 4G necesarios para la implementación de este tipo de red.
2. Realizar una evaluación de los simuladores para redes móviles existentes en el mercado y elegir la opción más adecuada para el proyecto.
3. Elaborar una simulación de red LTE sobre la infraestructura física existente en el centro histórico de la ciudad de Cuenca utilizando el software seleccionado.
4. Evaluar el comportamiento de la red simulada, en términos de cobertura y capacidad.

CAPÍTULO 1

VISIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA DE RED LONG TERM EVOLUTION (LTE)



INTRODUCCIÓN

La red inalámbrica de banda ancha LTE (Long Term Evolution) o también denominada E-UTRAN (Evolved- UMTS Terrestrial Radio Access Network), es la evolución de la norma 3GPP UMTS (3G), que garantiza la competitividad futura de las redes móviles frente a la creciente demanda de usuarios, que requieren nuevas aplicaciones y servicios de alta velocidad de transmisión y mayor capacidad de paquetes de datos.

El estándar LTE se concluyó en Diciembre del 2008 por el proyecto 3GPP (3rd Generation Partnership Project), donde se introdujo avances en las tecnologías de acceso de la interfaz radio, como: el esquema OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para enlace descendente, SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para enlace ascendente y técnicas de múltiples antenas MIMO [23]. Se presenta cambios en la arquitectura de red y evolución de la red troncal, que utiliza el protocolo IP para la transmisión de datos extremo a extremo, incluyendo el tráfico de voz que se soporta en Voz sobre IP.

La evolución de las tecnologías móviles desarrolladas por 3GPP, como se indica en la Figura 1.1, expone grandes avances respecto a velocidades de transmisión soportadas. Inicialmente las tecnologías de segunda generación como EDGE solo permitían llamadas telefónicas a través de conmutación de circuitos y el envío de mensajes cortos (SMS), el desarrollo de UMTS y posteriormente HSPA y HSPA+ consideradas tecnologías de tercera generación permitieron navegación en internet y servicios multimedia [23]. Finalmente, LTE busca soportar servicios de alta calidad en tiempo real principalmente de video, brindando conectividad eficiente y constante al usuario.

23

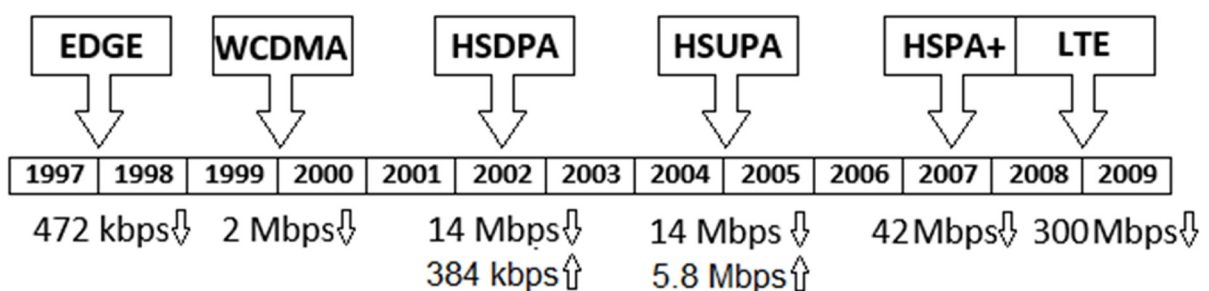


Figura 1.1. Evolución y tasa de datos máxima teórica de tecnologías 3GPP. [23]



1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LTE

Los requerimientos alcanzados por el sistema LTE para superar las capacidades de una red 3G, respecto a velocidades de transmisión, latencia, eficiencia espectral, etc., especificados en [1], son:

- **Velocidad de datos:** Depende de la asignación de espectro y del número de antenas transmisoras y receptoras, teóricamente alcanza una máxima velocidad de bajada de 150Mbps con 2x2 MIMO y 300Mbps con 4x4 MIMO con un ancho de banda de 20MHz, y una máxima velocidad de subida de 75Mbps con 4x4 MIMO.
- **Latencia:** En Plano Usuario, el tiempo que demora un paquete en viajar desde la capa IP de un dispositivo o de la red de radio acceso RAN, a estar disponible en la capa IP de la red de radio acceso o del dispositivo respectivamente (One Way), debe ser menor a 30ms.

Latencia en el Plano de control, hace referencia al tiempo requerido para que un usuario cambie de un estado pasivo (IDLE) a un estado activo, el mismo que debe ser menor a 100ms. Y un tiempo menor a 50ms para cambiar de un estado inactivo (ahorro de energía) a un activo.

- **Eficiencia Espectral (bits/sec/Hz/site):** 3 a 4 veces mejor para down-link y 2 a 3 veces mejor para uplink comparado con el sistema 3GPP Versión 6 (HSPA).
- **Ancho de banda variable:** LTE permite trabajar con anchos de banda de 1.4, 5, 10, 15 y 20MHz, dependiendo del espectro disponible.
- **Modos de transmisión:** Dependiendo de la banda de frecuencia, LTE soporta FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex). En FDD, la estación base y el terminal transmiten y reciben al mismo tiempo utilizando distintas portadoras, alcanzando velocidades de datos similares tanto de subida como de bajada. En TDD, en cambio, la estación base y el terminal transmiten y reciben en la misma frecuencia pero en tiempos diferentes, lo que es ventajoso para aplicaciones que requieren un tráfico asimétrico, es decir, mayores velocidades de datos de bajada que de subida.
- **“ALL IP”:** Todos los servicios incluyendo los de voz y servicios a tiempo real son soportados por conmutación de paquetes. La voz transmitida sobre IP mantiene por lo menos la misma calidad que tenía al ser transmitida bajo dominio de circuitos en el Versión 6 de 3GPP.



- **Movilidad:** Optimización de red para bajas velocidades (0-15km/h). Soporta velocidades de 350-500km/h dependiendo de la banda de frecuencia con un alto rendimiento.
- **Interoperabilidad y Co-existencia:** Garantiza interoperabilidad y co-existencia con otros sistemas de comunicación móvil de generaciones anteriores. Por ejemplo, un traspaso (handover) entre los sistemas E-UTRAN y UTRAN/GERAN (3G) es posible con un tiempo de interrupción menor a 300ms para servicios a tiempo real y menor a 500ms para servicios que no son a tiempo real.
- **Costo:** Una arquitectura de red reducida disminuye costos, así como la opción de aprovechar sitios existentes. Las interfaces de comunicación son abiertas y permiten interoperabilidad entre equipos de distintos proveedores.
- **Calidad de servicio:** Control de QoS (Quality of Service) que se refiere a la percepción del servicio por parte del usuario. A través de la diferenciación de servicios a los que se asigna una identificación única, para la asignación de recursos dedicados y no dedicados extremo a extremo de la red.

1.2. FRECUENCIAS DE OPERACIÓN LTE

LTE está diseñado para operar en distintas bandas de frecuencias que se presentan en la especificación 36.101 de 3GPP [4], las mismas que se indican en la Tabla 1.1. En la última columna se diferencia el modo de transmisión que soportan: FDD o TDD.

EUTRA Banda de Operación	Banda de Operación de Enlace Ascendente (UL)			Banda de Operación de Enlace Descendente (DL)			Modo Duplex
	$F_{UL\ low}$	–	$F_{UL\ high}$	$F_{DL\ low}$	–	$F_{DL\ high}$	
1	1920 MHz	–	1980 MHz	2110 MHz	–	2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	–	1910 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	–	1785 MHz	1805 MHz	–	1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	–	1755 MHz	2110 MHz	–	2155 MHz	FDD
5	824 MHz	–	849 MHz	869 MHz	–	894 MHz	FDD
6	830 MHz	–	840 MHz	875 MHz	–	885 MHz	FDD
7	2500 MHz	–	2570 MHz	2620 MHz	–	2690 MHz	FDD
8	880 MHz	–	915 MHz	925 MHz	–	960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	–	1784.9 MHz	1844.9 MHz	–	1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	–	1770 MHz	2110 MHz	–	2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	–	1447.9 MHz	1475.9 MHz	–	1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz	–	716 MHz	729 MHz	–	746 MHz	FDD



13	777 MHz	–	787 MHz	746 MHz	–	756 MHz	FDD
14	788 MHz	–	798 MHz	758 MHz	–	768 MHz	FDD
15	1900 Mhz	–	1920 Mhz	2600 Mhz	–	2620 Mhz	FDD
16	2010 Mhz	–	2025 Mhz	2585 Mhz	–	2600 Mhz	FDD
17	704 MHz	–	716 Mhz	734 Mhz	–	746 Mhz	FDD
18	815 Mhz	–	830 Mhz	860 Mhz	–	875 Mhz	FDD
19	830 Mhz	–	845 Mhz	875 Mhz	–	890 Mhz	FDD
20	832 Mhz	–	862 Mhz	791 Mhz	–	821 Mhz	FDD
21	1447.9 Mhz	–	1462.9 Mhz	1495.5 Mhz	–	1510.9 Mhz	FDD
22	3410 Mhz	–	3500 Mhz	3510 Mhz	–	3600 Mhz	FDD
23	2000 Mhz	–	2020 Mhz	2180 Mhz	–	2200 Mhz	FDD
24	1625.5 Mhz	–	1660.5 Mhz	1525 Mhz	–	1559 Mhz	FDD
25	1850 Mhz	–	1915 Mhz	1930 Mhz	–	1995 Mhz	FDD
26	814 Mhz	–	849 Mhz	859 Mhz	–	894 Mhz	FDD
27	807 Mhz	–	824 Mhz	852 Mhz	–	859 Mhz	FDD
28	703 Mhz	–	748 Mhz	758 Mhz	–	803 Mhz	FDD
29	Solo Enlace Descendente			717 Mhz	–	728 Mhz	FDD
30	2305 Mhz	–	2315 Mhz	2350 Mhz	–	2360 Mhz	FDD
31	452.5 Mhz	–	457.5 Mhz	462.5 Mhz	–	467.5 Mhz	FDD
32	Solo Enlace Descendente			1452 Mhz	–	1496 Mhz	FDD
33	1900 MHz	–	1920 MHz	1900 MHz	–	1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	–	2025 MHz	2010 MHz	–	2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	–	1910 MHz	1850 MHz	–	1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	–	1990 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	–	1930 MHz	1910 MHz	–	1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	–	2620 MHz	2570 MHz	–	2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	–	1920 MHz	1880 MHz	–	1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	–	2400 MHz	2300 MHz	–	2400 MHz	TDD
41	2496 Mhz	–	2690 Mhz	2496 Mhz	–	2690 Mhz	TDD
42	3400 Mhz	–	3600 Mhz	3400 Mhz	–	3600 Mhz	TDD
43	3600 Mhz	–	3800 Mhz	3600 Mhz	–	3800 Mhz	TDD
44	703 Mhz	–	803 Mhz	703 Mhz	–	803 Mhz	TDD

Tabla 1.1. Frecuencias de operación para LTE. [4]



1.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE

El término LTE se ha comercializado para nombrar al sistema móvil desarrollado en la versión 8 por 3GPP. En principio, “LTE” se asignó a la evolución de la red de radio acceso UTRAN o Evolved-UTRAN, que en conjunto con la evolución de la red troncal o EPC (Evolved Packet Core) integran la arquitectura de red completa denominada EPS (Evolved Packet System) [33], la cual tiene un menor número de componentes que las redes inalámbricas de generaciones anteriores.

Como se observa en la Figura 1.2, EPS cuenta con tres componentes principales, que son [5]: Equipo de usuario (UE) o equipo móvil, EUTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) y EPC (Evolved Packet Core).

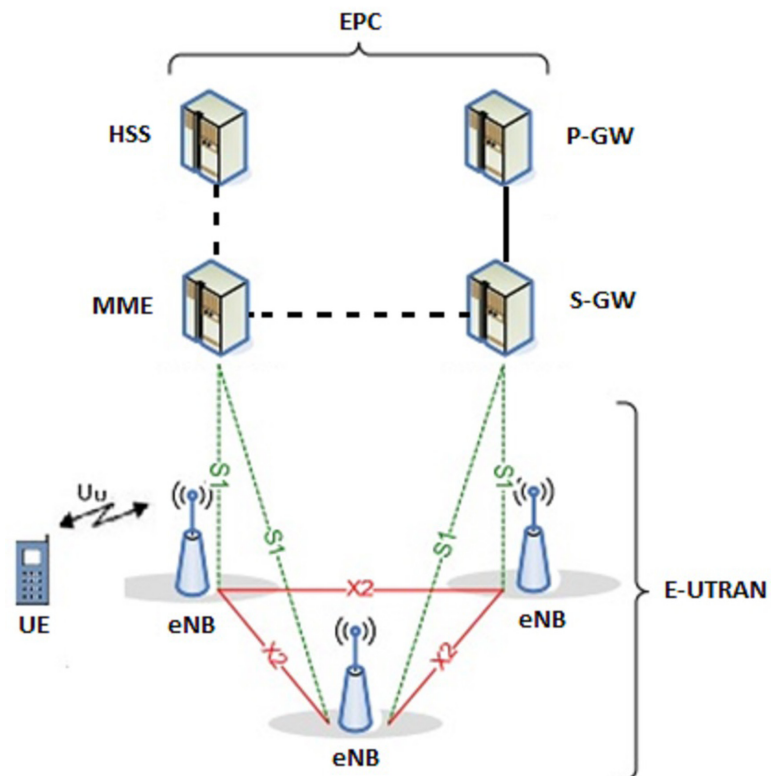


Figura 1.2. Arquitectura de red LTE. [33]

Esta red que soporta únicamente servicios bajo dominio de paquetes (“ALL IP”) provee conectividad IP entre UE y la red EPC que a su vez se comunica con redes exteriores como Internet o redes privadas, con una mejorada calidad de servicio.



1.3.1. Equipo de Usuario UE

Los equipos móviles compatibles con la tecnología LTE versión 8 se clasifican en 5 categorías dependiendo de sus capacidades de transmisión de datos y características técnicas [33], como se indica en la Tabla 1.2.

Cada móvil, a través de mensajes de señalización, transmite sus capacidades a las estaciones base para que éstas puedan controlarlos y establecer una comunicación.

	Categoría UE				
	1	2	3	4	5
Velocidad de Datos Enlace Descendente (Mbps)	10	50	100	150	300
Velocidad de Datos Enlace Ascendente (Mbps)	5	25	50	50	75
Número de Antenas Receptoras Requeridas	2	2	2	2	4
Número de capas MIMO de Enlace Descendente Soportadas	1	2	2	2	4
Soporte de modulación 64 QAM Enlace Descendente	√	√	√	√	√
Soporte de modulación 64 QAM Enlace Ascendente	x	x	x	x	√

Tabla 1.2. Categorización de equipos móviles para LTE. [33]

Adicionalmente, LTE soporta móviles que utilicen tanto IP versión 4 como IP versión 6, o ambos si es que la red y el móvil soportan las dos versiones.

1.3.2. EUTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network)

La red de radio acceso se compone por un conjunto de radio bases denominadas eNodeB (E-UTRAN Node B) conectadas entre sí a través de la interfaz de comunicación X2 y con la red troncal a través de la interfaz S1, como se observa en la Figura 1.2.

La interfaz S1, en plano de usuario (S1-U) se encarga del envío de tráfico de usuario, y en el plano de control (S1-MME) transporta funciones de gestión de la interfaz S1-U y de acceso del móvil a la red. Por otro lado, la interfaz X2 intercambia mensajes de señalización entre los eNodeB, comunicación que es opcional para la optimización de recursos [11]. Estas interfaces se encuentran estandarizadas para permitir interoperabilidad entre distintos proveedores de equipos de comunicación requeridos para el despliegue de este tipo de red.

Un eNodeB se encarga de la comunicación entre usuario UE y la red troncal, y controla la operación de bajo nivel de los móviles a través de mensajes de señalización, por ejemplo, la operación de handover o traspaso.



Como único elemento de la red de acceso, un eNodeB integra todas las funcionalidades de los controladores RNC existentes en las redes UMTS, con lo que se obtiene una arquitectura plana sin jerarquización y se reduce la latencia ya que el intercambio de información con un elemento adicional de red se suprime [11]. En la Figura 1.3 se presenta una comparación de arquitectura de red entre LTE y UMTS.

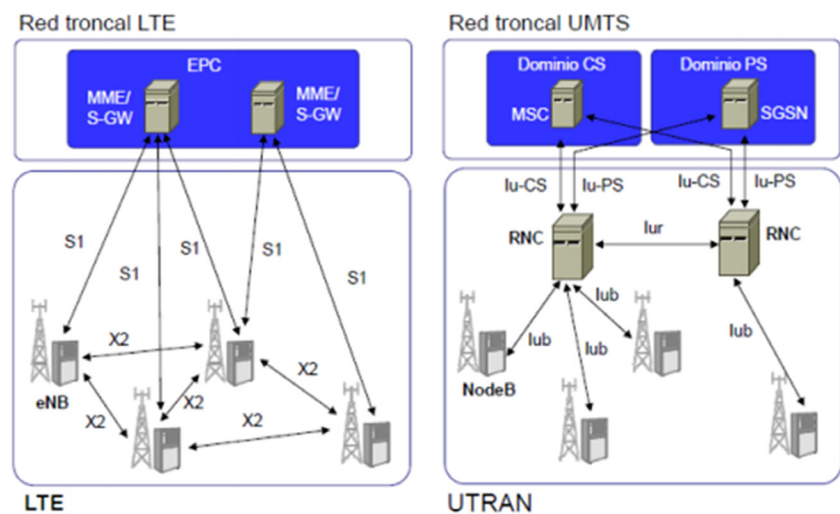


Figura 1.3. Comparación de arquitectura de red entre LTE y UMTS. [11]

E-UTRAN Node B cumple con funciones como [33]:

- **Administración de Recursos Radio:** Controla y maneja los recursos radio para alcanzar una máxima eficiencia espectral, priorizar tráfico de acuerdo a la calidad de servicio asignada y proveer movilidad a los usuarios.
- **Compresión de cabeceras:** Comprime las cabeceras de paquetes IP, evitando sobrecarga (overhead) y que se repita información innecesaria.
- **Almacenamiento:** Mantiene información de todos los equipos de usuario conectados éste, incluyendo: estado, servicios activos, capacidades de transmisión, etc.
- **Seguridad:** La información se encripta antes de ser transmitida.
- **Handover:** Mide y analiza los datos de nivel de señal obtenidos por el móvil, y toma decisiones respecto a traspaso entre celdas, transmitiendo mensajes de señalización. Cada móvil se comunica únicamente con una radio base y una celda a la vez, por lo que no existe equivalente a soft handover en LTE.



1.3.3. EPC (Evolved Packet Core)

La red troncal proporciona conectividad IP al usuario hacia redes externas (3GPP y no 3GPP, internet). Las entidades basadas en conmutación de paquetes que constituyen la red troncal se describen a continuación [24,33]:

- **P-GW (Packet Data Network Gateway):** Asigna las direcciones IP al UE para su comunicación con otras redes de datos como los servidores del operador o navegación por internet. Asocia el flujo de paquetes de usuario de enlace descendente con distintas portadoras, de acuerdo a la clase de servicio o QoS al que pertenezcan. P-GW permite intercomunicación entre redes no 3GPP como CDMA 2000 y WiMAX.
- **S-GW (Serving Gateway):** Actúa como router transfiriendo la información de usuario cuando se mueve de un eNodeB a otro, o desde la radio base hacia la puerta de enlace P-GW. A un UE se asigna un único S-GW, y este cambia cuando el móvil se aleja demasiado. Almacena temporalmente información de usuario cuando el móvil se encuentra inactivo (IDLE) hasta que se reestablezca la comunicación. S-GW permite movilidad con otras redes 3GPP como: GPRS y UMTS.
- **MME (Mobility Management Entity):** Controla la señalización entre UE y la red troncal. Se encarga del establecimiento, mantenimiento y liberación de portadoras, así como del manejo y seguridad de la conexión, y de funcionalidades para intercomunicación con otras redes.
- **HSS (Home Subscriber Server):** Contiene información de suscripción de usuario como: restricciones de acceso (roaming), perfil de calidad de servicio, etc. Incluye además información dinámica como la entidad MME a la que se encuentra conectada. Puede integrar el centro de autenticación para generación de llaves de seguridad.

1.4. TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN EN EL SISTEMA LTE

1.4.1. OFDMA

Un sistema OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) subdivide el espectro disponible en múltiples subportadoras de ancho de banda angosto, cuyo espectro se solapa pero no se interfiere por ser ortogonales entre sí [12], como se observa en la Figura 1.4. Por lo tanto, se evita la necesidad de bandas de guarda, resultando en una técnica de alta eficiencia espectral ya que permite transmitir varios flujos de



información simultáneos sobre las subportadoras manteniendo su capacidad de separación en recepción.

Los subcanales experimentan un desvanecimiento plano, esto disminuye la complejidad de ecualización en el receptor, que compensa de manera individual las ganancias de las subportadoras dependiendo de la atenuación que cada una de ellas haya sufrido [23].

En LTE la separación determinada en el estándar entre subportadoras es de 15kHz, que proporciona alta tolerancia al efecto Doppler producido en función de la velocidad de los móviles. En la Figura 1.4, se representa una señal OFDM donde se puede observar un ancho de banda de 5MHz dividido en múltiples subportadoras, por las cuales se transmite los datos modulados. En el dominio del tiempo se agrega a cada símbolo un intervalo de guarda denominado prefijo cíclico, que disminuye la interferencia intersímbolo, y es igual a la diferencia de tiempo entre los símbolos receptados de la primera señal multicamino y la última señal multicamino, se mide en microsegundos [12].

31

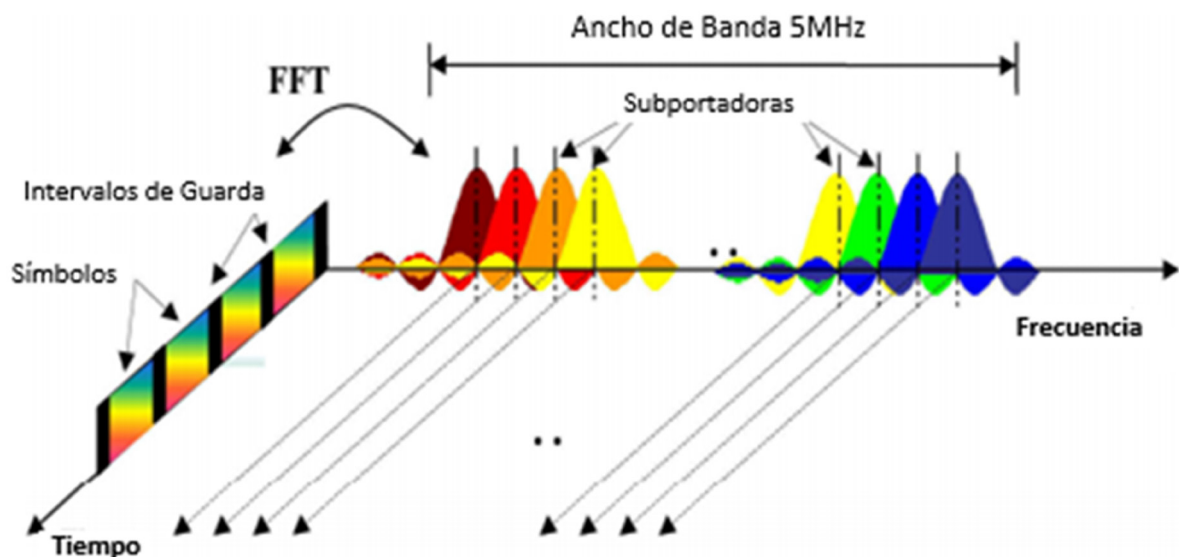


Figura 1.4. Representación de una señal OFDM. [12]

OFDM se basa en la implementación de la transformada rápida de Fourier (FFT) y su operación inversa (IFFT), que permite variar la señal entre el dominio del tiempo y la frecuencia. En la Figura 1.5, se observa el diagrama de bloques de un transmisor OFDM, donde los datos se modulan de manera independiente antes de ser transmitidos sobre cada subportadora, los símbolos obtenidos son enviados paralelamente al bloque IFFT donde se genera la señal OFDM discreta en el tiempo. LTE soporta las modulaciones: QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

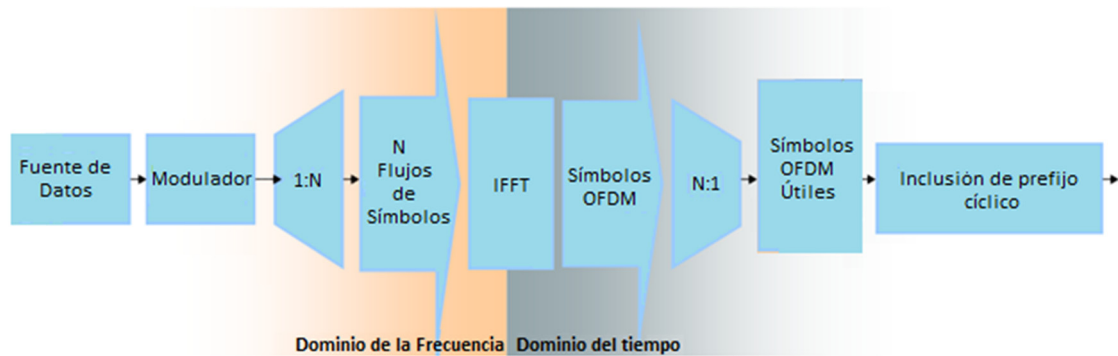


Figura 1.5. Diagrama de bloques de un transmisor OFDM. [12]

Finalmente, se tiene un conversor paralelo a serie y se agrega a cada símbolo OFDM el prefijo cíclico, que se compone de la parte final del símbolo OFDM añadida al principio del mismo [23], como se observa en la Figura 1.6.

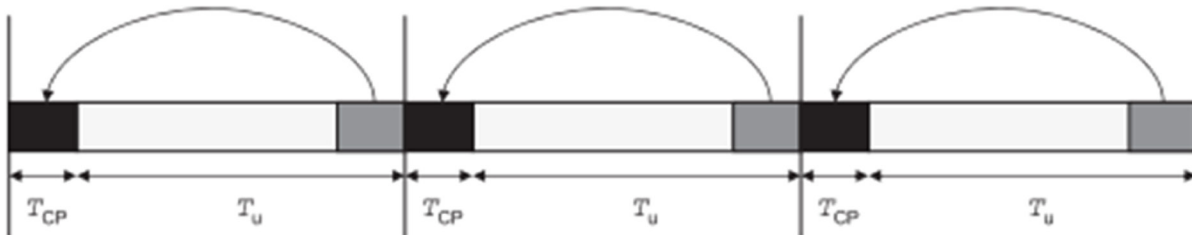


Figura 1.6. Generación de prefijo cíclico. [23]

Por otro lado, el esquema OFDMA, extensión de OFDM, se caracteriza por permitir el acceso simultáneo de múltiples usuarios al sistema, a cada uno de los cuales se le puede asignar uno o varios recursos en tiempo y frecuencia, como se puede observar en la Figura 1.7.

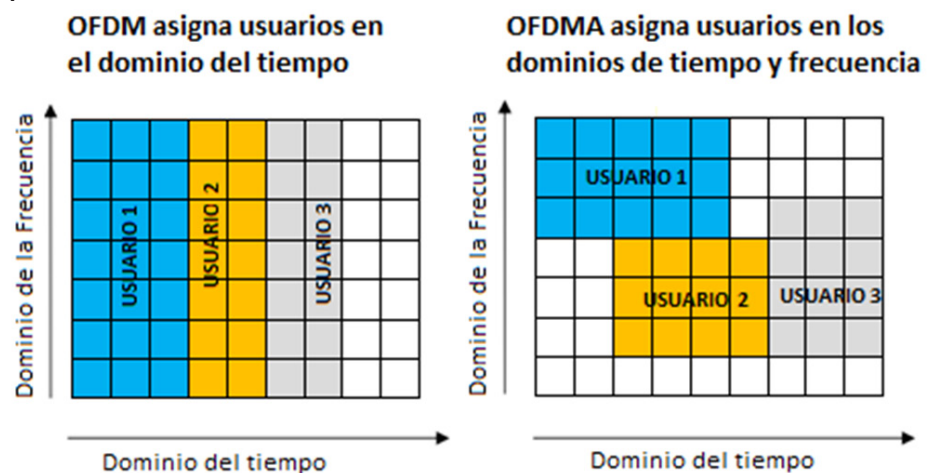


Figura 1.7. Diferencia entre los esquemas de transmisión OFDM y OFDMA. [12]



La técnica de múltiple acceso OFDMA fue seleccionada para el enlace descendente en LTE, para los modos de transmisión FDD y TDD, por sus ventajas frente al desvanecimiento multicamino, por compatibilidad con técnicas MIMO, manejo de distintos anchos de banda, asignación de recursos en tiempo y frecuencia, y por permitir que el receptor sea de menor complejidad.

1.4.2. SC-FDMA

El esquema de transmisión OFDMA presenta una gran desventaja para el enlace de subida (UL), ya que este tipo de señal posee variaciones de amplitud que se reflejan en variaciones de potencia de transmisión como se muestra en la Figura 1.8. Por lo que se requiere en el transmisor costosos amplificadores lineales de potencia, donde la potencia de salida es proporcional a la de entrada, es decir, no distorsionan la señal a transmitir [10]. Estos amplificadores resultan ineficientes para un receptor móvil pues se busca el menor costo para su accesibilidad en el mercado. Es decir, se requiere otro esquema para transmisión en UL.

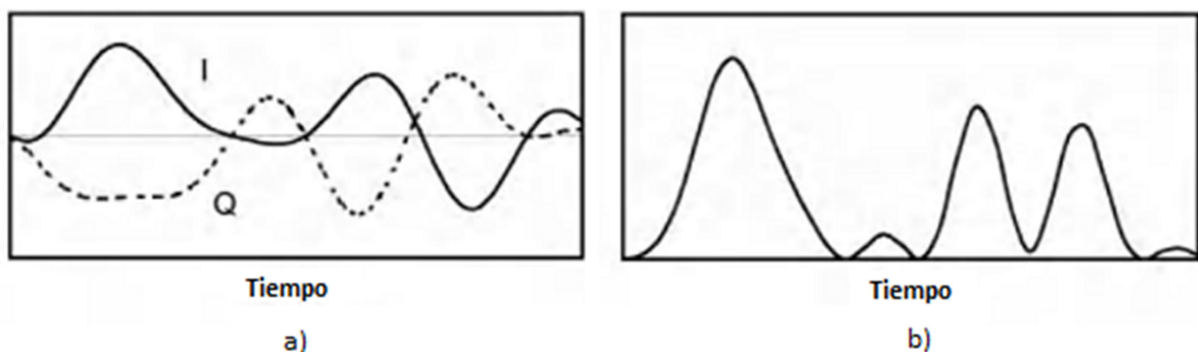


Figura 1.8. Amplitud de señal OFDMA (a). Potencia de señal OFDMA (b). [10]

SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) es el esquema seleccionado para enlace ascendente en LTE, para los modos FDD y TDD, ya que presenta mejores características respecto a variación de potencia, específicamente, la relación entre la potencia pico instantánea y la potencia media (PAPR) de la señal a transmitir es menor [13], y mantiene flexibilidad para la asignación de subportadoras a igual que OFDMA.

El diagrama de un sistema SC-FDMA se muestra en la Figura 1.9, donde la diferencia con el esquema OFDMA es la presencia de un bloque DFT (Discrete Fourier Transform), que mezcla los símbolos previamente modulados antes de mapearlos sobre las portadoras, esta operación distribuye la señal en el tiempo sobre el dominio de la frecuencia minimizando las variaciones de potencia de la señal obtenida.

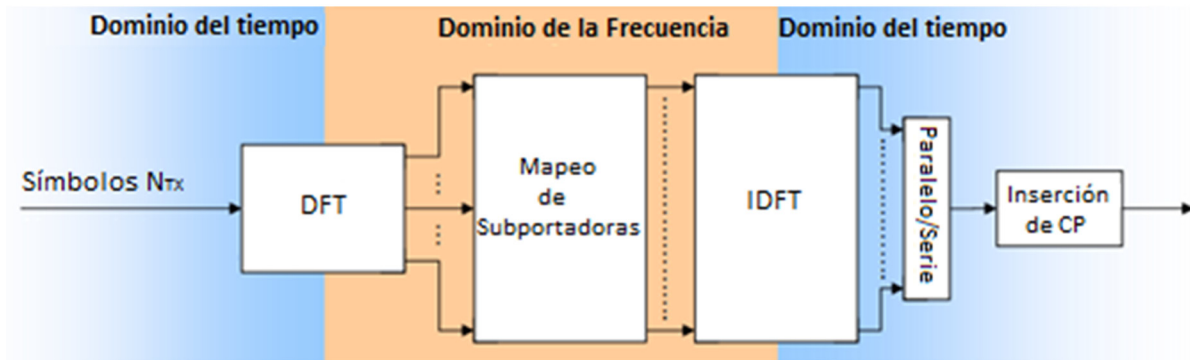


Figura 1.9. Diagrama de bloques de un sistema SC-FDMA. [12]

Se puede sintetizar que la diferencia entre los esquemas de transmisión para enlace descendente y ascendente, es que en OFDMA cada subportadora transporta información perteneciente a un símbolo específico, y con el esquema SC-FDMA cada portadora contiene información de todos los símbolos transmitidos, como se ilustra en la Figura 1.10.

34

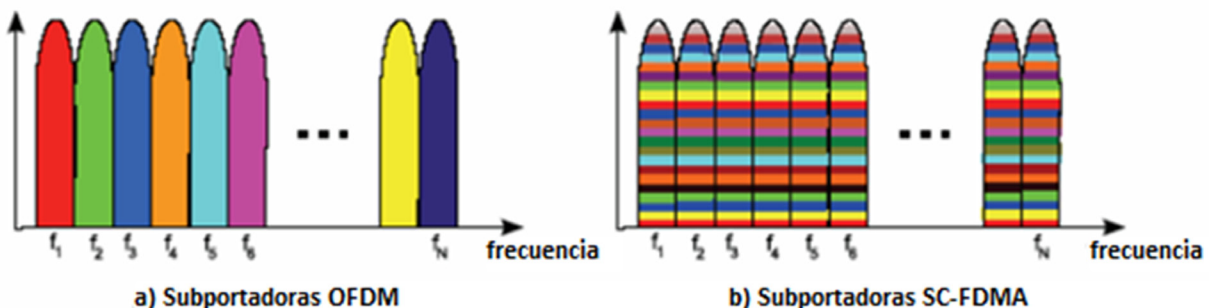


Figura 1.10. Diferencia entre los esquemas de transmisión OFDMA y SC-FDMA. [12]

En LTE versión 8, los esquemas de modulación posibles para enlace ascendente son: QPSK, 16 QAM y 64 QAM (Móvil Cat. 5) [23], y se tiene una transmisión localizada donde el móvil transmite únicamente sobre un conjunto de subportadoras contiguas, ya que las otras están disponibles para otros móviles.

Por otro lado, las transmisiones de diferentes UE hacia una estación base eNodeB, deben llegar con una desalineación máxima equivalente a la longitud del prefijo cíclico para mantener la ortogonalidad, evitar interferencia y permitir una correcta demodulación de las señales receptadas.



1.4.3. Técnicas Multi-Antena

La técnica MIMO, esencial en LTE, se basa en el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor para obtener altas velocidades de transmisión de datos y un uso eficiente del espectro radioeléctrico. De acuerdo a las especificaciones de 3GPP, LTE soporta la configuración base 2x2 que se refiere al uso de 2 antenas en el eNodeB y 2 antenas en el receptor móvil, y la configuración 4x4 [1].

A partir de la técnica MIMO existen distintos modos de transmisión, éstos dependen de las condiciones del canal, la velocidad de datos que se requiera o de la capacidad del móvil. Se describen a continuación [13]:

- **Multiplexación espacial:** Modo de transmisión que envía distintos flujos de datos a través de cada antena, estos pueden pertenecer a un único usuario (Single User MIMO / SU-MIMO) incrementando su velocidad de datos, o a varios usuarios (Multiple Users MIMO/ MU-MIMO) incrementando la capacidad total de la radio base. Esta técnica requiere altos niveles de SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), por lo que se utiliza comúnmente en zonas cercanas al eNodeB.

35

Una ilustración sencilla de multiplexación espacial SU-MIMO se presenta en la Figura 1.11, donde cada antena transmisora envía distintos flujos de datos y las antenas de un receptor captan las dos señales enviadas. La calidad de la comunicación se degrada cuando las antenas no están separadas lo suficiente.

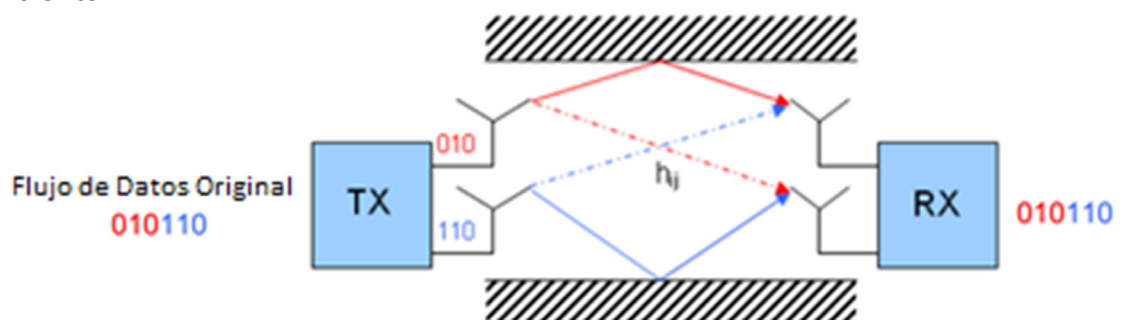


Figura 1.11. Multiplexación Espacial SU-MIMO. [13]

Para la demodulación correcta de las múltiples señales transmitidas, éstas se codifican en el transmisor. Se multiplican por una de las matrices de un “codebook” predefinido, que es seleccionada por el móvil y conocida también por la radio base. La elección de la matriz se realiza en función de una estimación de canal. El “codebook” para el caso de MIMO 2x2 se indica en la Tabla 1.3.



Índice Codebook	Número de Capas	
	1	2
0	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
2	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix}$

Tabla 1.3. Matrices de precodificación para MIMO 2x2. [13]

- **Diversidad de transmisión:** Se transmite por cada antena el mismo flujo de datos, lo que aumenta la potencia y la relación señal a ruido de los datos receptados, robustez que se aprovecha en zonas límites de la celda.

36

Este modo de transmisión requiere también una codificación específica por antena, como se presenta en la Figura 1.12, donde los dos símbolos ($d(1)$ y $d(0)$) son replicados con distinta codificación en cada puerto de antena.

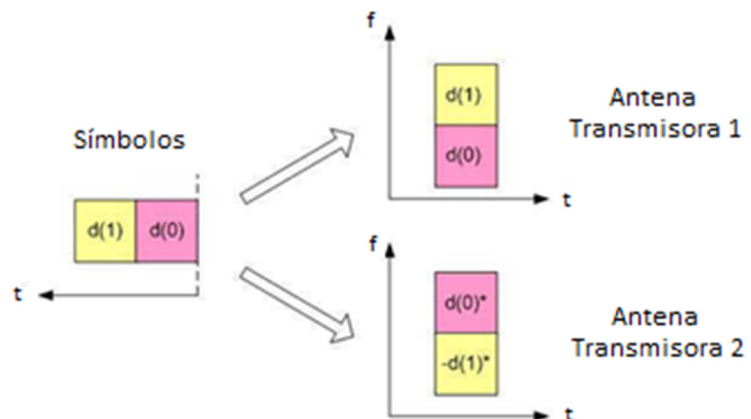


Figura 1.12. Principio de funcionamiento de Diversidad de Transmisión. [13]

1.5. REÚSO DE FRECUENCIAS

En una red móvil LTE la interferencia intra-celular, producida por las señales de comunicación de los usuarios de la misma celda, se anula con el uso de la técnica de acceso radio OFDMA y su característica principal de ortogonalidad entre señales [11]. Sin embargo, existe interferencia inter-celular producida por transmisiones de celdas vecinas, que limita la capacidad de la celda afectando la calidad del servicio



brindado al usuario y el número total de usuarios que se puede satisfacer, especialmente en los bordes de la misma.

En LTE se asigna los mismos canales de frecuencia a celdas vecinas entre sí, lo que aumenta la probabilidad de que un recurso asignado a un usuario en el límite de la celda también sea usado por la celda vecina, generando interferencia que disminuye el rendimiento del usuario o provoca la caída de llamadas o falla del enlace.

Existen varios métodos ICIC (InterCell Interference Coordination) recomendados por 3GPP que buscan reducir la interferencia intercelular en los bordes de las celdas a partir de variaciones de potencia de transmisión y restricciones de asignación de frecuencia por parte de la estación base eNodeB.

Los distintos esquemas ICIC se presentan en la Figura 1.13.

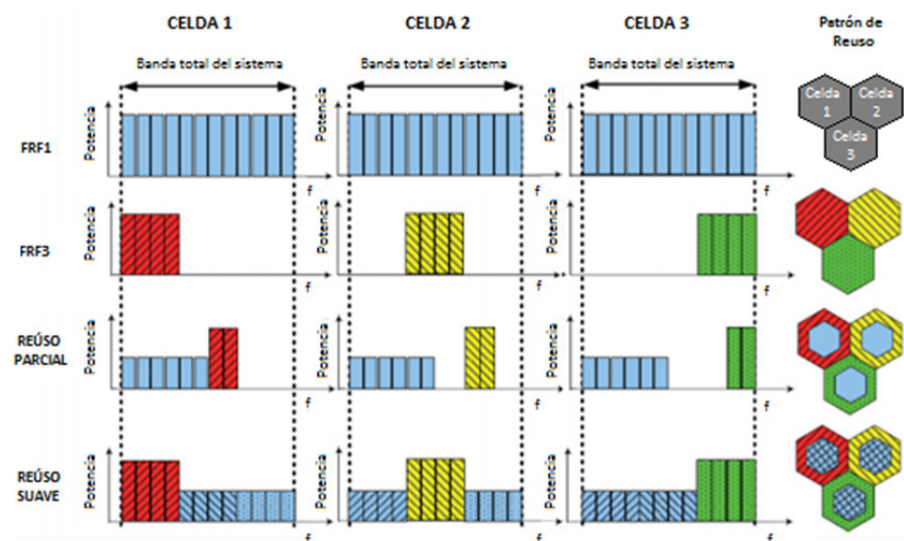


Figura 1.13. Métodos ICIC. [11]

El primer esquema FRF1, pertenece a reuso de frecuencias 1, donde la banda total del sistema se asigna a cada una de las celdas, maximizando la eficiencia espectral, sin aplicar ninguna técnica de mitigación de interferencia.

El segundo esquema FRF3 representa un reuso de frecuencias 3, es decir, el ancho de banda disponible se divide en tres partes iguales y cada banda dividida se asigna a una de las tres celdas contiguas, lo que evita la interferencia por celdas vecinas pero también disminuye la cantidad de recursos disponibles para cada celda.

En el tercer y cuarto esquemas se tiene una reutilización parcial de frecuencias, ya que solo una sección de la banda es asignada de manera independiente a cada celda.



Un reuso parcial en el tercer esquema se debe a que solo un tercio de la banda se divide en tres secciones que son asignadas respectivamente a cada una de las tres celdas contiguas, y que representan los únicos recursos a ser asignados en los bordes. El resto de la banda es común en las tres celdas, se asigna en el centro de las mismas con menor potencia.

En el último esquema se asigna todos los recursos a cada una de las celdas, pero se divide la banda en tres secciones, y de manera alternada estas secciones son utilizadas con mayor potencia en los bordes de las celdas contiguas lo que disminuye la interferencia intercelular sin reducir los recursos disponibles totales.

1.6. CAPA FÍSICA

1.6.1. Diseño de Capa Física para Enlace Descendente

38

En el enlace descendente la técnica de múltiple acceso OFDMA y las técnicas MIMO, permiten que los datos de control y de usuario, luego de ser multiplexados, se subdividan en pequeñas unidades de tiempo, frecuencia y espacio.

La dimensión espacial se explota en función del número de antenas que posea la radio base eNodeB, que debe ser igual al número de antenas receptoras del móvil, cada puerto de antena representa una capa en el espacio, en LTE se puede utilizar hasta 4 capas espaciales.

Para cada una de las capas, los recursos en tiempo y frecuencia se estructuran según el modo de transmisión FDD o TTD. Presentado en [13], que se resume a continuación:

En FDD, como se indica en la Figura 1.14, los recursos se ordenan en tramas de 10ms de duración, cada trama se divide en 10 subtramas de 1ms y cada subtrama se subdivide en 2 slots de 0.5ms. Cada slot contiene 7 símbolos OFDM si se utiliza un prefijo cíclico (CP) normal o 6 símbolos en caso de prefijo cíclico (CP) extendido.

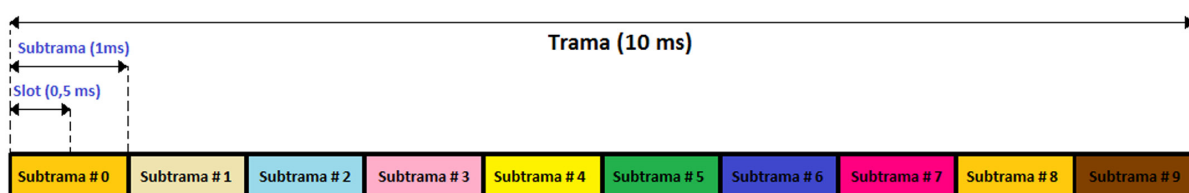


Figura 1.14. Estructura de trama para enlace descendente. [11]



La parametrización normal en LTE utiliza un prefijo cíclico de $5\mu\text{s}$, sin embargo, para evitar ISI (Interferencia Intersimbólica) por largos retardos de propagación, típico en zonas rurales o suburbanas amplias, también se puede configurar un prefijo cíclico extendido de $17\mu\text{s}$.

En el dominio de la frecuencia se disponen grupos de 12 subportadoras con ancho de banda de 15kHz cada una, un total de 180kHz . Una unidad de 12 subportadoras, de duración 0.5ms (1 slot) se denomina Resource Block (RB).

Un Resource Element (RE) está compuesto de una subportadora por la duración de un símbolo OFDM, siendo el recurso de menor tamaño definido. Ciertos RE son dedicados para control, señalización y sincronización, y el resto para transmisión de datos de usuario.

Un RB está compuesto de 84 Resource Elements en el caso de CP normal y 72 Resource Elements en caso de CP extendido. En la Tabla 1.4 se indica el número de RBs disponibles en función del ancho de banda, tomando en cuenta que se reserva un 10% como banda de guarda, excepto para el caso de 1.4MHz que se reserva un 22%:

Ancho de Banda (Mhz)	1.4	3	5	10	15	20
Número de RBs CP normal	6	15	25	50	75	100

Tabla 1.4. RBs para distintos ancho de banda en LTE. [41]

La estructura de trama detallada, en función de tiempo, frecuencia y espacio, se presenta gráficamente en la Figura 1.15.

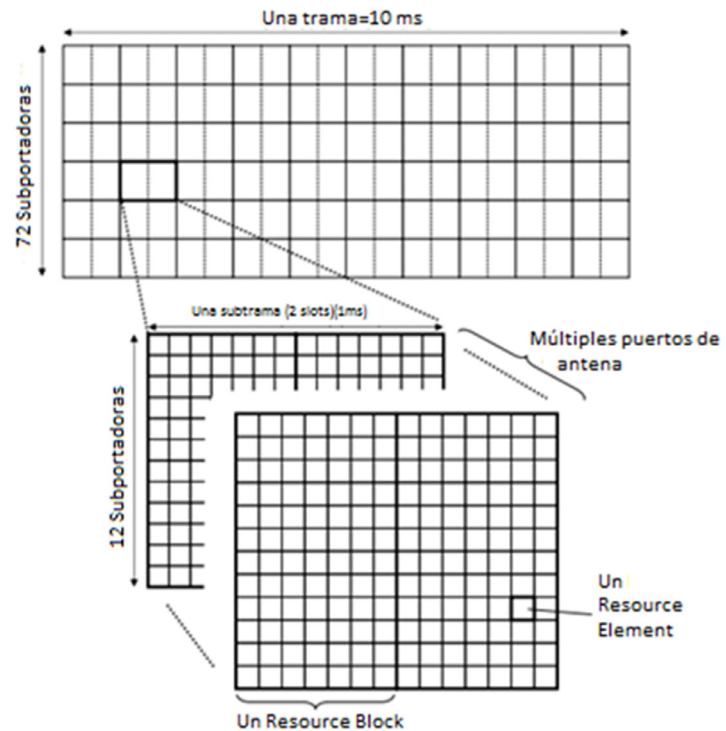


Figura 1.15. Estructura de Trama. [33]

En el modo de transmisión TDD los conceptos de Resource Block y Resource Element se mantienen, pero la organización de subtramas es distinta.

Una trama de 10ms se divide en 2 grupos de 5 subtramas de 1ms cada una. Donde, existen subtramas dedicadas para enlace descendente (D), otras para enlace ascendente (U) y subtramas especiales (S) que actúan como banda de guarda para el cambio de dirección de transmisión, como se indica en la Figura 1.16. Este tiempo de guarda permite en enlace ascendente que los desfases de las transmisiones de distintos usuarios se sincronicen en la estación base.

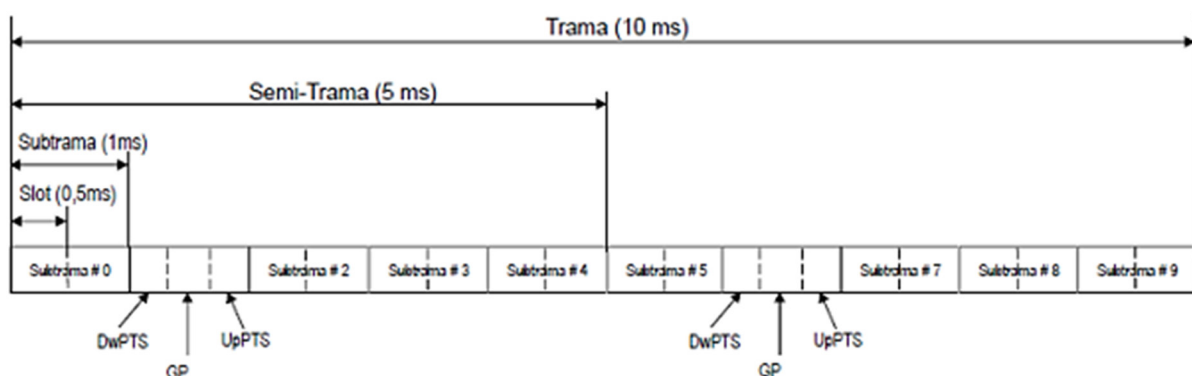


Figura 1.16. Estructura de trama para enlace ascendente. [11]



Una subtrama especial está compuesta de tres campos: DwPTS que contiene bits piloto de enlace descendente, GP tiempo de guarda y UpPTS que contiene bits piloto para enlace ascendente.

En LTE versión 8 se definen 7 configuraciones de trama para TDD, con periodicidad de cambio de 5ms o 10ms, que se indican en la Tabla 1.5.

Configuración Enlace Ascendente- Descendente	Periodicidad	Número de Subtrama									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabla 1.5. Configuración de trama para TDD. [13]

Se especifican, además, nueve configuraciones para las tramas especiales según la duración de los campos que las componen.

Se puede observar en la Tabla 1.6, distintas duraciones del tiempo de guarda GP, en número de símbolos OFDM. Esta variación permite soportar distintos tamaños de celdas, ya que a mayor periodo de guarda se resiste mayores desfases de las señales producidos en celdas de mayor tamaño.

Config Subtrama Especial	CP Normal en Enlace Descendente				CP Extendido en Enlace Descendente			
	DwPTS	Periodo de Guarda	UpPTS		DwPTS	Periodo de Guarda	UpPTS	
			CP Normal	CP Extendido			CP Normal	CP Extendido
0	3	10	1	1	3	8	1	1
1	9	4			8	3		
2	10	3			9	2		
3	11	2			10	1		
4	12	1	2	2	3	7	2	2
5	3	9			8	2		
6	9	3			9	1		
7	10	2			-	-	-	-
8	11	1			-	-	-	-

Tabla 1.6. Configuraciones de subtramas especiales. [13]



Tanto en FDD como en TDD, la asignación de recursos en el dominio del tiempo se realiza cada TTI (Transmission Time Interval) de 1ms y en el dominio de la frecuencia en términos de número de RBs. Un ejemplo de esto se observa en la Figura 1.17.

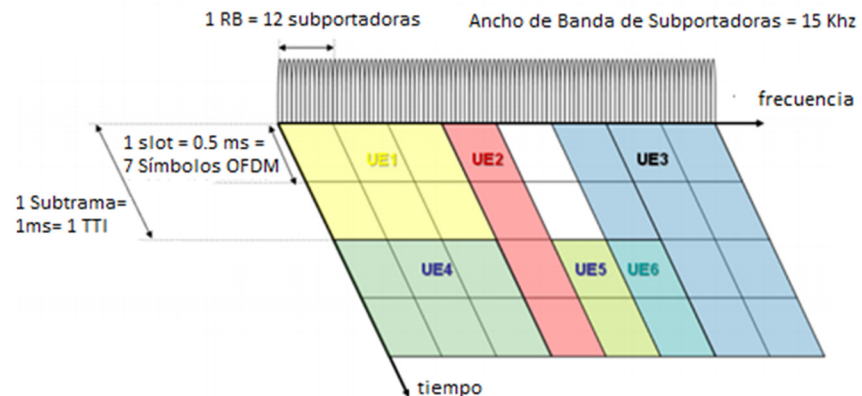


Figura 1.17. Asignación de recursos en tiempo y frecuencia para distintos usuarios. [13]

42

Las decisiones de programación de recursos las realiza el eNodeB de acuerdo a mediciones de calidad de enlace y requerimientos de prioridad y calidad de servicio.

1.6.2. Diseño de Capa Física para Enlace Ascendente

La estructura de tramas para enlace ascendente es similar a la de enlace descendente, en [13]. Cada trama de 10 ms se divide en 10 subtramas, y éstas se subdividen en 2 slots de 0.5ms. Cada slot contiene 7 símbolos SC-FDMA en caso de CP normal y 6 símbolos SC-FDMA en caso de CP extendido. El cuarto símbolo SC-FDMA de cada slot lleva una señal de referencia de demodulación que requiere la radio base eNodeB para estimación de canal y demodulación coherente.

La asignación de recursos en el dominio de la frecuencia se realiza en función de Resource Blocks, grupos de 12 subportadoras cuya separación es también de 15kHz, se asigna únicamente ciertos múltiplos de RBs a cada usuario para simplificar el procesamiento de la señal en el bloque de la transformada de Fourier.

Los múltiplos que pueden ser asignados a un equipo de usuario se indican en la Tabla 1.7.

MÚLTIPLOS DE RB PARA ASIGNACIÓN A USUARIOS									
1	2	3	4	5	6	8	9	10	12
15	16	18	20	24	25	27	30	32	36
40	45	48	50	54	60	64	72	75	80
81	90	96	100						

Tabla 1.7. Múltiplos de Resource Blocks. [13]



En enlace ascendente la cobertura se limita por la potencia de transmisión del móvil, por lo que ciertos paquetes se segmentan y transmiten en varias subtramas para tener una tasa de error aceptable, sin embargo, esto representa mayor señalización y sobrecarga en las cabeceras, lo que se traduce en menores velocidades de transmisión de datos.

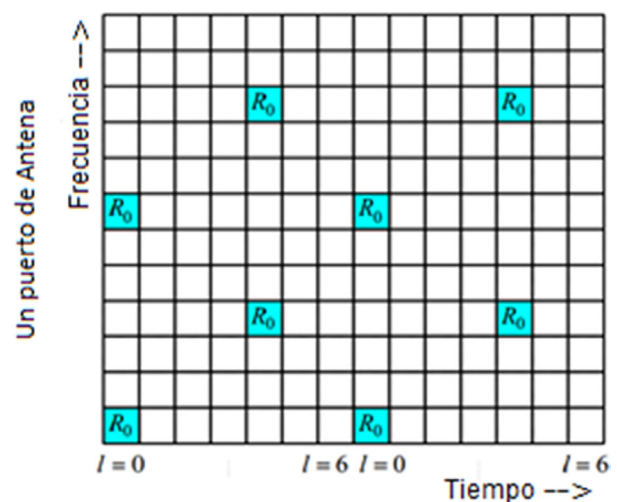
1.6.3. Señales de Referencia

Las señales de referencia de capa física transmitidas en enlace descendente son indispensables para búsqueda e identificación de celdas por parte de los móviles, así como para estimación de canal, sincronización inicial y demodulación coherente, en [13].

El mapeo de las señales de referencia en el dominio del tiempo y de la frecuencia sobre REs (Resource Elements) posee la siguiente estructura:

- En el dominio de la frecuencia se transmite una secuencia de la señal de referencia cada seis subportadoras, lo que se observa en la Figura 1.18.
- En el dominio del tiempo se transmite cada cuatro símbolos OFDM.

43



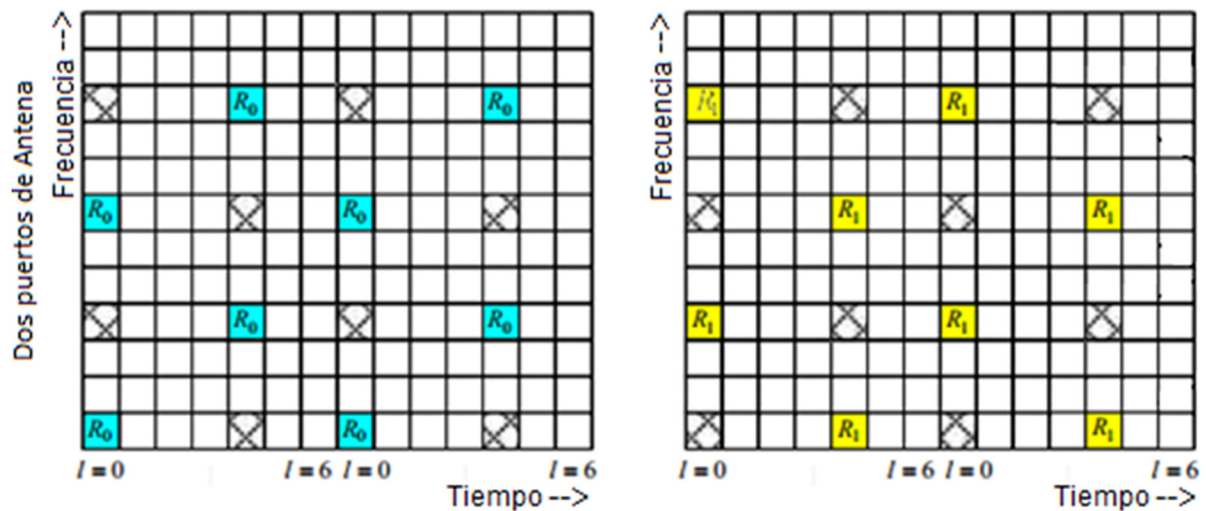


Figura 1.19. Estructura de Señales de Referencia caso 2x2 MIMO.[13]

La búsqueda de celda en LTE se basa en un esquema jerárquico, a través de dos señales de sincronización una primaria (PSS) y una secundaria (SSS).

La señal de sincronización secundaria se conforma de un número N_1 de 0 a 167 que se denomina identificador de grupo de celda.

Y la señal de sincronización primaria se conforma de un número N_2 de 0 a 2 que representa el identificador de celda.

Estos dos valores sumados a través de la fórmula [12]:

$$N_{ID} = 3N_1 + N_2 \quad \text{Eq. (1.1)}$$

Constituyen 504 identificadores únicos de celda PCI (Physical Cell ID), requeridos para el proceso de búsqueda de celda mencionado.

1.6.4. Canales de Físicos

Un canal físico se compone de recursos en tiempo y frecuencia para transportar información hacia el usuario. Se distinguen 2 tipos de canales a partir del tipo de información que transmiten, los de tráfico que transportan datos de usuario y los de control. En LTE no existen canales de tráfico dedicados, es decir, no se asignan recursos para transmisión de datos de un único usuario.

La codificación del canal y la modulación utilizada dependen del tipo de canal físico.

A continuación se describen canales de enlace descendente y ascendente: [11]



- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** Canal de tráfico de enlace descendente, que transmite datos de usuario, información de paging y datos de conexión a la red no fundamentales. Utiliza los esquemas de modulación: QPSK, 16 QAM o 64 QAM y una tasa de codificación de 1/3.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** Canal de control de enlace descendente que transmite información sobre los recursos asignados al canal PDSCH. Modulación: QPSK.
- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** Canal de tráfico de enlace ascendente para transmitir información de usuario. Soporta los esquemas de modulación QPSK, 16 QAM y 64 QAM, y una tasa de codificación de 1/3.
- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** Canal de control de enlace ascendente que transporta peticiones de asignación de recursos, notificaciones de retransmisión (ACK/NACK) e información de la calidad del canal para la optimización de recursos en enlace descendente. Modulación: QPSK.

1.7. CÁLCULO DE RENDIMIENTO (THROUGHPUT).

La velocidad máxima de transmisión de datos de un eNodeB en LTE varía de acuerdo al ancho de banda disponible, el tipo de modulación utilizado y el número de antenas. Se toma en cuenta el modo de transmisión, por ejemplo, en FDD se tiene 20MHz para enlace descendente y 20 MHz para enlace ascendente, espectro par. En cambio en TDD el ancho de banda, en este caso 20 MHz, se comparte para enlace descendente y ascendente.

Como se mencionó anteriormente, los tipos de modulación que LTE soporta para enlace descendente son QPSK, 16QAM y 64 QAM, y para enlace ascendente QPSK, 16QAM y 64 QAM (opcional). La capacidad de bits por símbolo de cada modulación se indica en la Tabla 1.8.



Modulación	Codificación	Bits/símbolo
QPSK	1/8	0,25
QPSK	1/5	0,4
QPSK	1/4	0,5
QPSK	1/3	0,66
QPSK	1/2	1
QPSK	2/3	1,33
QPSK	4/5	1,60
16QAM	1/2	2,00
16QAM	2/3	2,66
16QAM	4/5	3,20
64QAM	2/3	4,00
64QAM	3/4	4,50
64QAM	4/5	4,80

Tabla 1.8. Capacidad de Bits por símbolo. [2]

46

La tasa de codificación indicada es una medida de eficiencia, y representa el porcentaje de bits de información que se transmiten del total de bits por símbolo del esquema de modulación. Los bits restantes son de redundancia. Por ejemplo, en modulación 64QAM se tiene 6 bits por símbolo y si se considera una tasa de codificación de $2/3$, significa que 4 bits son de información y 2 bits son de redundancia.

1.7.1. Máxima Capacidad de Celda

En LTE la máxima velocidad de transmisión de datos en enlace descendente es teóricamente 300Mbps y en enlace ascendente 75Mbps. La demostración que se presenta a continuación se basa en [32], que calcula la capacidad máxima en Mbps de un eNodeB.

Se considera los siguientes parámetros:

- Ancho de Banda máximo: 20MHz
- Técnica MIMO 4x4
- Categoría de equipo de usuario: 5
- Tipo de modulación: 64QAM 1/1



A partir de un ancho de banda de 20MHz se puede calcular el número de RB disponibles. Primero se desprecia el 10% de banda de guarda, es decir, solo se tiene 18MHz utilizables y luego se divide este valor para 180kHz que es el ancho de banda de un RB (12 subportadoras * 15kHz), con lo que se obtiene un total de 100 RB, valor que coincide con el indicado en la Tabla 1.2.

Con prefijo cíclico normal, cada RB se compone de 12 subportadoras y 7 símbolos/portadora en un tiempo de 0.5ms, por lo tanto, en 1ms se obtiene:

$$12 \cdot 7 \cdot 2 = 168 \text{ símbolos} \quad \text{Eq. (1.2)}$$

Multiplicando este valor por el total de RB disponibles, se calcula:

$$100 \text{ RB} \cdot 168 \text{ símbolos} = 16800 \text{ símbolos/ms} = 16.8 \text{ Msps} \quad \text{Eq. (1.3)}$$

Si se considera una modulación de 64QAM 1/1 se tiene 6 bits por símbolo, por lo que la velocidad calculada en bits por segundo es igual a:

$$16.8 \text{ Msps} \cdot 6 = 100.8 \text{ Mbps} \quad \text{Eq. (1.4)}$$

Con 4x4 MIMO en enlace descendente, que es soportado por un equipo de usuario categoría 5, la velocidad calculada se multiplica por 4:

$$100.8 \text{ Mbps} \cdot 4 = 403.2 \text{ Mbps.} \quad \text{Eq. (1.5)}$$

De acuerdo a [41], los porcentajes de carga por cabeceras que representan datos de señalización y control, son los presentados en la Tabla 1.9, para cada valor de ancho de banda.

Ancho de Banda	1.4	3	5	10	15	20
Porcentaje de carga por cabeceras (%)	34	30	30	30	29	29
Enlace Descendente						
Porcentaje de carga por cabeceras (%)	36	26	24	23	22	22
Enlace Ascendente						

Tabla 1.9. Porcentaje de carga por cabeceras en función de ancho de banda. [41]

Por lo tanto, al total de bits/segundo calculado en Eq. 1.5, se disminuye una carga de 29% por señalización y control, que resulta en un total de tráfico de datos máximo para enlace descendente de:



$$403.2 \text{ Mbps} * 0.71 = 286.3 \text{ Mbps} \approx 300 \text{ Mbps} \quad \text{Eq. (1.6)}$$

En enlace ascendente no se emplea la técnica MIMO, por lo tanto a la velocidad de 100.8 Mbps calculada en Eq. 1.4, se disminuye un porcentaje de 24% por sobrecarga de cabeceras, obteniéndose:

$$100.8 \text{ Mbps} * 0.76 = 76.6 \text{ Mbps} \approx 75 \text{ Mbps} \quad \text{Eq. (1.7)}$$

Es decir, de acuerdo a los resultados obtenidos se demuestra las máximas velocidades teóricas soportadas por LTE, expuestas en el apartado 1.1. Para finalizar, en función del cómputo realizado se genera la Tabla 1.10, que calcula las máximas velocidades soportadas por una celda, en función de distintos anchos de banda y distintos tipos de modulación y codificación. Se considera los esquemas multi-antena 2x2 y 4x4.

MODULACIÓN	CODIFICACIÓN	BITS/SÍMBOLO	Ancho de Banda / # RB							
			5MHz / 25		10MHz / 50		15MHz / 75		20MHz / 100	
			2X2	4X4	2X2	4X4	2X2	4X4	2X2	4X4
QPSK	1/8	0,25	1,47	2,94	2,94	5,88	4,47	8,95	5,96	11,93
QPSK	1/5	0,4	2,35	4,70	4,70	9,41	7,16	14,31	9,54	19,08
QPSK	1/4	0,5	2,94	5,88	5,88	11,76	8,95	17,89	11,93	23,86
QPSK	1/3	0,66	3,88	7,76	7,76	15,52	11,81	23,62	15,74	31,49
QPSK	1/2	1	5,88	11,76	11,76	23,52	17,89	35,78	23,86	47,71
QPSK	2/3	1,33	7,82	15,64	15,64	31,28	23,80	47,59	31,73	63,46
QPSK	4/5	1,60	9,41	18,82	18,82	37,63	28,63	57,25	38,17	76,34
16 QAM	1/2	2,00	11,76	23,52	23,52	47,04	35,78	71,57	47,71	95,42
16 QAM	2/3	2,66	15,64	31,28	31,28	62,56	47,59	95,19	63,46	126,91
16 QAM	4/5	3,20	18,82	37,63	37,63	75,26	57,25	114,51	76,34	152,68
64 QAM	2/3	4,00	23,52	47,04	47,04	94,08	71,57	143,14	95,42	190,85
64 QAM	3/4	4,50	26,46	52,92	52,92	105,84	80,51	161,03	107,35	214,70
64 QAM	4/5	4,80	28,22	56,45	56,45	112,90	85,88	171,76	114,51	229,02

Tabla 1.10. Velocidades Máximas de Celda en enlace descendente.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS REGULATORIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES LONG TERM EVOLUTION (LTE)

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta diferentes aspectos regulatorios que intervienen en el proceso de implementación de sistemas IMT (International Mobile Telecommunications), a los cuales pertenecen las redes LTE.

Las telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico son sectores estratégicos de alta influencia en los campos económico, político y social en el país. El espectro es un recurso natural de propiedad exclusiva del Estado, que permite el desarrollo tecnológico de las telecomunicaciones.

Inicialmente se analiza las resoluciones respecto a asignación de espectro electromagnético para sistemas IMT y las bandas de frecuencias concedidas para cada operadora concesionaria en el Ecuador y su segmentación, dispuestas por parte de la CONATEL (Consejo Nacional de Telecomunicaciones).

Cabe mencionar que la estructura de las entidades de regulación de las telecomunicaciones en Ecuador varía a partir de la aprobación de la nueva Ley Orgánica de Telecomunicaciones, vigente desde febrero del presente año. Donde los organismos encargados de la administración, regulación y control de las telecomunicaciones: CONATEL (Consejo Nacional de Telecomunicaciones), SENATEL (Secretaría Nacional de Telecomunicaciones) y SUPERTEL (Superintendencia de Telecomunicaciones) se fusionaron en una sola entidad denominada ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones). Las resoluciones analizadas en este capítulo fueron emitidas por el CONATEL, por lo que la referencia se mantiene a esta entidad.

Por otro lado, al considerarse el despliegue de este tipo de red en el centro histórico de la ciudad de Cuenca y las dificultades que se presentan a las operadoras para la instalación de nuevas estructuras de radiobases, se analiza la ordenanza municipal que regula la implantación de estaciones radioeléctricas fijas de servicios de radiocomunicaciones fijo y móvil terrestre en el cantón y el reglamento emitido por el CONATEL de acceso y uso compartido de telecomunicaciones.



2.1. BANDAS DE FRECUENCIAS ASIGNADAS PARA SISTEMAS IMT EN ECUADOR

Bajo la recomendación ITU-R M.1036-4 [27], la organización internacional UIT, que define y recomienda el uso eficiente del espectro electromagnético mundialmente, identifica las siguientes bandas de frecuencia, Tabla 2.1, para la implementación de sistemas de telecomunicaciones móviles como las redes LTE, y presenta distintas segmentaciones de las mismas tanto para transmisión como para recepción.

Banda (MHz)
450-470
698-960
1710-2025
2110-2200
2300-2400
2500-2690
3400-3600

Tabla 2.1. Bandas de Frecuencia para sistemas IMT. [27]

El uso común de estas bandas a nivel mundial garantiza una disminución de costos de implementación de red y de los terminales móviles, así como la interoperabilidad entre países.

Las telecomunicaciones y el espectro radioeléctrico son sectores estratégicos de alta influencia en los campos económico, político y social en nuestro país. El espectro es un recurso natural de propiedad exclusiva del Estado, y es el organismo ARCOTEL el encargado de concesionar las distintas bandas de frecuencias analizadas anteriormente a las operadoras solicitantes para la implementación de redes 4G, permitiendo el desarrollo tecnológico de las telecomunicaciones.

De acuerdo al Plan Nacional de Frecuencias [15], las bandas adoptadas por Ecuador para operación exclusiva de sistemas IMT, para los servicios Fijo y Móvil, son las indicadas en la Tabla 2.2.

Bandas MHz
698 – 806
824 – 849
1710 – 2025
2110 – 2200
2500 – 2690

Tabla 2.2. Frecuencias para el despliegue de sistemas IMT en el Ecuador. [15]



Considerando que en los rangos 698-806MHz y 2500-2690MHz operaban sistemas de televisión codificada terrestre, el CONATEL resolvió realizar un cambio de atribución de bandas de frecuencias mediante resolución RTV-390-15-CONATEL-2012 [16], por lo que se modificó las notas EQA del plan nacional de frecuencias donde se establece que:

“En las bandas 698-806 MHz, 824-849 MHz, 869-894 MHz, 1710-2025 MHz, 2110-2200 MHz y 2500-2690 MHz, operan exclusivamente sistemas IMT (International Mobile Telecommunications) para los servicios FIJO y MOVIL. Los sistemas de audio y video por suscripción bajo la modalidad de televisión codificada terrestre (UHF codificado y MMDS) concesionados en las bandas 698-806 MHz y 2500-2690 MHz respectivamente, podrán continuar su operación hasta la vigencia de su contrato de concesión.” [16]

Es decir, en el Ecuador se demandó liberación de bandas de frecuencia para permitir la incorporación de nuevos servicios de telecomunicaciones en el país.

A continuación se detallan tres bandas de frecuencias adoptadas para la implementación de servicios móviles avanzados [18, 19] y las segmentaciones elegidas de acuerdo a lo establecido por la organización UIT bajo la norma ITU-R M.1036-4 [27].

53

2.1.1. BANDA 700 MHz

La segmentación de la banda de frecuencias 698-960MHz, se presenta en la Tabla 2.3.

Disposición de Frecuencias	Disposiciones Pares				Disposiciones no Pares (TDD) (MHz)
	Transmisor Móvil (MHz)	Guarda Central (MHz)	Transmisor Estación Base (MHz)	Separación Duplex (MHz)	
B1	1920-1980	130	2110-2170	190	1880-1920 2010-2025
B2	1710-1785	20	1805-1880	95	--
B3	1850-1910	20	1930-1990	80	1910-1930
B4 (armoniza con B1 and B2)	1710-1785	20	1805-1880	95	1880-1920
	1920-1980	130	2110-2170	190	2010-2025
B5 (armoniza con B3 y parte de B1 y B2)	1850-1910	20	1930-1990	80	1910-1930
	1710-1770	340	2110-2170	400	

Tabla 2.3. Disposición de frecuencias en la banda 698-960MHz. [27]



Esta banda de frecuencias más bajas ofrece amplia cobertura, favorece su uso en zonas rurales cubriendo grandes áreas con una cantidad reducida de usuarios, lo que disminuye costos de implementación.

El CONATEL adoptó el esquema A5 para operación en modo FDD [18], este esquema se divide en dos segmentos de 45MHz: la banda 703-748MHz, para transmisión de enlace ascendente, y la banda 758-803MHz para transmisión de enlace descendente.

En la Figura 2.1 que pertenece al esquema A5, se observa bandas de guarda en los extremos, de 3MHz en el borde superior y de 5MHz en el borde inferior, para evitar interferencia con los servicios de las bandas adyacentes. Además, una banda de guarda central de 10MHz para atenuar la interferencia entre las transmisiones ascendente y descendente.

700 MHz

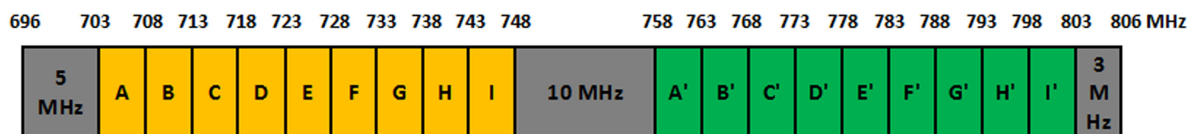


Figura 2.1. Esquema A5 de la banda 698-960MHz [18]

2.1.2. BANDA 1700/2100 MHz

La disposición de la banda de frecuencias 1700-2100MHz se presenta en la Tabla 2.4.

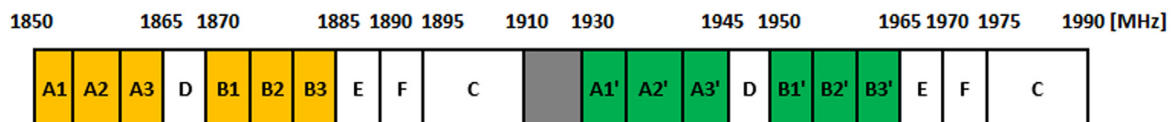
Disposición de Frecuencias	Disposiciones Pares				Disposiciones no Pares (TDD) (MHz)
	Transmisor Móvil (MHz)	Guarda Central (MHz)	Transmisor Estación Base (MHz)	Separación Duplex (MHz)	
B1	1920-1980	130	2110-2170	190	1880-1920 2010-2025
B2	1710-1785	20	1805-1880	95	--
B3	1850-1910	20	1930-1990	80	1910-1930
B4 (armoniza con B1 and B2)	1710-1785	20	1805-1880	95	1880-1920
	1920-1980	130	2110-2170	190	2010-2025
B5 (armoniza con B3 y parte de B1 y B2)	1850-1910	20	1930-1990	80	1910-1930
	1710-1770	340	2110-2170	400	

Tabla 2.4. Disposición de frecuencias en la banda 1700-2100MHz. [27]

El CONATEL adoptó el esquema B5 [18], Figura 2.2, este esquema de operación en modo FDD, comprende de un segmento para transmisión en enlace ascendente (1710-1770MHz) y otro para transmisión en enlace descendente (2110-2170 MHz), de una banda de guarda central de 340MHz y una separación dúplex de 400MHz.

1710	1720	1730	1740	1750	1760	1770	2110	2120	2130	2140	2150	2160	2170 [MHz]											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L		A'	B'	C'	D'	E'	F'	G'	H'	I'	J'	K'	L'
1715	1725	1735	1745	1755	1765								2115	2125	2135	2145	2155	2165						

Para el esquema B3 (Banda 1900 MHz) se definió la siguiente canalización: A(1850-1865 MHz)-A'(1930-1945 MHz) y B(1870-1885 MHz)-B'(1950-1965 MHz) para otorgamiento de espectro adicional a la operadoras concesionarias. [19]



Cada bloque se conforma de 30MHz, 15MHz para enlace ascendente y 15MHz para enlace descendente, con una separación dúplex de 80MHz.

La banda de 2.5 GHz, complementa la banda de 1700-2100MHz para la prestación de servicios en zonas urbanas y suburbanas, ya que debido a sus características de propagación y el ancho de banda disponible (190MHz) ofrece mayor velocidad de transmisión de datos para pequeñas zonas de cobertura en comparación a las bandas menores a 1GHz.

DANIELA BARRERA SALAMEA



Disposición de Frecuencias	Disposiciones Pares					Disposiciones no Pares (TDD) (MHz)
	Transmisor Móvil (MHz)	Guarda Central (MHz)	Transmisor Estación Base (MHz)	Separación Duplex (MHz)	Transmisor Móvil (MHz)	
C1	2500-2570	50	2620-2690	120	TDD	2570-2620 TDD
C2	2500-2570	50	2620-2690	120	FDD	2570-2620 FDD DL externa
C3	Flexible FDD/TDD					

Tabla 2.5. Disposición de frecuencias en la banda 2.5GHz. [27]

Para esta banda en Ecuador se adoptó la segmentación C1 [18], presente en la Figura 2.4.

2.5 GHz

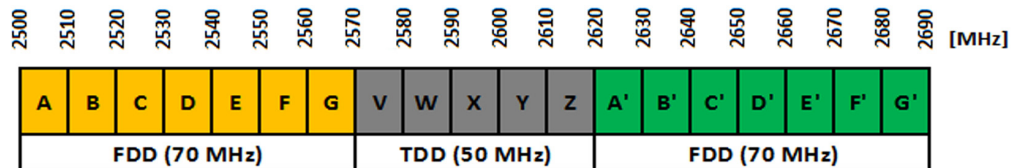


Figura 2.4. Esquema C1 de la banda 2.5GHz. [18]

Este esquema divide la banda en tres segmentos y permite la operación en los dos modos FDD y TDD:

- El segmento inferior entre 2500-2570 MHz, comprende 70MHz para transmisión en enlace ascendente.
- El segmento central comprende 50 MHz (2570-2620 MHz) para transmisión en modo TDD.
- El segmento superior entre 2620-2690 MHz, comprende 70MHz para transmisión en enlace descendente.

2.2. ESPECTRO OTORGADO A LAS OPERADORES MÓVILES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LTE EN ECUADOR

En Ecuador operan tres empresas telefónicas, cuyos porcentajes de penetración en el mercado publicados por la ARCOTEL, son:



- **CONECEL**, que opera bajo la marca Claro, con 68.7% de penetración de mercado.
- **OTECCEL**, propiedad de Telefónica y que opera bajo la marca Movistar, con 28.5% de penetración de mercado.
- **Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT)**, empresa pública con 3.6% de penetración de mercado.

Las bandas de espectro radioeléctrico concesionado a las distintas operadoras para la implementación de LTE se resumen a continuación.

2.2.1. Frecuencias asignadas a la Corporación Nacional de Telecomunicaciones Empresa Pública (CNT E.P.)

De acuerdo a la autorización de espectro radioeléctrico otorgada a la empresa pública CNT E.P:

57

“La asignación de frecuencias para la Empresa Pública se realizará en forma directa y preferente, esto es, sin procedimiento público competitivo, en base a principios de disponibilidad, eficiencia y celeridad (...)” [18]

Así en 2011, CNT EP presentó a la SENATEL una petición de asignación directa de la banda 700 MHz, solicitando se le autorice 20+20 MHz para la prestación de la tecnología LTE. Luego de un intercambio de información técnica del servicio a brindar, el CONATEL en diciembre de 2012, autorizó a la empresa CNT EP en las bandas de 700MHz y AWS 1700-2100MHz [18], de acuerdo al siguiente esquema:

En la banda 700 MHz se autoriza un total de 30 MHz (15+15 MHz), específicamente los bloques G-G', H-H' e I-I' de la Figura 2.1, es decir, los rangos 733-748 MHz para transmisión en enlace ascendente y 788-803 MHz para transmisión en enlace descendente.

Para la banda 1700-2100 MHz se asigna los bloques A-A', B-B', C-C' y D-D' de la Figura 2.2, es decir, un total de 40 MHz (20+20 MHz) en los rangos 1710-1730 MHz para enlace ascendente y 2110-2130 MHz para enlace descendente.

Hasta el mes de enero del 2015, CNT E.P fue el único operador con asignación de espectro para la implementación de LTE, iniciando la comercialización de su red 4G en noviembre del 2013 en las principales ciudades del país.



2.2.2. Frecuencias asignadas al Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones S.A - CONECEL

A partir de los estudios técnicos y económicos realizados por la SENATEL, a través de consultorías, para la asignación de frecuencias atribuidas para IMT y los mecanismos para su concesión y proceso de subasta, en respuesta a insistentes solicitudes de otorgamiento de frecuencias esenciales adicionales por parte de la operadora desde el año 2010, el CONATEL confiere la concesión de 60MHz el 2 de febrero del 2015. [20]

Se otorga en la banda de 1900MHz: 10MHz correspondientes al bloque B3(1880-1885 MHz)-B3'(1960-1965 MHz) y 10MHz pertenecientes al bloque F(1890-1895MHz)-F'(1970-1975MHz), canalización que se observa en la Figura 2.3.

Y de la banda 1700-2100MHz, se otorga un total de 40MHz, en los rangos 1730-1750 MHz para enlace ascendente y 2130-2150 MHz para enlace descendente, correspondientes a los bloques E-E', F-F', G-G' y H-H' de la Figura 2.2.

58

La disponibilidad de espectro en la banda 1900 requirió la devolución del bloque F-F' por parte de la operadora pública CNT EP.

2.2.3. Frecuencias asignadas a OTECEL S.A

La operadora OTECEL S.A es considerada bajo condiciones equitativas en el proceso para asignación de bandas de espectro radioeléctrico adicional junto con el Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones CONECEL.

A través de la resolución TEL-138-04-CONATEL-2015 [20], a esta operadora se concesiona 50MHz, distribuidos de la siguiente manera:

- Los rangos de frecuencia 1850-1865MHz para enlace ascendente y 1930-1935MHz para enlace descendente, correspondientes a los bloques A1-A1', A2-A2' y A3-A3' de la banda 1900MHz, Figura 2.3.
- Y los bloques B1-B1' y B2-B2' de la misma banda, es decir, las frecuencias 1870-1880MHz y 1950-1960MHz para enlace ascendente y descendente respectivamente.



2.3. ORDENANZA MUNICIPAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE ESTACIONES RADIOELÉCTRICAS FIJAS EN CUENCA

El despliegue de redes móviles en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, área declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO, requiere tomar en cuenta aspectos urbanísticos, paisajísticos y ambientales para la ubicación de estaciones base por parte de las operadoras.

Las mismas que con los objetivos de: satisfacer las necesidades de su creciente número de usuarios, brindar un alta calidad de servicio, mantener su competitividad entre operadoras y continuar a la par con los avances tecnológicos mundiales en redes móviles requieren la instalación de un mayor número de estaciones base así como modificar los diseños con los que cuentan en la actualidad.

Por esta razón, la implementación de una red LTE debe cumplir los requerimientos establecidos por el Consejo Cantonal de Cuenca en la “Ordenanza que regula la implantación de estaciones radioeléctricas fijas de los servicios de radiocomunicaciones fijo y móvil terrestre en el cantón Cuenca”.

Las principales condiciones de implantación se resumen a continuación: [21]

59

- En el centro histórico la infraestructura, elementos y equipos a ser instalados deben estar a la par con los avances tecnológicos de manera que permitan mimetizar y armonizar con las edificaciones y entorno en general, reduciendo al mínimo el impacto visual. Se requiere previamente informes de la Comisión de Centro Histórico y la Comisión de Gestión Ambiental (CGA).
- En edificios o predios inventariados, declarados o por declararse como monumentos históricos se prohíbe la instalación de estaciones radioeléctricas, así como en inmuebles donde funcionen establecimientos educacionales, centros de salud y cualquier otro establecimiento de permanente concentración de personas.
- El área de instalación de infraestructura no debe superar el valor de 12 metros cuadrados, salvo situaciones técnicas justificadas.
- Las estructuras de estaciones fijas pueden tener una altura de hasta 42 metros en predios no construidos.
- Sobre construcciones de hasta 36 metros, pueden colocarse estructuras que armonicen con el inmueble y que en total no superen 42 metros de altura.
- En construcciones mayores a 36 metros, las estructuras a colocarse no pueden superar una altura de 6 metros.



- Se permite la instalación de pequeñas antenas, previa autorización del propietario y autoridad municipal, sobre báculos de alumbrado público, columnas informativas, quioscos o cualquier otro elemento del mobiliario urbano, siempre que se adapte y armonice con el paisaje.
- No se puede incrementar o modificar instalaciones, cuando el total de emisión de radiaciones no ionizantes sea igual o supere los límites.

Para obtener el permiso de implantación otorgado por la Dirección de Control Municipal, que es individual por cada estación radioeléctrica fija o de base, de duración cinco años con carácter renovable, se requiere: [21]

- Título habilitante, autorización del uso de frecuencia y/o registro de la estación.
- Detalle de las instalaciones, características generales y de mimetización de la estación radioeléctrica a instalarse.
- Estudio de Impacto Ambiental aprobado por la Comisión de Gestión Ambiental.
- Informe técnico emitido por un ingeniero civil sobre estructuras de soporte y posibles daños a las estructuras de las edificaciones sobre las que se instalarán.
- Informe favorable de la Comisión de Centro Histórico.
- Póliza de seguros de responsabilidad civil contra terceros para garantizar cualquier siniestro que pueda ocurrir por las instalaciones y que pueda afectar a personas, bienes públicos o privados.

Por otro lado, la preocupación de la ciudadanía por los efectos a la salud causados por la exposición a los campos electromagnéticos emitidos por las estaciones base ubicadas en zonas cercanas a sus hogares genera malestar entre la gente, que muchas veces impide por completo la instalación de estructuras y equipos por parte de las operadoras.



La Organización Mundial de la Salud (OMS) a través del Proyecto “International EMF”, que realiza estudios sobre los efectos de los Campos Electromagnéticos (CEM) a la salud, no ha obtenido datos comprobados de afectación a las personas hasta este momento, sin embargo, de manera preventiva muchos países y en el Ecuador, se ha expedido el “Reglamento de Protección de Emisiones de Radiación no Ionizante Generadas por Uso de Frecuencias del Espectro Radioeléctrico” en busca de preservar y precautelar la salud y seguridad de la población.

Por estas razones, de acuerdo a la ordenanza municipal en estudio, es indispensable para las operadoras presentar el informe Técnico de Inspección de Emisiones de Radiación no Ionizante emitido por la ARCOTEL previo a obtener los permisos necesarios de instalación.

Las operadoras deben difundir al vecindario involucrado, los resultados del informe mencionado junto con los resultados del informe favorable de Estudio de Impacto Ambiental (EIA) emitido por la Comisión de Gestión Ambiental (CGA).

Se menciona también que la Municipalidad de Cuenca puede obligar a compartir una misma estructura en función de aspectos urbanísticos, medioambientales o paisajistas, por lo que en la siguiente sección se estudia el Reglamento de acceso y uso compartido de telecomunicaciones emitido por el CONATEL en el 2012.

2.4. REGLAMENTO DE ACCESO Y USO COMPARTIDO DE TELECOMUNICACIONES

El uso compartido de infraestructura se plantea como solución a: [16]

- Intereses urbanísticos y de paisaje, para reducir el impacto visual en el entorno urbano.
- Aumentar la accesibilidad y mejorar la calidad del servicio de telecomunicaciones.
- Fomentar la competencia, así como facilitar el ingreso de nuevos actores en el mercado de las telecomunicaciones para un despliegue más rápido de una nueva red.

En el reglamento de acceso y uso compartido [16] se establecen parámetros, presentados a continuación, para garantizar los derechos de las partes en negociación fomentando la sana y leal competencia en la prestación de servicios de telecomunicaciones.



- Todo operador con título habilitante tiene derecho a solicitar el acceso y uso compartido de infraestructura física, demostrando razones técnicas, económicas, legales, urbanísticas, limitaciones constructivas, medio ambientales, etc., y garantizando cumplir las normas de operación, de seguridad y ambientales establecidas para el propietario, así como no causar daños al inmueble ni perjuicios a los servicios prestados a través de la estructura.
- No se considera infraestructura física para compartición: a la red de acceso, de transporte, u otros elementos susceptibles de tráfico.
- El acceso y uso compartido entre las partes requiere que se establezca un acuerdo, que debe contener principios de igualdad y transparencia, retribución económica, periodo de acceso y estudio de disponibilidad. La retribución económica debe sujetarse a aspectos de inversión, costos de mantenimiento, descuentos, etc., establecido por las partes involucradas o por el ARCOTEL en caso de desacuerdo. El periodo de acceso que se establece cuando las partes no lo definen no supera los 2 años.
- En caso de que no exista dicho acuerdo en un plazo de 30 días hábiles, el operador (parte interesada) puede solicitar que se declare como infraestructura de compartición obligatoria y su cumplimiento es controlado por la ARCOTEL.
- El acceso compartido puede ser negado cuando se demuestren aspectos técnicos, limitaciones físicas de la estructura, ambientales, de seguridad o se argumenten razones de dimensionamiento por planes de futuro crecimiento de red. Así como cuando no se justifique la necesidad de uso compartido.

En el centro histórico de Cuenca que posee valor patrimonial, a pesar de que se cumplan los requerimientos establecidos en el apartado 2.3, se debe evitar la instalación de nuevas estructuras que afecten el impacto visual de la zona, por lo tanto es fundamental que las operadoras consideren los aspectos señalados para el acceso a infraestructura compartida para la modificación de su diseño de red.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN



INTRODUCCIÓN

Múltiples paquetes de software para planificación y optimización de redes móviles se encuentran disponibles en el mercado, los cuales permiten a empresas de telecomunicaciones, vendedores de equipos, entidades de control de espectro radioeléctrico, etc., diseñar y analizar sobre cartografía digital redes de radiocomunicación basadas en distintas tecnologías, simulando de la manera más aproximada el comportamiento real de la red inalámbrica.

A continuación se analiza las características técnicas y de simulación de tres distintos paquetes de software:

- ICS TELECOM, parte de las herramientas de planificación de la empresa ATDI (Advanced Topographic Development & Images).
- ATOLL, que pertenece a la compañía francesa de desarrollo de software Forsk.
- XIRIO, solución online para simulación de cobertura radioeléctrica de la empresa Aptica.

Estas herramientas de simulación presentan funciones similares respecto a diseño y planificación de redes, como: gestión del espectro radioeléctrico, integración y evaluación de múltiples tecnologías, dimensionamiento de red: cobertura y capacidad, y optimización de red.



3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

3.1.1. ICS TELECOM

Esta herramienta de radio planificación e ingeniería de espectro radioeléctrico permite la simulación de múltiples servicios como: televisión analógica y digital, radio, comunicaciones móviles 2G/3G/4G, WIFI, sistemas punto-punto y punto-multipunto, microondas, radar, etc.

En función de la resolución de la cartografía se puede realizar análisis de cobertura en 3D de redes de distintos tamaños y en diferentes ambientes urbano/rural, indoor/outdoor.

Este paquete de software cuenta con un módulo LTE, que permite configurar las características propias de la tecnología y realizar una predicción del comportamiento del diseño de red, incluyendo funciones como: asignación automática de frecuencias, análisis de interferencias, simulación de tráfico, optimización automática de estaciones base, entre otras. Se puede simular simultáneamente LTE junto a tecnologías anteriores 2G y 3G, para analizar la conducta de las redes en migración. [36]

66

ICS TELECOM es software propietario, pero cuenta con una versión DEMO gratuita que permite al usuario familiarizarse con el mismo, sin embargo presenta grandes limitaciones como el impedimento de utilizar cartografía digital propia. Se puede realizar simulaciones de los distintos servicios mencionados, sin embargo no cuenta con todas las prestaciones de la versión de pago.

Este simulador es utilizado a nivel mundial por fuerzas armadas, agencias gubernamentales, operadores móviles, incluyendo ARCOTEL en nuestro país.

Los requerimientos mínimos de hardware y software para ICS TELECOM son: [37]

- Memoria RAM: 2 GB o más.
- Almacenamiento: 100 GB
- Disco Duro: SSD 256 GB
- Procesador: Multinúcleo
- Tarjeta Gráfica: 512MB (1024*768)
- Sistema Operativo: Windows Vista, Windows 7, Windows 8.



3.1.2. ATOLL

La compañía Forsk desarrolla soluciones de software de radio planificación para la industria de las telecomunicaciones, lanzó la primera versión de ATOLL en 1997 integrando funciones para diseño de redes GSM. En la actualidad incluye las distintas tecnologías móviles: GSM/GPRS/EDGE/UMTS/HSDPA, junto con un módulo para LTE. [7]

Esta herramienta también ofrece características como asignación automática de frecuencias, modelamiento de tráfico, optimización automática de red y simulación simultánea de tecnologías móviles, funciones que permiten al usuario un dimensionamiento y diseño más preciso de la red. No se ha podido encontrar versiones de prueba gratuitas para el usuario.

Los requisitos mínimos de hardware y software incluyen: [6]

- Memoria RAM 512 MB
- Procesador: Pentium 4
- Sistema Operativo: Windows 2000/XP

3.1.3. XIRIO ONLINE

XIRIO es una herramienta online para simulación y planificación profesional de redes inalámbricas. Ofrece cálculos gratuitos de cobertura radioeléctrica utilizando distintas tecnologías a partir de cartografía de baja resolución (100m), sin embargo, estos resultados son limitados (baja calidad) y no pueden ser descargados por el usuario. La cartografía gratuita utilizada pertenece al proyecto SRTM de la NASA del año 2006. [40]

Xirio Online cuenta con una interfaz de usuario de sencillo manejo y valores de configuración predeterminados de acuerdo a la tecnología seleccionada, lo que facilita la simulación a realizarse.

Por otro lado, XIRIO no requiere de equipos de altas características para su instalación, ni cartografía propia. Ya que al realizar una simulación de pago, ésta se incluye, así como la posibilidad de almacenar resultados online y compartir con otros usuarios.



3.2. PARAMETROS DE SIMULACIÓN

A continuación se describen funciones y capacidades de las tres plataformas de simulación para destacar el potencial que estas ofrecen para el modelamiento de una red móvil LTE.

3.2.1. Cartografía Digital

Para la simulación de redes de radiocomunicación se requieren diferentes tipos de capas de cartografía [40] en función de la zona de servicio y de la precisión que se busque en los resultados.

- Capa MDT (Modelo Digital de Terreno): Describe la elevación del suelo sobre el nivel del mar. Esta capa es indispensable para realizar cualquier simulación.
- Capa de Edificios: Esta capa permite simulaciones más realistas, pues se establece alturas diferentes para una misma clase de clutter. Es decir, se asigna una altura específica a cada pixel del mapa en función de los edificios.
- Capa MDS: Esta capa unifica la elevación del suelo más la altura de los edificios en cada pixel del mapa. Ideal para estudio simultáneo de zonas urbanas y rurales.
- Capa de Clutter: Describe la ocupación o uso del terreno, asignándose un código a cada pixel del mapa. Cada código representa una clase de clutter y sus atributos como: altura media de la clase de terreno y pérdidas adicionales.
- Imagen: Mapa escaneado de la zona de simulación. Facilita la visualización de los resultados.

Para zonas rurales se requiere como mínimo la capa MDT (Modelo Digital del Terreno) de resolución entre 100 y 25 metros, y la capa de clutter para simular los efectos multitrayecto en las zonas pobladas. Para zonas urbanas se requiere cartografía de mucho más alta resolución, entre 1 y 2 metros, incluyendo la capa MDT y la capa de edificaciones.

Los paquetes de software de simulación analizados permiten importar distintas capas cartográficas de distintos formatos, como se indica en la Tabla 3.1.



CARTOGRAFÍA	ICS TELECOM			ATOLL			XIRIO	
		Formato			Formato			Formato
Capa MDT	X	.GEO	X		.TIF, .BIL, .BMP, .GRD	X		.GEOTIFF .KMZ
Capa MDS						X		.GEOTIFF
Capa de Edificios	X	.BLG	X		.TIF, .BIL, .BMP, .GRD	X		
Capa de Clutter	X	.SOL	X		.TIF, .BIL, .BMP, .GRC, .IST	X		
Imagen	X	.PAL	X		.TIF, .BIL, .BMP, .GRC, .IST, .JPEG	X		.PNG .JPEG
Capa de Población			X		.TIF, .BIL, .BMP, .IST, .GRD/GRC, .SHP, .TAB			

Tabla 3.1. Comparación de soporte cartográfico. [37, 7, 40]

3.2.2. Modelos de Propagación

Cada software ofrece al usuario distintos modelos de propagación recomendados internacionalmente para la estimación de potencia de recepción de las señales en el entorno en estudio. La elección de modelo depende de la zona (urbana/suburbana/rural/indoor) en la que se despliega la red, de las bandas de frecuencia y de la calidad de cartografía.

Se diferencian dos tipos de modelos de propagación: determinísticos y empíricos [34], la selección para utilizar uno u otro en la simulación depende principalmente de la resolución de cartografía disponible.

Modelos Determinísticos o Geométricos: Estos métodos requieren cartografía de alta resolución incluyendo la capa de edificaciones para observar los efectos multirayecto, ya que consideran el perfil del terreno entre transmisor y receptor para el cálculo de intensidad de campo, tomando en cuenta la curvatura de la Tierra. A las pérdidas de espacio libre se agrega las respectivas pérdidas por difracción y reflexión calculadas a partir de las estructuras presentes en el terreno.

Modelos Empíricos: Proveen una estimación de intensidad de campo para entornos y rangos de frecuencias específicos. Se trata de ecuaciones determinadas a partir de experimentación y mediciones en campo, que no requieren demasiada información



acerca del perfil del terreno. Su uso es adecuado cuando se dispone de cartografía de media resolución.

MODELOS DE PROPAGACIÓN	TIPO	CALIDAD DE CARTOGRAFÍA	ICS TELECOM	ATOLL	XIRIO
ITU-R P.525 /Bullington	Determinístico	Alta	X		
ITU-R P.525 / 526 Deygout 94	Determinístico	Alta	X	X	
ITU-R P.525	Determinístico	Alta	X		X
ITU-R P.1546	Semi-Empírico	Alta		X	X
ITU-R P.1411	Semi-Empírico	Alta			X
Okumura Hata	Empírico	Media	X	X	X
Hata-Cost 231	Empírico	Media	X	X	X
3GPP LTE Urbano/ Rural	Empírico	Media	X		
Longley-Rice	Empírico	Media		X	

Tabla 3.2. Comparación de soporte de Modelos de Propagación. [34, 7, 40]

Se puede personalizar el modelo de propagación, cuando se cuenta con información y mediciones específicas del ambiente estudiado para lograr cálculos de mayor precisión.

3.2.3. Técnicas MIMO

El uso de distintas configuraciones de antenas MIMO para mejorar la eficiencia de la red es un parámetro indispensable para la tecnología LTE.

Las configuraciones disponibles por software se presentan en la Tabla 3.3.

CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN	ICS TELECOM	ATOLL
SISO	No se utiliza técnicas MIMO	X	
SU-MIMO SD	Mejora el desempeño de un único usuario utilizando Diversidad de Transmisión	X	X
SU-MIMO SM	Mejora el desempeño de un único usuario utilizando Multiplexación Espacial.	X	X
MU-MIMO	Mejora el desempeño de múltiples usuarios utilizando Multiplexación Espacial.	X	X
ADAPTIVE	Permite cambiar entre multiplexación espacial a diversidad de transmisión en función de la calidad de la señal	X	X

Tabla 3.3. Comparación de soporte de Técnicas MIMO. [38, 11]



El software XIRIO permite la configuración de MIMO 2x2 y 4x2, pero no se especifica entre las técnicas de multiplexación y diversidad de transmisión.

3.2.4. Predicciones disponibles

Cada software dispone de un conjunto de predicciones para el análisis de nivel y calidad de cobertura de la señal. Para lo cual cada pixel del mapa se considera como un usuario que requiere cierto nivel mínimo de intensidad de potencia para conectarse a la red.

- Predicciones de nivel de señal de cobertura:

Estas predicciones se basan en el nivel de RSRP (Reference Signal Received Power) que representa el promedio de las contribuciones de potencia de los RE que transmiten señales de referencia. Es la medida más importante realizada por el móvil para tomar decisiones respecto a selección de celda y traspasos. [3]

Obtener el nivel RSRP permite determinar el área de servicio de las estaciones base eNodeB configurados en la red. El objetivo es determinar en cada pixel la mejor celda en enlace descendente y seleccionarla como celda de servicio.

71

PREDICCIONES	DESCRIPCIÓN	ICS TELECOM	ATOLL	XIRIO
Cobertura Compuesta	Calcula el nivel de cobertura de la señal de referencia RSRP, en cada pixel del mapa.	X	X	X
Cobertura de Mejor Servidor.	Indica para cada pixel el mejor servidor, es decir, el que proporciona el mayor nivel de intensidad de campo.	X	X	
Solapamiento	Se visualiza las zonas donde existe solapamiento de la señal RSRP de más de un servidor.	X	X	
Porcentaje Simultáneo	Indica el % de servidores que dan cobertura en cierto punto de la red.	X		
Probabilidad de Cobertura	Calcula la probabilidad de cobertura para cada píxel.	X		

Tabla 3.4. Comparación de soporte de Predicciones de Nivel de Señal. [38, 7, 40]

- Predicciones de calidad de señal de cobertura:

Las predicciones de calidad de señal dependen de la carga de la red configurada y las interferencias inter celulares calculadas. Es decir, se basan en los cálculos de la relación señal a interferencia más ruido.



La expresión de la relación señal a interferencia más ruido (SNIR) es la siguiente: [36]

$$SINR = \frac{S}{I_{own} + I_{oth} + N} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Donde:

- S: Potencia Recibida
- I_{own} : Interferencia de la propia celda (Cercana a 0 por ortogonalidad)
- I_{oth} : Interferencia Intra Celular

PREDICCIONES	DESCRIPCIÓN	ICS TELECOM	ATOLL	XIRIO
Mapa SNIR	Analiza los niveles de la relación portadora a interferencia más ruido para los canales de tráfico o control.	X	X	X
Mapeado SNIR a servicio	Indica el mejor servicio disponible en función del nivel SNIR.	X	X	
Mapeado de servicios (UL y DL)	Indica el mejor servicio disponible tanto en enlace ascendente como en descendente.		X	
Mapeado rendimiento	Calcula el rendimiento (throughput) basándose en el nivel SNIR.	X	X	X
Indicador de calidad.	Calcula indicadores de calidad (BLER, BER) en función del nivel SNIR.		X	

Tabla 3.5. Comparación de soporte de Predicciones de Calidad de Señal. [36, 8, 40]

3.3. ELECCIÓN DE SOFTWARE PARA SIMULACIÓN DE RED LTE

De acuerdo a las especificaciones analizadas en los apartados anteriores, ICS TELECOM y ATOLL constituyen plataformas de altas características para el diseño, modelamiento y optimización de una red LTE. Comparten modelos de propagación tanto determinísticos como empíricos, permiten la misma configuración de técnicas MIMO y poseen predicciones de nivel y calidad de señal similares que los hace aptos para el análisis a realizarse en la ciudad de Cuenca. Con la desventaja de que no son software libre.

XIRIO Online es un software de fácil manejo que a través de su cartografía gratuita permite una primera aproximación del comportamiento de la red generada, sin embargo, el alcance del estudio y la propia tecnología LTE requiere de cartografía de alta calidad para obtener resultados más reales, donde se considera la densidad de



edificaciones de la zona, por esta razón se descarta el uso del paquete XIRIO.

El software seleccionado para la predicción y análisis de la red LTE a simular es ICS TELECOM debido a condiciones fundamentales como disposición de la licencia para su instalación y de los archivos de cartografía compatibles y de alta resolución de la ciudad de Cuenca, los mismos que fueron facilitados por parte de la institución ARCOTEL.

3.4. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE ICS TELECOM

A continuación se describe la zona de despliegue de la red y los parámetros configurados de los equipos de transmisión y recepción para analizar posteriormente aspectos de cobertura, capacidad e interferencia.

De acuerdo a los objetivos del proyecto, la ubicación de las estaciones base eNo-deB se realiza en función de la infraestructura que posee en la actualidad una de las operadoras concesionadas del País. La institución ARCOTEL facilitó los datos de ubicación exacta de todas las radio bases situadas en Cuenca así como la operadora a la que pertenecen.

CNT fue seleccionada como base para el estudio de red, ya que al inicio de este proyecto era la única operadora con asignación de frecuencias para el despliegue de tecnología LTE en el Ecuador. Otro criterio de selección es la disponibilidad de información por parte de la empresa pública, lo que permite una configuración de red cercana a la realidad de la ciudad de Cuenca.

3.4.1. Escenario

La zona definida para este estudio es el centro histórico de la ciudad de Cuenca, cuyos límites se especifican en la “Ordenanza para la Gestión y Conservación de las Áreas Históricas y Patrimoniales del Cantón Cuenca” emitida por el Concejo Cantonal de la ciudad en el 2010. [22]

Siendo el objetivo analizar el comportamiento de la red en las zonas de mayor actividad comercial y alta densidad poblacional, el área de estudio delimitado se muestra en la Figura 3.1.

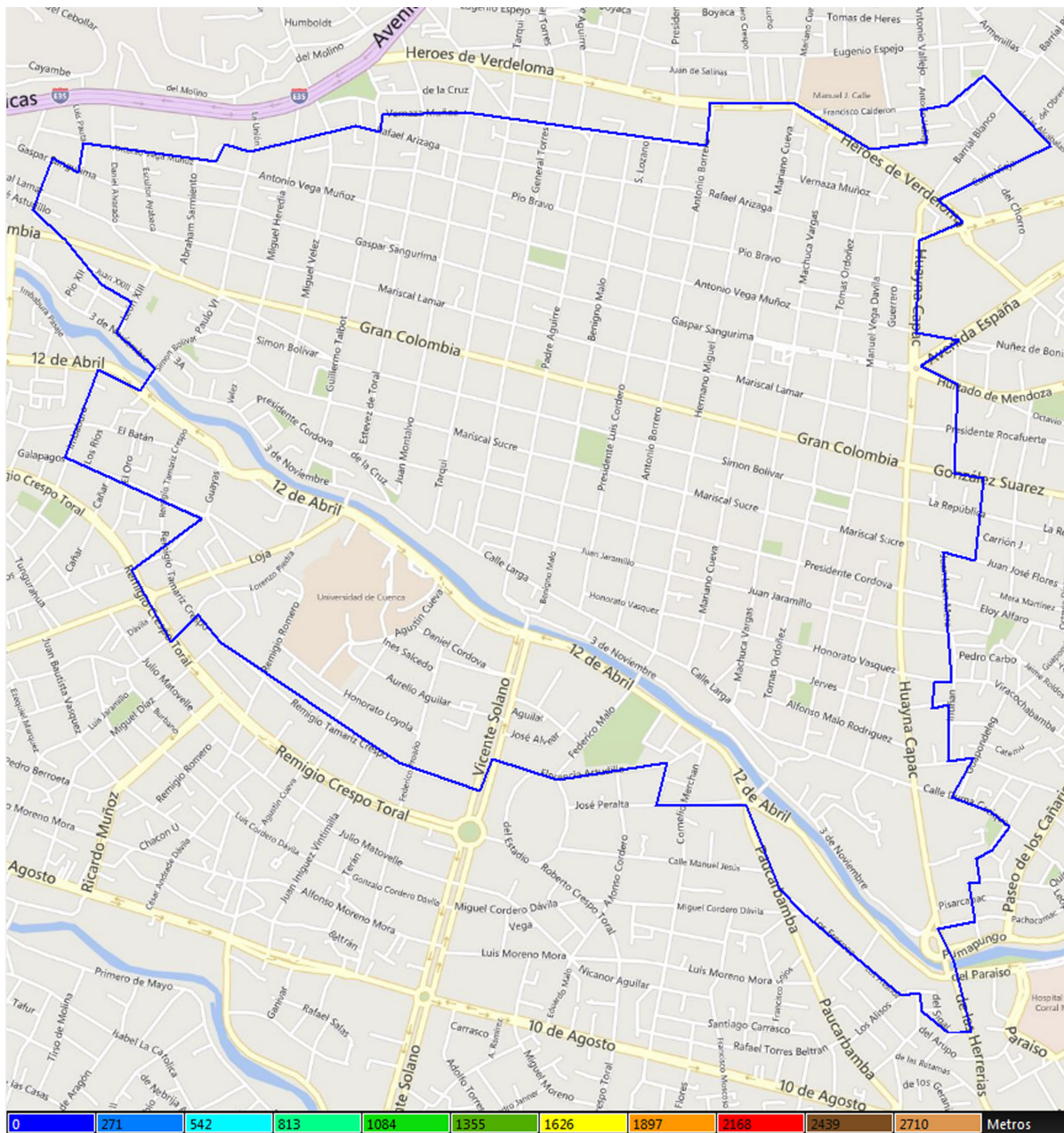


Figura 3.1. Área de Simulación de Centro Histórico de la ciudad de Cuenca.

Las capas de cartografía digital de la ciudad de Cuenca disponibles tienen una resolución de 1 metro, lo que garantiza una alta precisión de los resultados de simulación.



- Capa MDT:

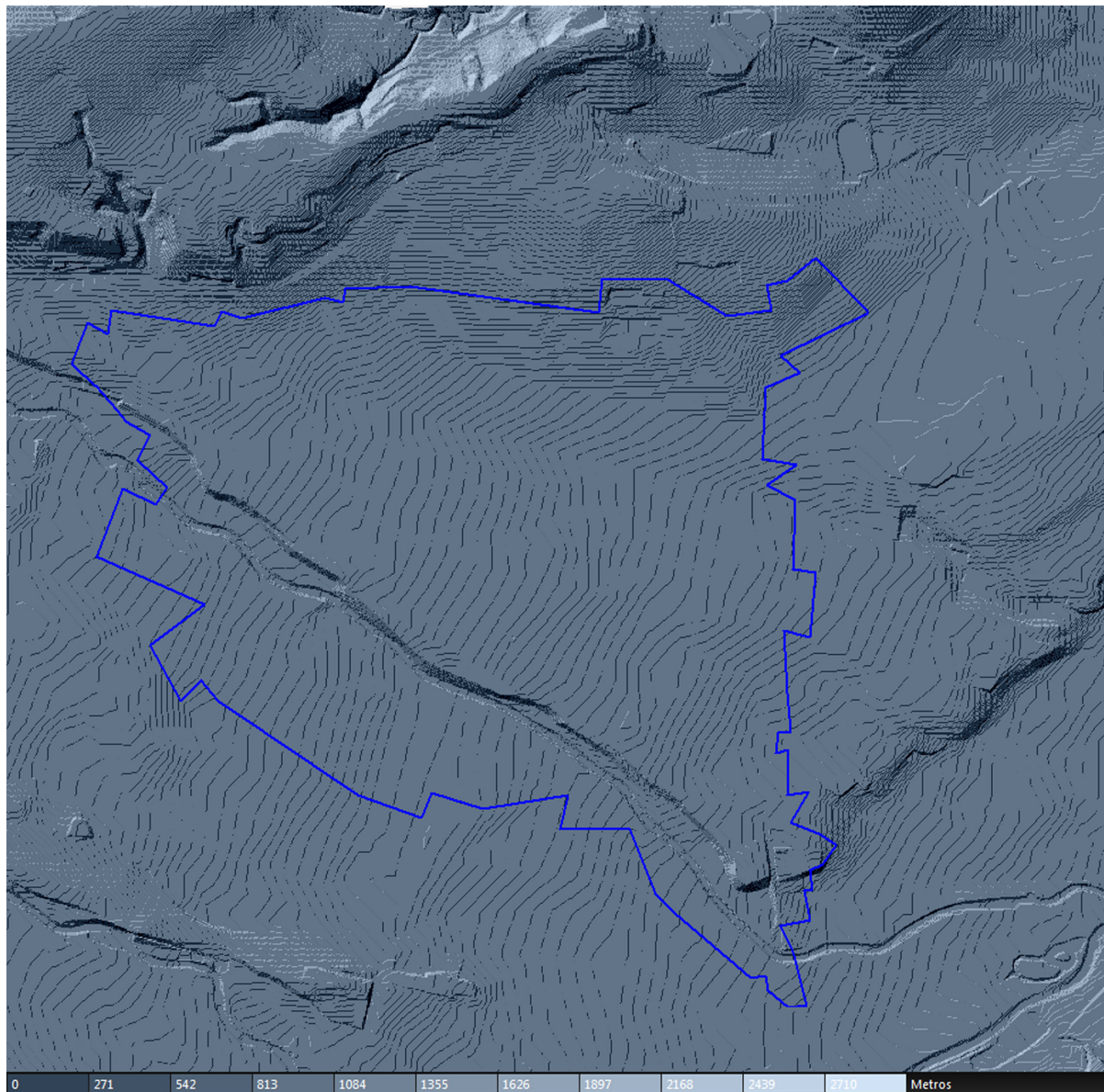


Figura 3.2. Capa MDT-Elevación de Terreno de la ciudad de Cuenca.



- Capa de Edificios:

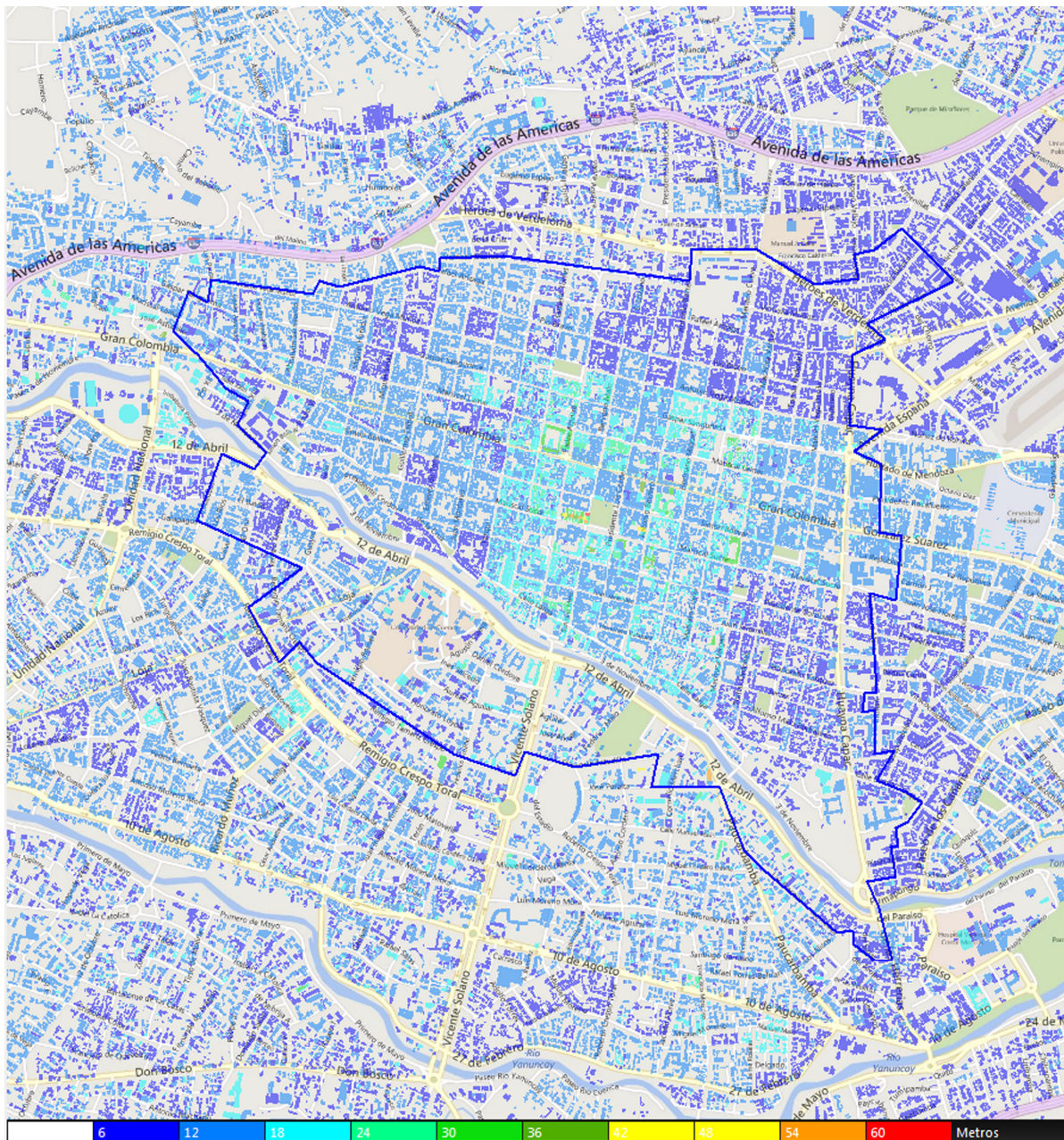


Figura 3.3. Capa de Edificaciones de la ciudad de Cuenca.



ANÁLISIS DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN

- Capa de Clutter:

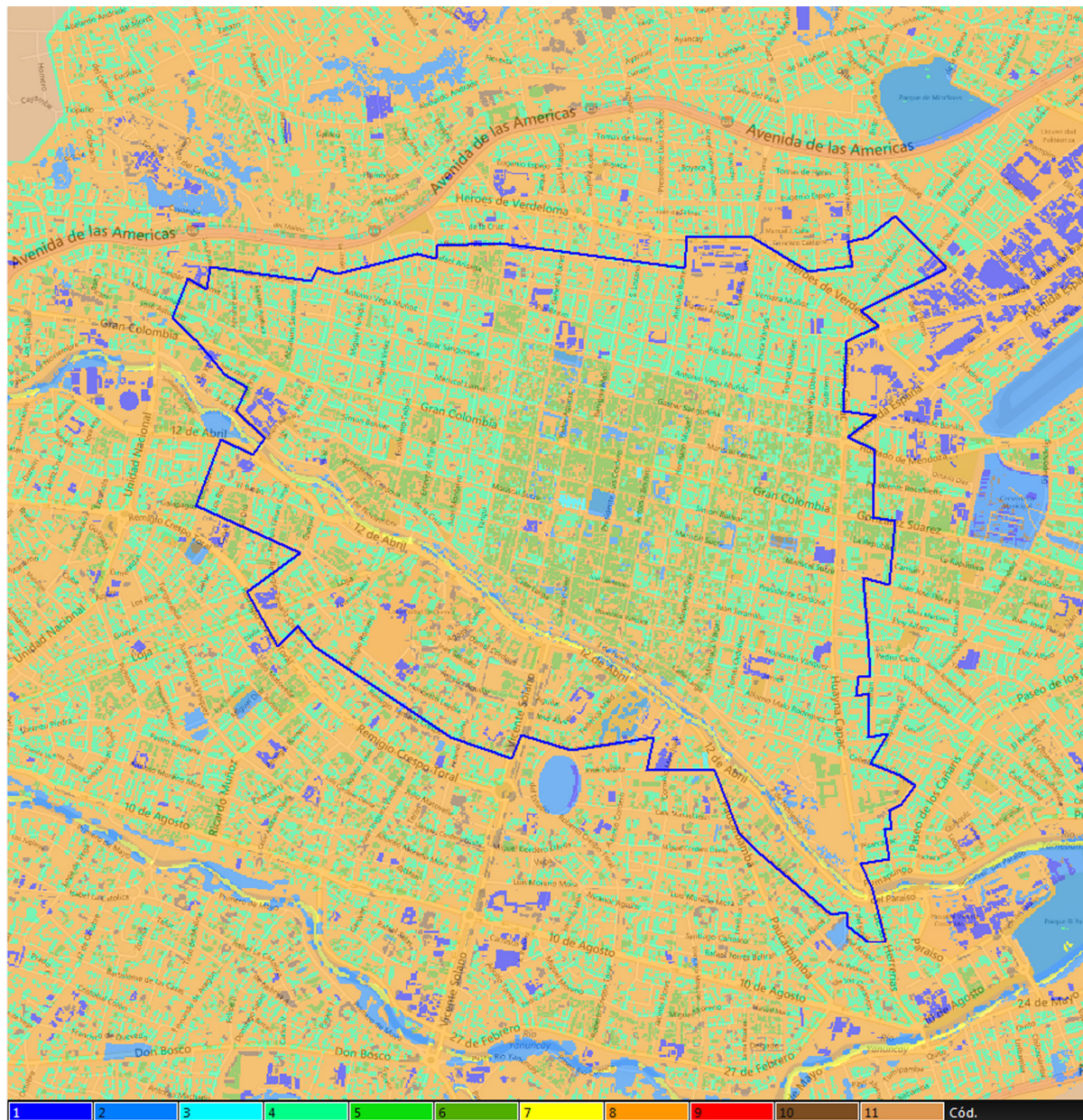


Figura 3.4. Clutter-Capa de ocupación de suelo de Cuenca.



- Imagen o Mapa:

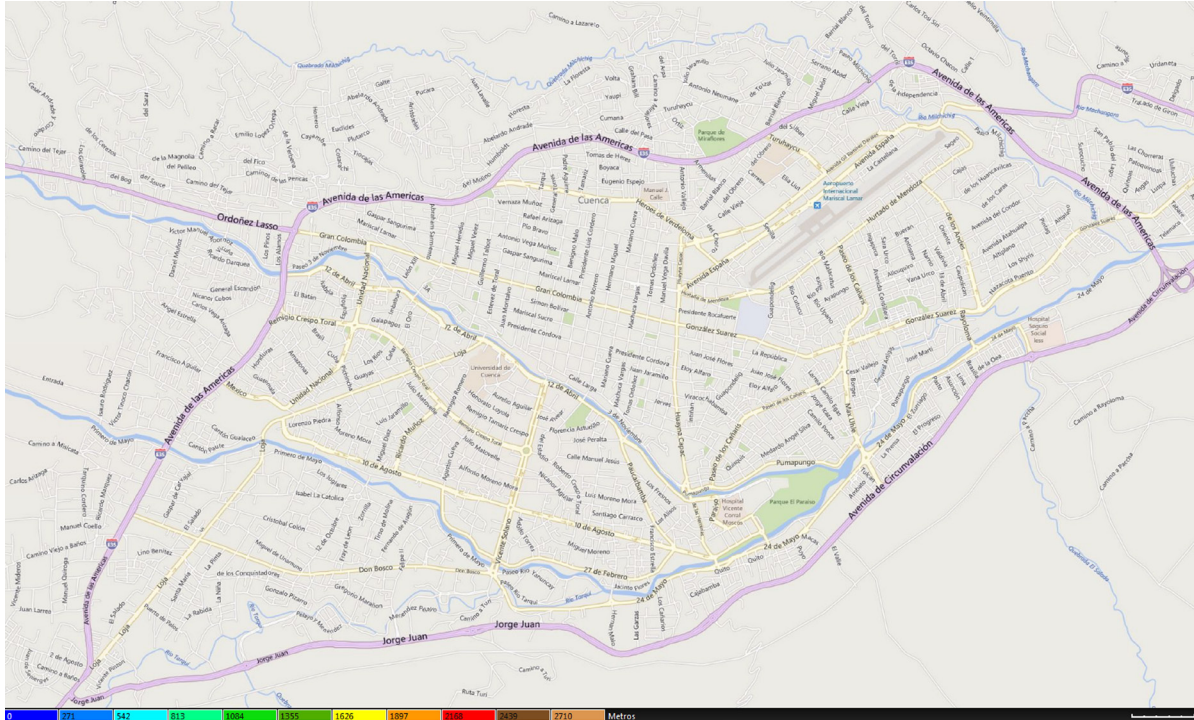


Figura 3.5. Capa de visualización- Mapa de Cuenca.

3.5. DEFINICIÓN DE LA BANDA DE FRECUENCIA

En el capítulo 2 se definió las bandas de frecuencia para sistemas IMT concesionadas a las operadoras telefónicas del Ecuador, donde se señaló que la operadora CNT cuenta con 30MHz en la banda 700MHz y 40MHz en la banda AWS 1700-2100MHz.

Actualmente CNT utiliza las frecuencias asignadas en la banda AWS, por lo que han sido seleccionadas para la presente simulación. Estas frecuencias pertenecen a la banda 4 de LTE de acuerdo a lo establecido por 3GPP, en la Tabla 1.1.

Modo de Transmisión	FDD
Frecuencias de Enlace Ascendente (MHz)	1710-1730
Frecuencias de Enlace Descendente (MHz)	2110-2130

Tabla 3.6. Frecuencias seleccionadas para simulación.



3.6. ELECCIÓN DE MODELO DE PROPAGACIÓN

Se describen tres modelos de propagación presentes en el software ICS TELECOM, los mismos que son apropiados para simulación de redes inalámbricas en zonas urbanas, y para la resolución de cartografía disponible.

3.6.1. OKUMURA HATA

Este modelo empírico calcula las pérdidas de propagación para sistemas de comunicaciones móviles, basado en las medidas de campo realizadas por Okumura. Se definen tres fórmulas del modelo Hata para zonas específicas: urbana, suburbana y rural. [42] En este caso, se analiza el modelo de zona urbana al que pertenece la ciudad de Cuenca.

La expresión de pérdidas de propagación es la siguiente:

$$L_{50}(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Donde:

- f_c Frecuencia de operación en MHz.
- d Distancia entre la estación base y el móvil en km.
- h_t Altura efectiva de la antena transmisora en metros.
- h_r Altura sobre el suelo de la antena receptora en metros.

Los límites de cada parámetro son:

$$\begin{aligned} 150\text{MHz} < f_c < 1500\text{MHz} \\ 30\text{m} < h_t < 200\text{m} \\ 1\text{m} < d < 20\text{km} \end{aligned}$$

En Eq. (3.21), $a(h_r)$ es el factor de corrección de altura de la antena móvil que se calcula según el tamaño de la ciudad en relación con la altura de los edificios.

Para una pequeña o mediana ciudad cuyos edificios tienen una altura inferior a 10 m, se define:

$$a(h_r) = (1.1 \log(f_c) - 0.7) * h_r - (1.56 \log(f_c) - 0.8) \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Dónde: $1\text{m} < h_r < 10\text{m}$



Y para una ciudad grande con edificaciones de altura superior a 15m:

$$a(h_r) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_r))^2 - 1.1 & f_c \leq 200\text{MHz} \\ 3.2(\log(11.75h_r))^2 - 4.97 & f_c > 200\text{MHz} \end{cases} \quad \text{Eq. (3.4)}$$

3.6.2. Método ITU-R 525/526 BULLINGTON

El método ITU-R 525/526 Bullington para calcular las pérdidas por propagación de una señal resulta de la combinación de dos recomendaciones de la UIT. Emplea la recomendación ITU-R 525 para el cálculo de la atenuación en espacio libre [24] y el método ITU-R 526-12 para el cálculo de propagación por difracción. [28]

En [24] se definen las pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre para enlaces punto a punto entre antenas isotrópicas, a través de la ecuación 3.5:

$$L_{bf}(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{Eq. (3.5)}$$

En donde:

- L_{bf} Pérdida de transmisión en el espacio libre.
- d Distancia.
- λ Longitud de onda.
- λ y d se expresa en las mismas unidades.

En función de la frecuencia, se obtiene la ecuación 3.6

$$L_{bf}(dB) = 32.4 + 20 \log f(\text{MHz}) + 20 \log d(\text{Km}) \quad \text{Eq. (3.6)}$$

Por otro lado, el método de difracción de Bullington, que toma en cuenta todos los obstáculos presentes en la línea de vista, se basa en definir un nuevo obstáculo efectivo con una altura h_{eq} para el cálculo de las pérdidas. [28]

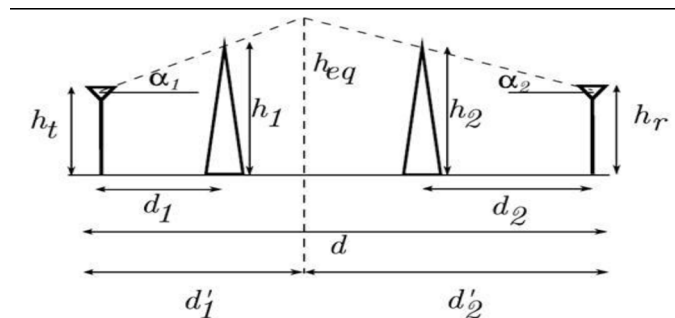


Figura 3.6. Método de Bullington para dos obstáculos. [8]



La figura 3.6., representa un enlace punto a punto con dos obstáculos que interrumpen la línea de vista, en función de los cuales se calcula, mediante geometría, la nueva altura equivalente. A través de las siguientes fórmulas: [8]

Al formar un triángulo con la línea entre transmisor y el receptor se tiene que la altura equivalente está dado por:

$$h_{eq} = h_r + \left(d + d_1 \frac{h_t - h_r}{h_1 - h_t} \right) \frac{(h_2 - h_r)(h_1 - h_t)}{d_1(h_2 - h_r) + d_2(h_1 - h_t)} \quad h_t > h_r \quad \text{Eq. (3.7)}$$

$$h_{eq} = h_t + \left(d + d_2 \frac{h_r - h_t}{h_2 - h_r} \right) \frac{(h_2 - h_r)(h_1 - h_t)}{d_1(h_2 - h_r) + d_2(h_1 - h_t)} \quad h_t < h_r \quad \text{Eq. (3.8)}$$

También se determina las distancias entre el obstáculo definido y el transmisor y el receptor respectivamente:

$$d'_1 = d_1 \frac{h_{eq} - h_t}{h_1 - h_t} \quad \text{Eq. (3.9)}$$

$$d'_2 = d_2 \frac{h_{eq} - h_r}{h_2 - h_r} \quad \text{Eq. (3.10)}$$

81

Con los datos obtenidos se calculan las pérdidas por difracción como si se tuviera un único obstáculo en arista en filo de cuchillo. Que se define en [25] y se resume a continuación:

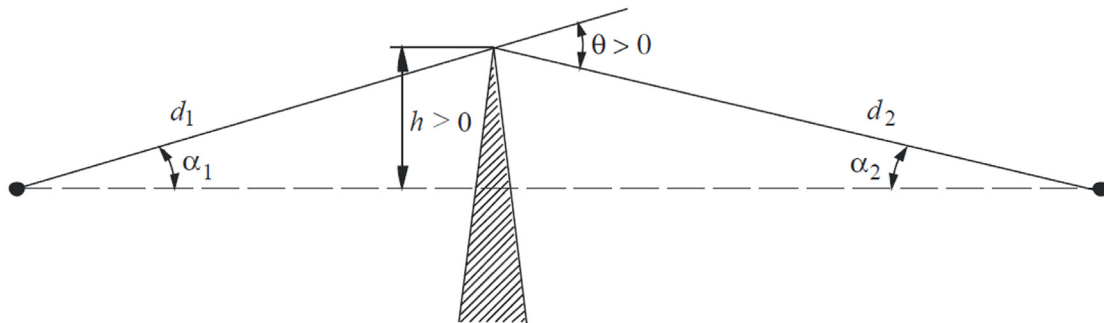


Figura 3.7. Obstáculo único en arista en filo de cuchillo. [25]

Se define el parámetro de difracción:

$$v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda}} \alpha_1 \alpha_2 \quad \text{Eq. (3.11)}$$

Y se calcula las pérdidas $J(v)$ (dB) si $v > -0.78$ mediante la ecuación:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1) \quad \text{Eq. (3.12)}$$



Para otro caso distinto de $v > -0.78$ las pérdidas son cero.

Finalmente, se obtienen las pérdidas totales sumando los resultados de pérdidas por espacio libre y de pérdidas por difracción:

$$L_{Tot} = L_{bf} + J(v) \quad \text{Eq. (3.13)}$$

3.6.3. Método ITU-R 525/526 DEYGOUT

Este modelo emplea dos recomendaciones de la UIT. Para el cálculo de la atenuación en espacio libre se basa en la recomendación ITU-R 525 explicada anteriormente, y para el cálculo de las pérdidas por difracción en el método ITU-R 526-11.

En el modelo ITU-R 526-11 o método Deygout, los obstáculos se consideran de tipo filo de cuchillo, Figura 3.6, y se utiliza un método recursivo para calcular las pérdidas por difracción para n número de obstáculos que existan dentro del enlace [40], que se explica a continuación:

82

Primero se identifica el obstáculo dominante o de mayor altura que existe en el trayecto, para lo cual se deduce el parámetro de difracción v_p y se elige el de valor más alto.

Se calculan las pérdidas por difracción $J(v_p)$ para este v_p del mayor obstáculo ya identificado, y si $v_p > 0$, se divide el trayecto en dos partes, emisor-obstáculo y obstáculo-receptor. Del mismo modo se identifica el obstáculo dominante de los dos subtrayectos, y se calcula v_t y v_r , obteniendo las pérdidas de difracción $J(v_t)$ y $J(v_r)$ de cada uno de los obstáculos.

Si $v_t, v_r > 0$, se subdivide el trayecto en dos nuevos trayectos y se busca el obstáculo dominante del que se calculan los parámetros y pérdidas de difracción. Es decir, se continúa de manera recursiva hasta que ningún parámetro de difracción sea mayor a cero, o que ningún obstáculo bloquee la línea de vista.

Dentro del mismo subtrayecto existen obstáculos que no bloquean la línea de vista, el total de sus pérdidas es igual a la suma de las pérdidas producidas por cada uno de los obstáculos de filo de cuchillo independientemente.

Una vez determinadas las pérdidas en espacio libre y la suma de todas las pérdidas de difracción, se puede obtener la atenuación total del sistema.

$$L_{Tot} = L_{bf} + J(v_i) \quad \text{Eq. (14)}$$



Cabe recalcar que este método es bastante exacto en presencia de dos obstáculos, sin embargo, para un mayor número de éstos sobrestima las pérdidas, por lo que se limita el cálculo a un máximo de 3 obstrucciones.

De los modelos de propagación descritos, se ha escogido la combinación de los métodos ITU525/526 Deygout para la simulación realizada. Este método determinístico ofrece una estimación más realista de las pérdidas de propagación al tomar en cuenta el perfil del terreno para cada pixel del mapa, calculando las pérdidas por difracción de los tres obstáculos dominantes individualmente, en comparación con el método ITU-R 525/526 Bullington que calcula una altura equivalente simulando un único obstáculo [34]. Este último método también presenta una desventaja respecto a tiempo de procesamiento evidente durante las pruebas realizadas con el software ICS TELECOM.

Las razones por las que el método empírico de Okumura Hata no se aplica en este proyecto, se debe a que se recomienda para una cartografía de mediana resolución, y porque la banda de frecuencias de enlace descendente seleccionada para la simulación en el apartado anterior, supera el límite de frecuencias que soporta este modelo.

En el capítulo 4 se presentarán resultados de simulación de cobertura para los tres métodos analizados.

3.7. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN E-NODEB

De acuerdo a la información compartida por la operadora CNT acerca de la red LTE activa en la ciudad de Cuenca, las características consideradas para la configuración de los nodos son:

- Tipo de celdas: Microceldas
- Ancho de banda por sector: 5MHz
- Modelo de Antenas: RFS APXV18-206516H

Los parámetros establecidos para los transmisores e-NodeB se resumen en la Tabla 3.7.



Potencia TX (dBm)	39
Ganancia TX (dBi)	18.1
MIMO	2X2
Ancho de Banda (MHz)	5 MHz
Número de RB	25
Carga	70%

Tabla 3.7. Parámetros de configuración de estaciones e-NodeB.

La potencia de transmisión se basa en los límites, $24\text{dBm} < P_{tx} < 41\text{dBm}$, establecidos para microcelda en zona urbana en la recomendación ITU-R M.2135-1. [26]

De acuerdo a [41], del total de RB disponibles (25 RB), aproximadamente un 30% representa tráfico de cabeceras, por lo tanto solo un 70% se dedica a tráfico de datos de usuario.

84 Las características de antena tomadas del modelo RFS APXV18-206516H, incluyen la ganancia y los patrones de radiación que fueron cargados en el software. [31]

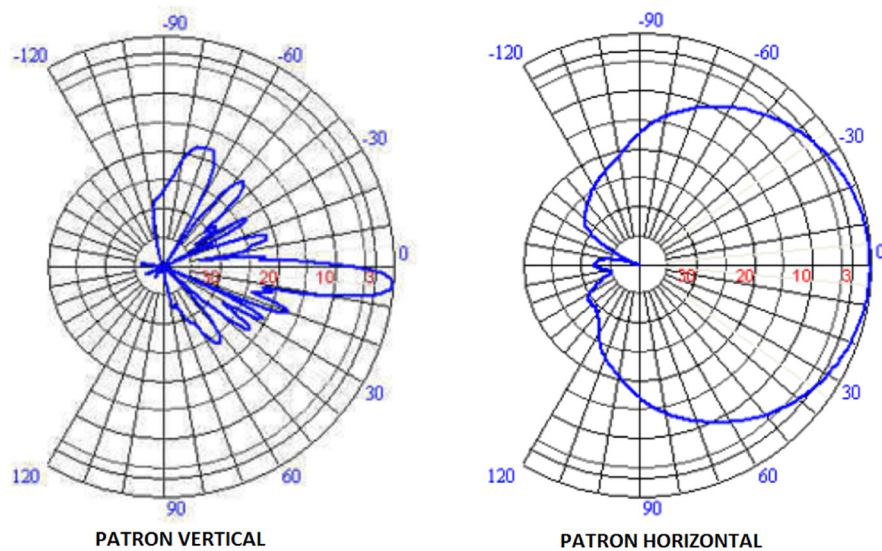


Figura 3.8. Diagrama de Radiación Antena RFS APXV18. [31]

Los parámetros de usuario o de recepción establecidos se basan en la recomendación 36.101 de 3GPP. Estos se presentan en la Tabla 3.8.



Potencia RX (dBm)	23
Ganancia TX (dBi)	0
Patrón de Radiación	Omnidireccional
Altura (m)	1.5
Sensibilidad (dBm)	-106.5

Tabla 3.8. Parámetros de recepción configurados. [4]

La configuración anterior se establece en todos los nodos de la red de simulación, cuyo comportamiento se analiza en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA



INTRODUCCIÓN

A partir del estudio de la tecnología radio y de los parámetros de configuración de un eNodoB para el software de simulación ICS TELECOM, en este capítulo se procede al análisis del despliegue de una red LTE sobre el área delimitada en el apartado 3.4.1, correspondiente al Centro Histórico de la ciudad de Cuenca.

El proceso se basa en el uso de infraestructura existente, por lo que se estudia inicialmente el comportamiento de los nodos LTE que la operadora CNT, escogida para este proyecto, posee actualmente para brindar este servicio. En función de los resultados de simulación tanto de cobertura como de capacidad se modifica y analiza la red con el fin de obtener una señal de potencia lo suficientemente fuerte en un mayor porcentaje de área, proporcionando la mejor tasa de datos posible.

En el primer apartado de este capítulo se presenta la comparación de simulación de los modelos de propagación analizados anteriormente.



4.1. SIMULACIÓN DE MODELOS DE PROPAGACIÓN

Los resultados obtenidos al simular el nivel de cobertura de un nodo de acceso LTE para los modelos: Okumura-Hata, ITU-R 525/526 Bullington e ITU-R 525/526 Deygout, expuestos en 3.6, se presentan en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente.

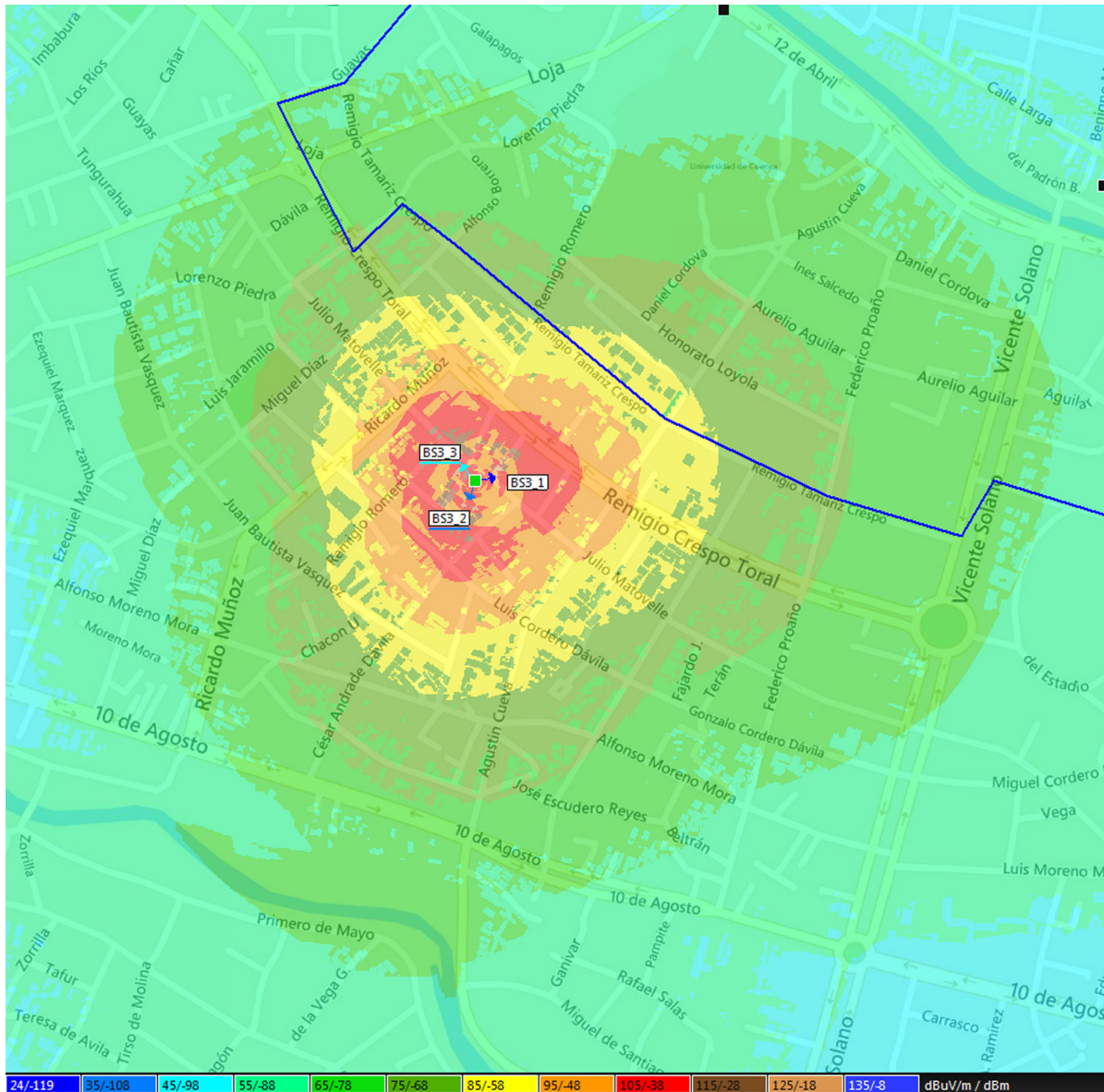


Figura 4.1. Simulación de cobertura: Modelo Okumura-Hata.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

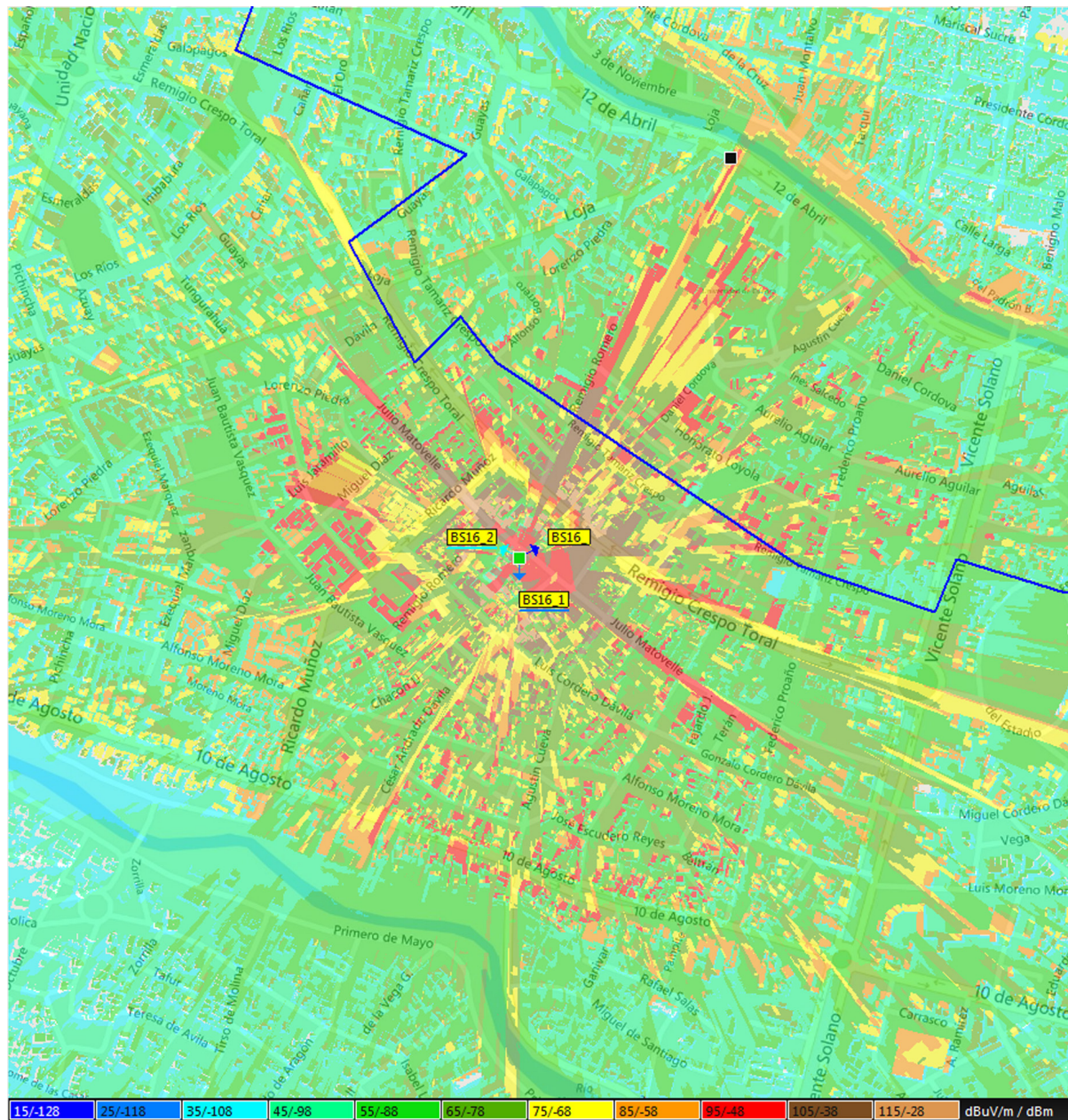


Figura 4.2. Simulación de cobertura: Modelo ITU-R 525/526 Bullington.

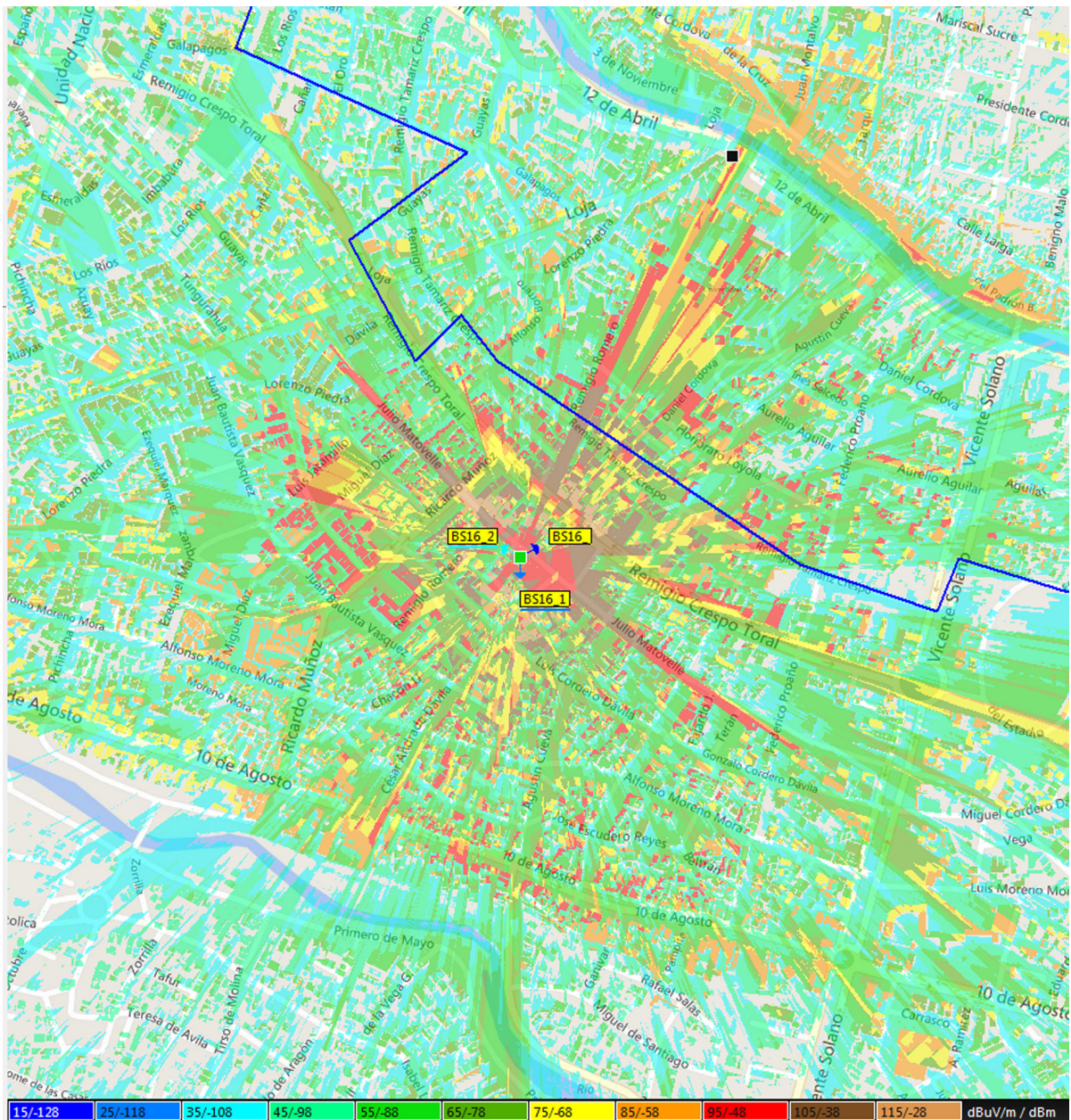


Figura 4.3. Simulación de cobertura: Modelo ITU-R 525/526 Deygout.

Las imágenes exponen las características descritas de cada modelo de propagación, se observa que el modelo Okumura-Hata al ser estadístico y no tomar en cuenta las características del perfil del terreno presenta menores pérdidas, es decir, un nivel de cobertura mucho mayor en comparación a los otros modelos.

Los modelos determinísticos presentan una menor diferencia entre ellos, sin embargo, se observa claramente que el modelo 525/526 Deygout calcula un nivel de



potencia de recepción menor. Este modelo toma en cuenta en el perfil del terreno las pérdidas por difracción de los tres obstáculos dominantes y la atenuación por reflexión de aquellos presentes en la primera zona de Fresnel por debajo de la línea de vista, por lo que se ha escogido este modelo de propagación para lograr una mayor aproximación a la realidad.

4.2. DISEÑO DE RED LTE CNT

Actualmente la operadora CNT cuenta con 6 nodos con tecnología LTE desplegados en la ciudad de Cuenca, de los cuales 4 se encuentran ubicados en zonas que involucran el centro histórico de la ciudad.

Cada uno de estos nodos se configuró con los parámetros indicados en la Tabla 3.7 y en la Tabla 4.1. En la Figura 4.4 se puede observar su ubicación.

Nodos B	Descripción	Latitud	Longitud	Altura (m)	Tilt(°)
BS1	Parque Calderón	2°53'54.6" S	79°0'16.9" O	42	-4.8
BS2	Colegio Corazones	2°53'42.97" S	79°0'50.08" O	25	-2.9
BS3	Pista de Bicicross	2°54'18.44" S	79°0'47.95" O	20	-2.3
BS4	Banco Central	2°54'21.02" S	78°59'50.06" O	25	-2.3

Tabla 4.1. Configuración de nodos CNT LTE.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

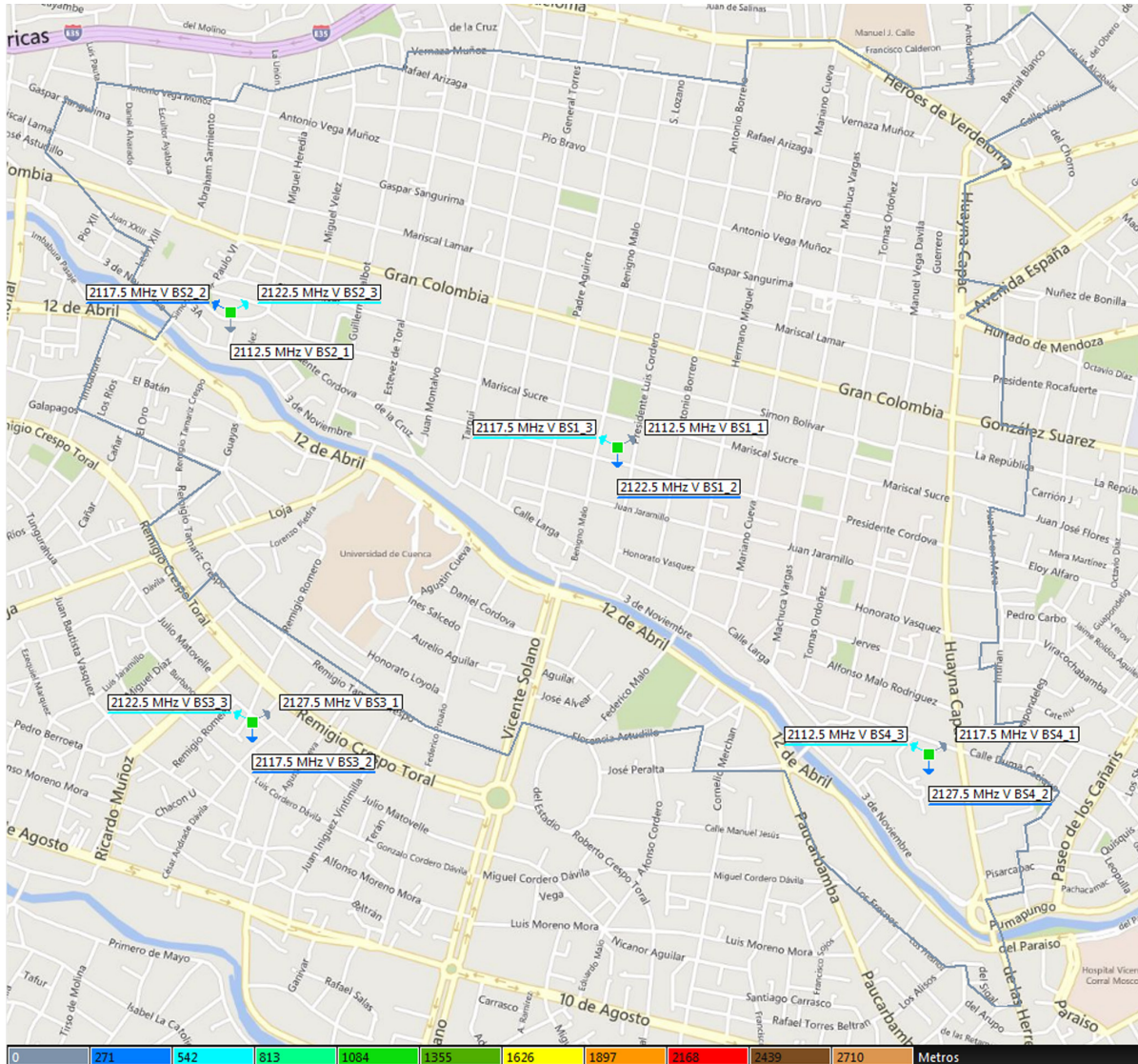


Figura 4.4. Ubicación de nodos CNT LTE en mapa de Cuenca.

El cálculo de Tilt o inclinación de antena hacia abajo, para direccionar la energía de manera que la cobertura se reduzca a un área requerida, se realizó a través de Eq. (4.1) [30]. Tomando en cuenta que la distancia entre los nodos es de aproximadamente 1km, el cálculo se realizó para un radio de 500m por radiobase.

$$\hat{\text{Angulo Tilt}} = \tan^{-1} \frac{h_{Tx} - h_{Rx}}{D} \quad \text{Eq. (4.1)}$$



Donde,

- h_{Tx} Altura de la antena transmisora
- h_{Rx} Altura del móvil $\approx 1.5m$
- D Distancia entre antena transmisora y punto de recepción.

Para la asignación de frecuencias se considera que CNT configura un ancho de banda de 5MHz a cada sector de una estación base, y dado que el total de ancho de banda asignado para enlace descendente a esta operadora en la banda AWS es 20MHz, se cuenta con un factor igual a 4 para un esquema de reúso de frecuencias.

Es decir, se tiene 4 segmentos de 5Mhz de ancho de banda, expuestos en la Tabla 4.2, que son asignados a cada sector de manera que se maximice la distancia entre celdas que transmiten a una misma frecuencia, reduciendo la interferencia co-canal.

Bandas de Frecuencias (MHz)
2110-2115
2115-2120
2120-2125
2125-2130

Tabla 4.2. Bandas de Frecuencia de 5MHz

Se configuran los segmentos de la Tabla 4.2, para una asignación de frecuencias a través del software, donde se establece también una variación de polarización de antena, el resultado se observa en la Figura 4.5.

Al finalizar la configuración de la red se inicia la simulación de cobertura en función del nivel RSRP (Reference Signal Receiver Power). El móvil reporta valores desde -140dBm hasta -44dBm [3], sin embargo, se ha fijado un umbral de -120dBm como nivel de señal aceptable. Se debe tener en cuenta que este umbral es menor al nivel de sensibilidad del receptor móvil, ya que RSRP es el promedio de potencia de una única portadora.

En la Figura 4.5, se puede observar los resultados de cobertura en la zona de estudio, donde el nivel más bajo (-120 dBm) se representa con el color plomo y el nivel más alto (-18dBm) con el color morado. El último color de la paleta no se considera para las gráficas de RSRP. Cabe destacar que cada color simboliza un nivel de cobertura mayor o igual al expresado numéricamente en la paleta de colores, y menor al expresado en el siguiente color a su derecha.



Las zonas sin color o sombras de cobertura significan que el nivel de RSRP es menor al umbral, es decir, en la zona norte las radiobases desplegadas no proporcionan suficiente señal de potencia por lo que se concluye que se requiere de un mayor número de estaciones base eNodeB para satisfacer niveles de cobertura tolerables en toda la zona de estudio. Las regiones cercanas a las estaciones presentan altos niveles de RSRP, sin embargo se marcan secciones de sombra debido al efecto de difracción producido por las edificaciones.

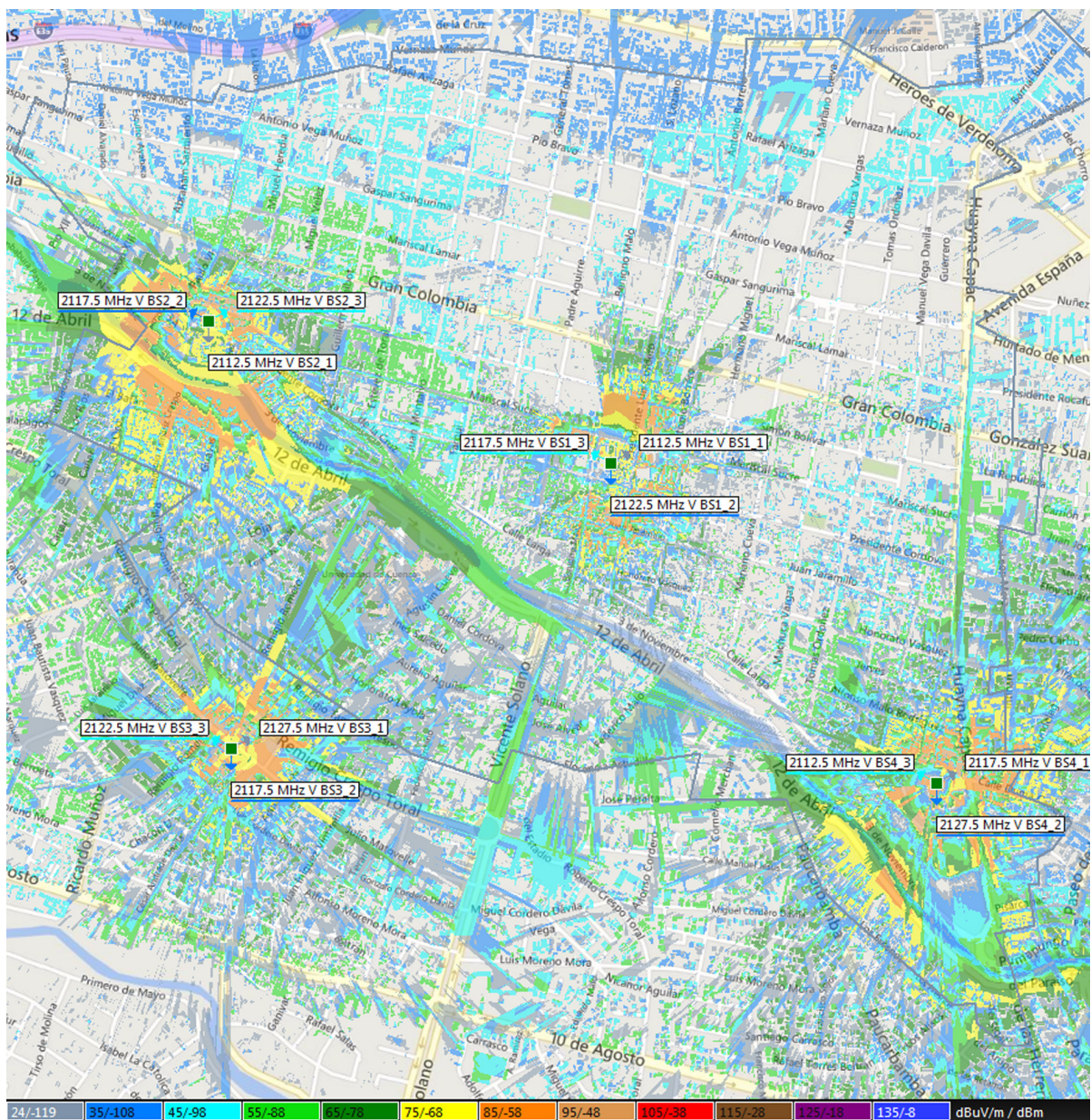


Figura 4.5. Cobertura RSRP: Cuatro nodos activos.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

La Figura 4.6 representa la cobertura de mejor servidor, lo que permite analizar el comportamiento de cada nodo y determinar su zona de servicio. Se puede observar que aunque la configuración de las estaciones es la misma, el nodo BS2 cubre un mayor porcentaje de área debido a la zona geográfica en la que se encuentra. Por otro lado, para el nodo BS1 la cobertura se limita porque se encuentra cercano al parque central de la ciudad rodeado de altas edificaciones.

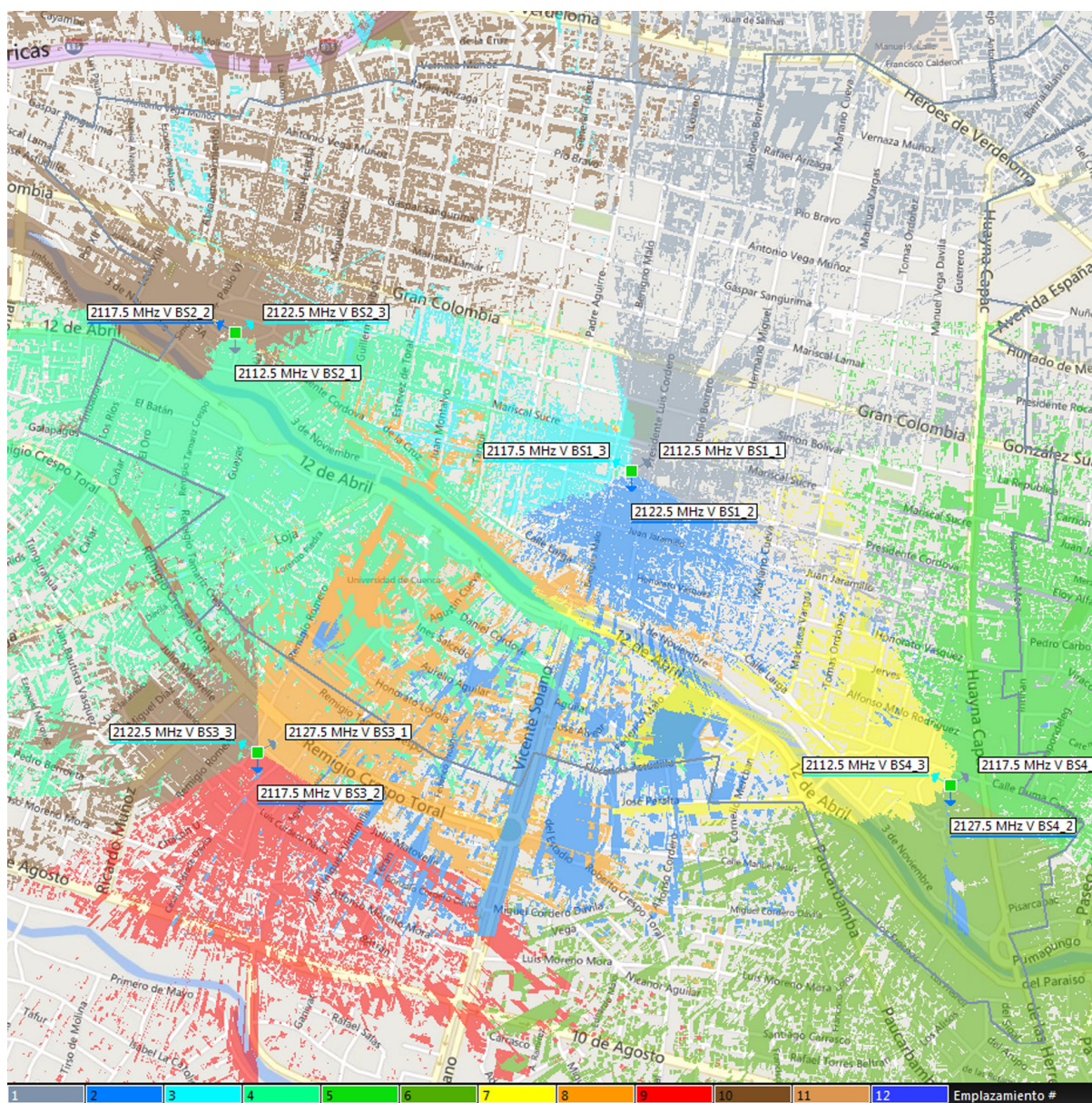


Figura 4.6. Cobertura de Mejor Servidor: Cuatro nodos activos.



Los resultados de nivel de SNIR se presentan en la Figura 4.7, los mismos que se reflejan únicamente en las zonas donde el nivel de RSRP supera el límite establecido (-120dBm).

El nivel mínimo de SNIR aceptable es -10dB de acuerdo a [2], donde se detalla la correspondencia entre el nivel de SNIR para un determinado tipo de modulación y codificación, Tabla 4.3.

SINR (dB)	Modulación	Codificación
-10	QPSK	1/8
-4	QPSK	1/5
-3	QPSK	1/4
-1	QPSK	1/3
1	QPSK	1/2
3	QPSK	2/3
5	QPSK	4/5
6.5	16 QAM	1/2
10	16 QAM	2/3
11.4	16 QAM	4/5
13.6	64 QAM	2/3
15.5	64 QAM	3/4
16.8	64 QAM	4/5

Tabla 4.3. SNIR vs. Tipo de Modulación y Codificación. [2]

Se observa en la Figura 4.7, que los niveles de SNIR varían principalmente entre 0 y 30 dB, es decir, la relación entre señal e interferencia más ruido es positiva al compararla con los niveles mínimos. De acuerdo a la Tabla 4.3, en las zonas de nivel SNIR mayor a 20 es posible utilizar la modulación y codificación de mayor rendimiento que sería modulación 64QAM con codificación 4/5, aumentando la velocidad de datos transmitida, lo que se refleja en la Figura 4.9.

DANIELA BARRERA SALAMEA



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Rendimiento / RB vs SNIR				
SNIR (dB)	SIMO (Kbps)	TxDiv (Kbps)	MIMO (Kbps)	UL-STD (Kbps)
-5	42.25	45.83	43.81	39.54
	51.80	56.49	54.04	48.23
	62.73	68.62	65.68	58.36
	75.17	82.31	78.88	70.07
	89.21	97.68	93.77	83.46
	104.97	114.80	110.48	98.64
	122.54	133.75	129.13	115.67
	141.99	154.58	149.86	134.58
	163.38	177.32	172.77	155.35
	186.74	201.96	197.98	177.92
	212.05	228.46	225.55	202.18
	239.29	256.76	255.57	227.94
	268.38	286.72	288.07	254.98
	299.20	318.20	323.07	282.98
	331.60	351.01	360.54	311.61
	365.37	384.89	400.45	340.45
	400.27	419.57	442.70	369.04
	436.02	454.72	487.16	396.90
	472.28	490.00	533.68	423.52
	508.69	525.01	582.04	448.38
	544.85	559.34	631.98	470.99
	580.35	592.58	683.22	490.87
	614.74	624.28	735.42	507.58
	647.58	654.02	788.21	520.75
	678.43	681.38	841.17	530.08
	706.86	705.95	893.89	535.35
	732.44	727.38	945.88	536.56
	754.80	745.32	996.68	536.56
	773.60	759.51	1045.79	536.56
	788.55	769.71	1092.72	536.56
	799.40	775.77	1136.98	536.56
	805.99	777.60	1178.09	536.56
	808.21	777.60	1215.59	536.56
	808.21	777.60	1249.07	536.56
	808.21	777.60	1278.13	536.56
	808.21	777.60	1302.43	536.56
	808.21	777.60	1321.68	536.56
	808.21	777.60	1335.65	536.56
	808.21	777.60	1344.16	536.56
	808.21	777.60	1347.12	536.56
	808.21	777.60	1347.12	536.56
36	808.21	777.60	1347.12	536.56

Figura 4.8. Rendimiento vs SNIR. [ICS TELECOM]

Simplemente se multiplica el valor de bits/RB correspondiente al nivel de SNIR de determinado pixel por el total de Radio Bloques (RB) disponibles de la celda, es decir, todos los recursos se asignan a cada uno de los puntos. Para un ancho de banda de 5MHz, se tiene 25RB, de los cuales se dispone solo un 70% para tráfico de datos de usuario [41], por lo tanto el cálculo de capacidad se realiza con un total de 18RB.

El color rojo simboliza una velocidad igual o mayor a 24.37 Mbps y menor a 26.9Mbps, siendo esta la mayor velocidad alcanzada por la celda, que representa zonas donde



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

se obtiene valores de SNIR superiores a los 34dB. Esta velocidad pico se aproxima a los valores teóricos de tasa de datos máximos presentados en la Tabla 1.10.

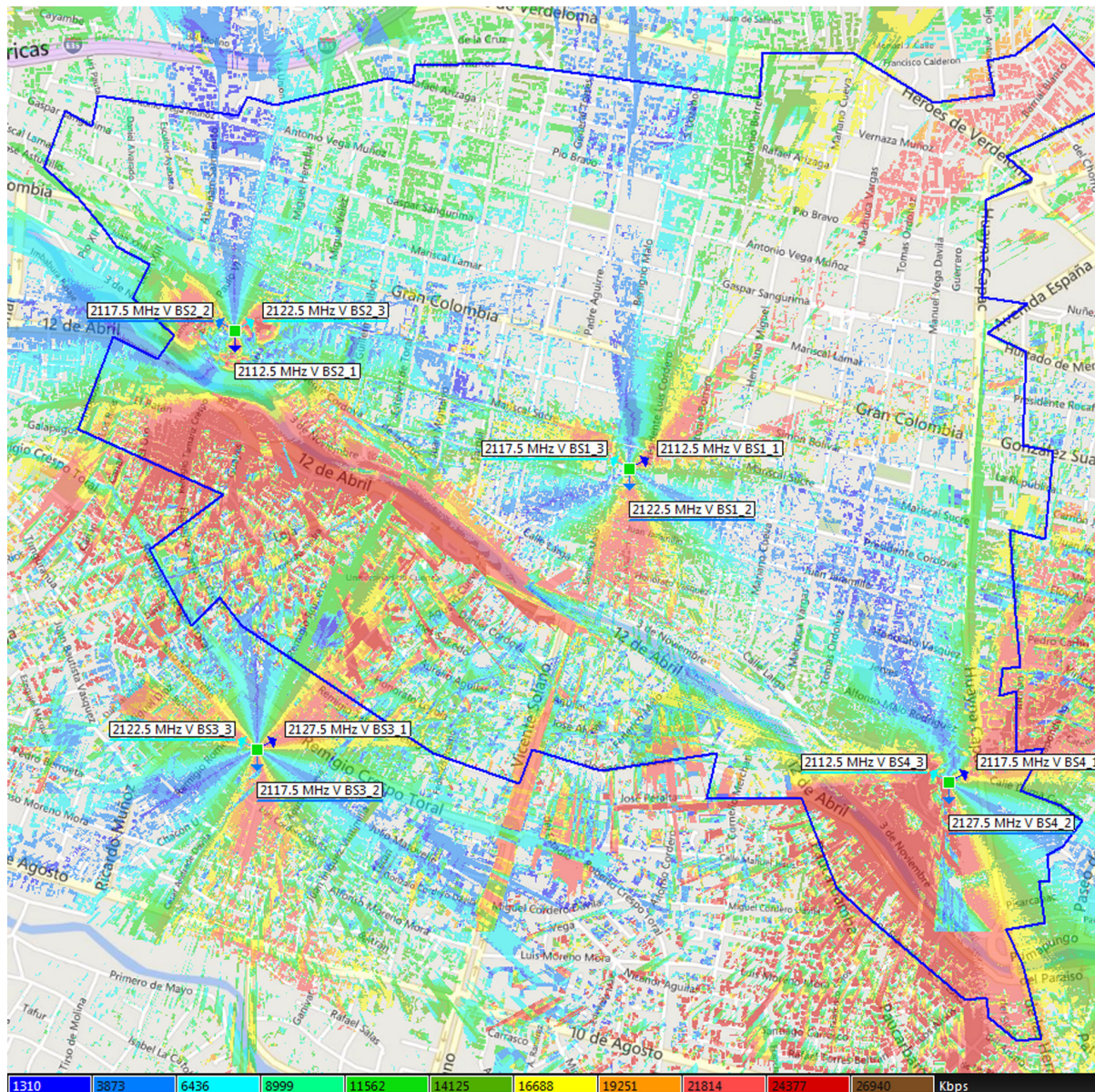


Figura 4.9. Predicción de Rendimiento: Cuatro nodos activos.

4.3. SIMULACIÓN DE LA RED LTE CNT ACTUAL CON UNA CANALIZACIÓN DE 20MHZ.

Con el objetivo de comparar resultados de capacidad y SNIR con el esquema de red analizado, se varió la configuración de los nodos activos a un ancho de banda de



20MHz, es decir, se asignó el rango de 2110-2130 MHz a cada uno, que es el total asignado a CNT en la banda AWS y el máximo configurable para la tecnología LTE.

En la Figura 4.10, se presentan los resultados respecto a cobertura en función de la señal RSRP. En comparación con la Figura 4.5 en donde se grafica la cobertura RSRP con un esquema de canalización de 5MHz, el nivel de potencia de toda la red es menor, por lo tanto, las zonas de cobertura que se encontraban en el límite del umbral ya no lo superan, aumentando las sombras de cobertura.



Figura 4.10. Cobertura RSRP: Cuatro nodos activos - AB 20Mhz.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Los resultados anteriores se reflejan en la Figura 4.11, donde se observa que para todos los niveles de cobertura desde -119dBm hasta -48dBm, la red de canalización 5MHz presenta mayores porcentajes de área cubierta. Se puede notar que para una red de 4 nodos activos el mayor porcentaje de área (28%) posee niveles de cobertura cercanos al límite, entre -120dBm y -108dBm, esta conducta se mantiene para la canalización de 20Mhz, que confirma la necesidad de incrementar el número de eNodeB.

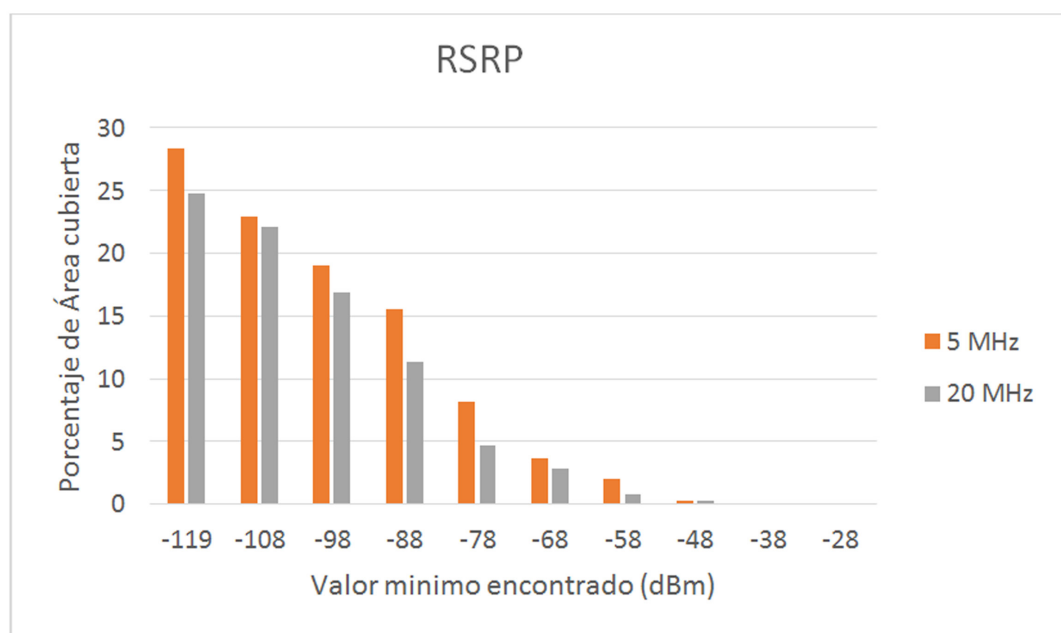


Figura 4.11. Comparación Cobertura RSRP: Cuatro Nodos Activos.

La mayor diferencia en función del ancho de banda asignado se observa respecto a niveles de SNIR. En la canalización de 20MHz el uso de la misma banda en todas las celdas adyacentes, o también denominado reúso de 1, aumenta la interferencia intercelular, en comparación con un reúso de 4 que se utilizó en la canalización de 5Mhz, Figura 4.7.

En la figura 4.14, para canalización de 20MHz, se observa un mayor porcentaje de área con niveles menores de SNIR entre 0dB y 5dB (Color Celeste y Verde), el efecto es notorio en el comportamiento del nodo BS4, Figura 4.12.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

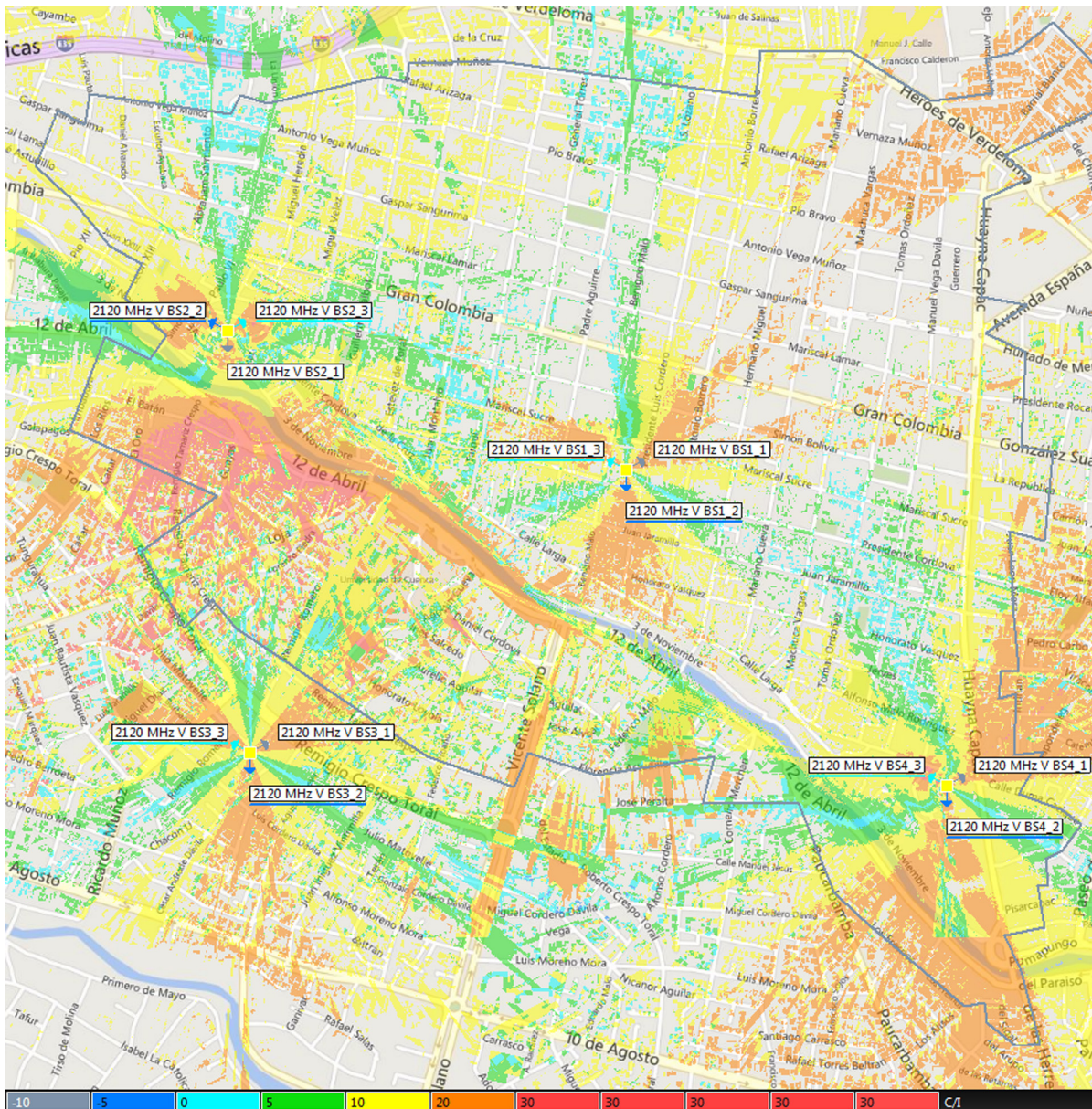


Figura 4.12. Predicción SNIR: Cuatro nodos activos - AB 20Mhz.



La comparación realizada en la Figura 4.13, demuestra en los dos niveles superiores de SNIR (20dB y 30dB) que para el caso de 20MHz un mayor porcentaje de área posee valores de 20dB sin superar los 30dB como sucede para 5MHz.

De igual manera en los niveles inferiores, para 20MHz un menor porcentaje de área alcanza valores de 10dB, y un mayor porcentaje se encuentra entre los niveles de 0dB y 5dB. Por lo tanto, se concluye que los efectos de interferencia co-canal, producidos por canalización de 20MHz, no afectan de manera uniforme a toda la red, sin embargo, si se obtiene un comportamiento degradado a diferencia de una canalización de 5Mhz. Por lo que en 20MHz se requiere de un ajuste de mayor precisión de cada una de las celdas para disminuir su solapamiento.

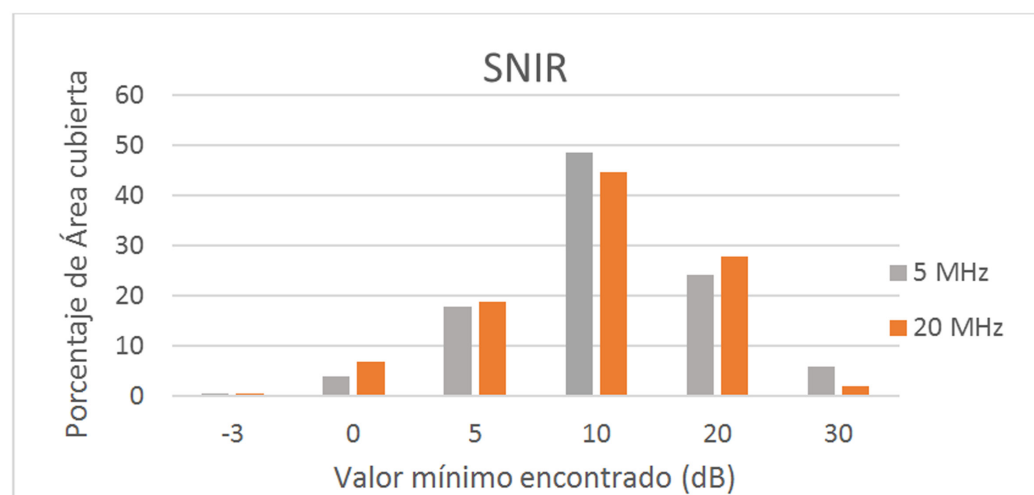


Figura 4.13. Comparación Nivel SNIR: Cuatro Nodos Activos.

El cálculo de capacidad se basa también en la Figura 4.8. El uso de un ancho de banda de 20MHz, cuadruplica la cantidad de recursos disponibles, obteniéndose velocidades máximas de 98Mbps y en las zonas de menor SNIR velocidades entre 15 y 25 Mbps, de acuerdo a la Figura 4.14.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

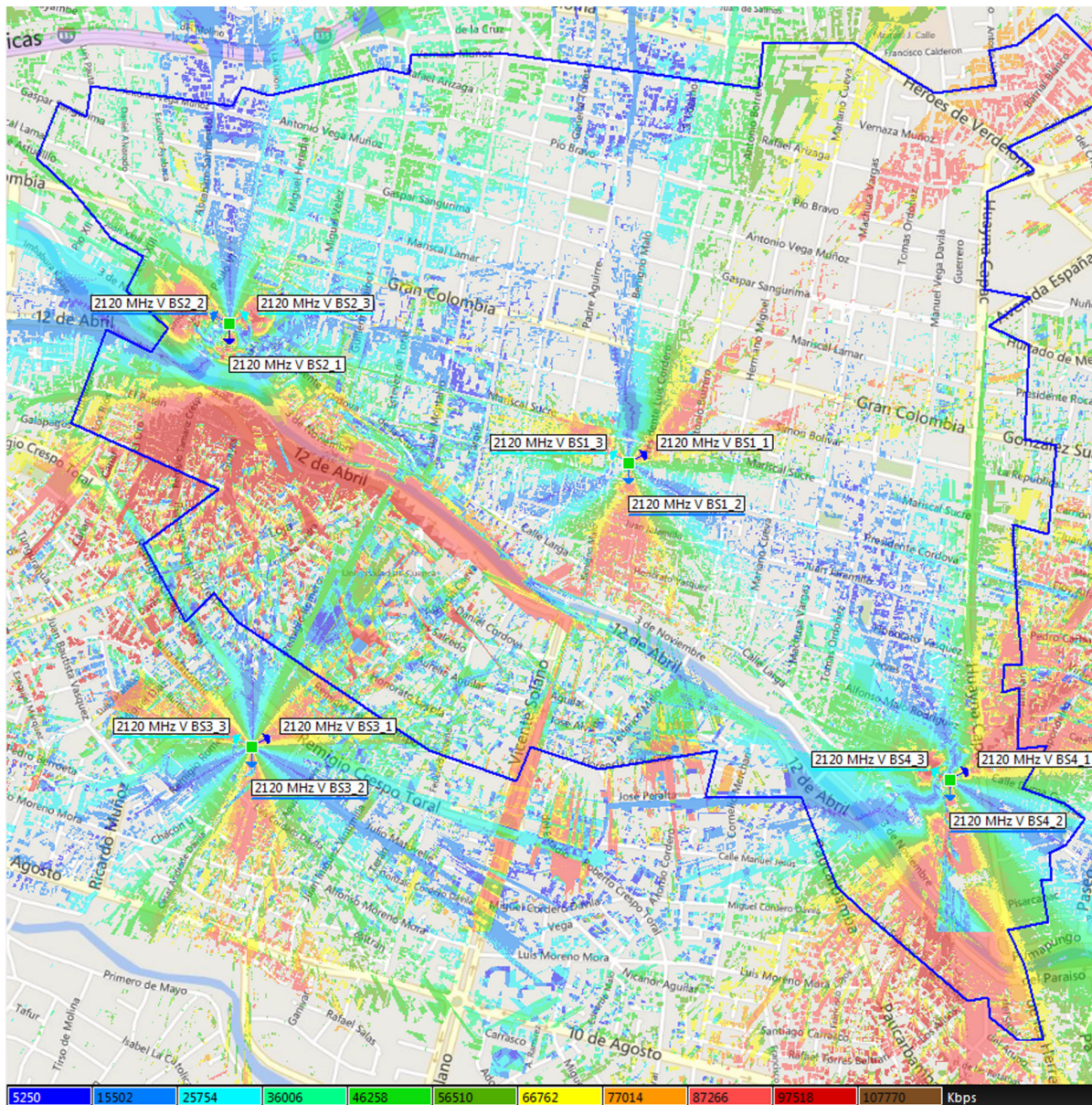


Figura 4.14. Predicción de Rendimiento: Cuatro nodos activos - AB 20Mhz.

La comparación de capacidad para cada esquema de red se presenta en la Figura 4.15, donde es notorio la superioridad de las tasas de datos que se pueden alcanzar con un ancho de banda de 20Mhz.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

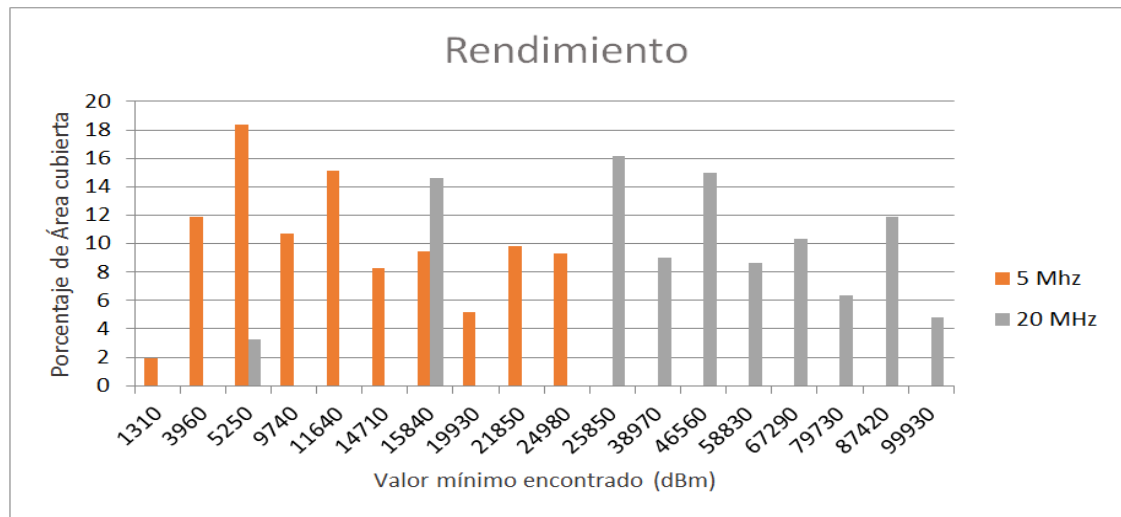


Figura 4.15. Comparación Rendimiento: Cuatro Nodos Activos.

A continuación se modifica la red aumentando el número de estaciones base e-no-deB para satisfacer los requerimientos de cobertura principalmente en la zona norte del área en estudio.

105

4.4. RED LTE: 7 ESTACIONES ACTIVAS.

Con el objetivo de priorizar el uso de infraestructura existente en el centro histórico de la ciudad, en la Figura 4.16, se indica mediante un recuadro negro las ubicaciones de las radio bases pertenecientes a la operadora CNT para redes 2G y 3G.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

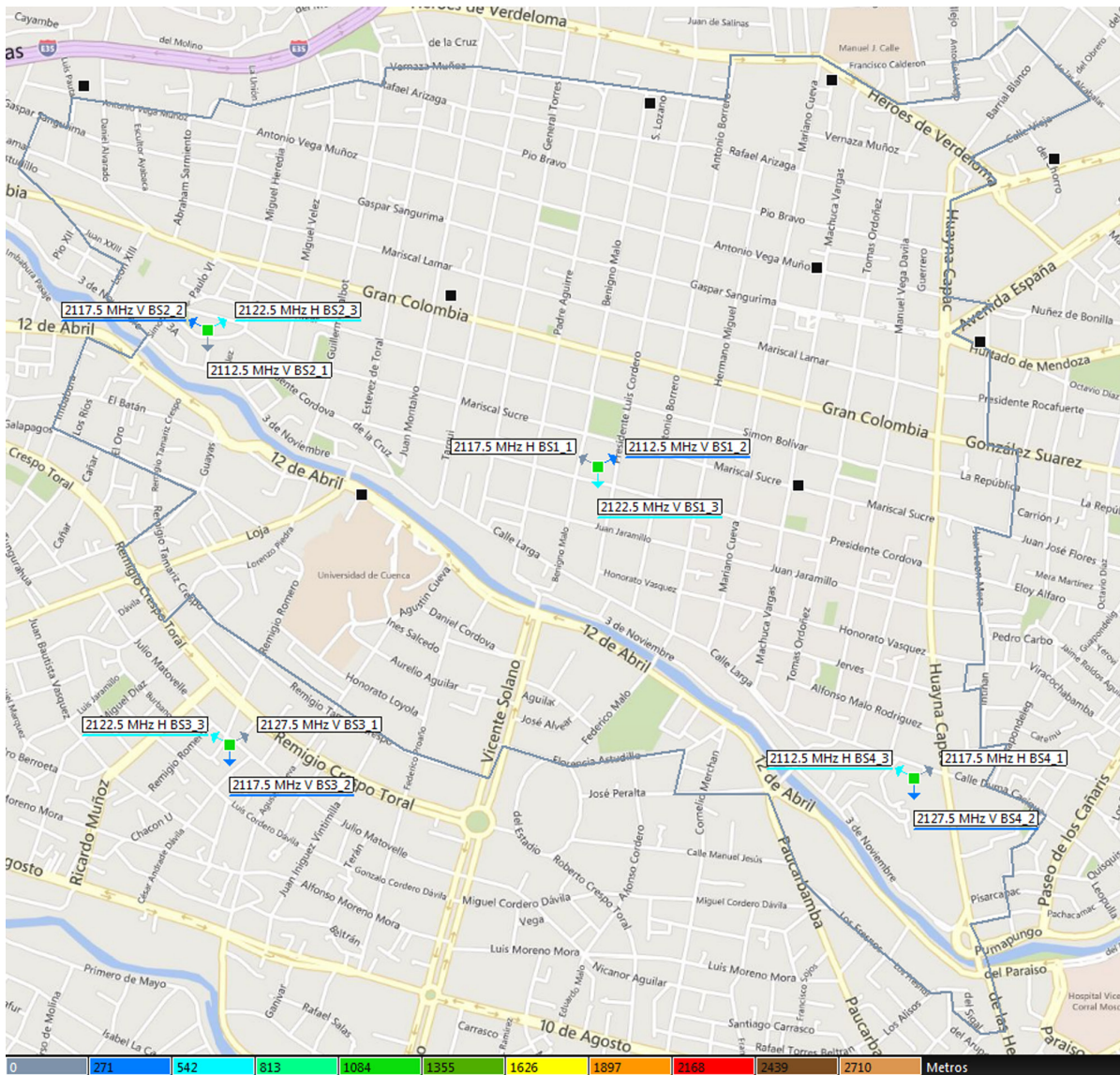
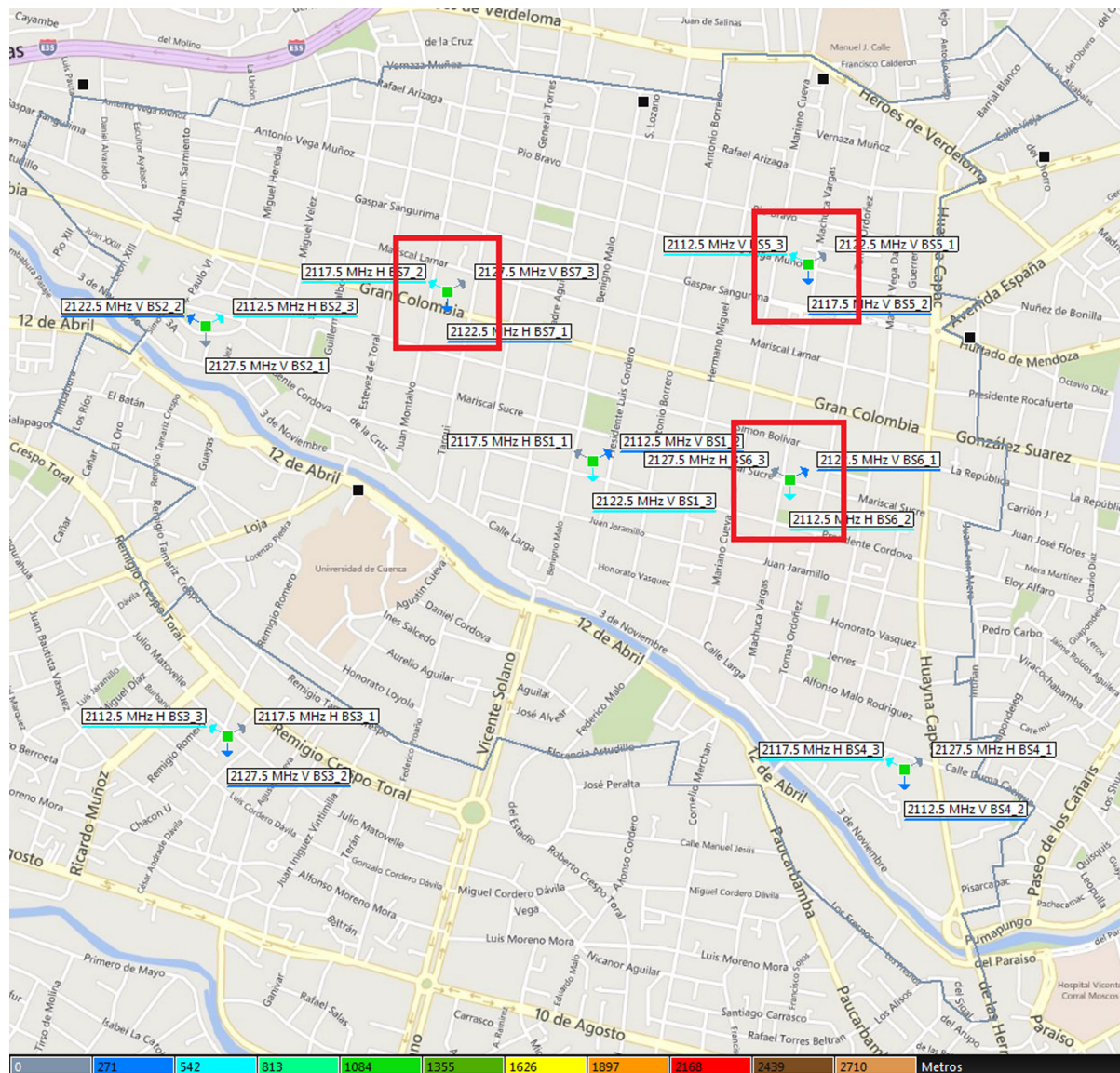


Figura 4.16. Ubicación infraestructura de operadora CNT.

En consideración de las zonas de mayor sombra de cobertura de la Figura 4.5, se activan 3 estaciones base adicionales que se señalan mediante un cuadrado rojo en la Figura 4.17. La configuración de las mismas se basa en la Tabla 3.7 manteniendo un ancho de banda de 5MHz por sector de acuerdo al diseño propio de la operadora CNT. Las coordenadas y características de altura y tilt establecidos se presentan en la Tabla 4.4.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA



107

Figura 4.17. Nodos BS5-BS6-BS7 activados.

Nodos B	Descripción	Latitud	Longitud	Altura (m)	Tilt(°)
BS5	Antonio Vega Muñoz y Av. Mariano Cueva	2°53'37.54" S	78°59'58.42" O	30	-6.8
BS6	Mariscal Sucre y Vargas Machuca	2°53'56.1" S	78°59'59.96" O	32	-7.7
BS7	Juan Montalvo entre Mariscal Lamar y Gran Colombia	2°53'39.95" S	79°0'29.41" O	30	-6.8

Tabla 4.4. Configuración nodos BS5-BS6-BS7.



De acuerdo a los resultados de cobertura de la Figura 4.18, es notoria la mejora de cobertura en las grandes zonas de sombra de la parte norte del área en estudio en comparación con la Figura 4.5 que pertenece a la red de 4 nodos activos. En la Figura 4.18, se alcanzan niveles superiores a -68dBm y -58dBm en áreas cercanas a los nodos adicionales, valores que rodeaban los -98dBm o no superaban el límite de -120dBm en la simulación anterior, de acuerdo a la Figura 4.15. En los bordes de las nuevas celdas se obtienen niveles de -88dBm y -78dBm, los cuales llegaban hasta máximo -98dBm o -108dBm en la red de 4 nodos activos.

En la nueva red de 7 nodos activos, los niveles de -119dBm a -108dBm se presentan únicamente en zonas de altas pérdidas de propagación generadas por las altas edificaciones.

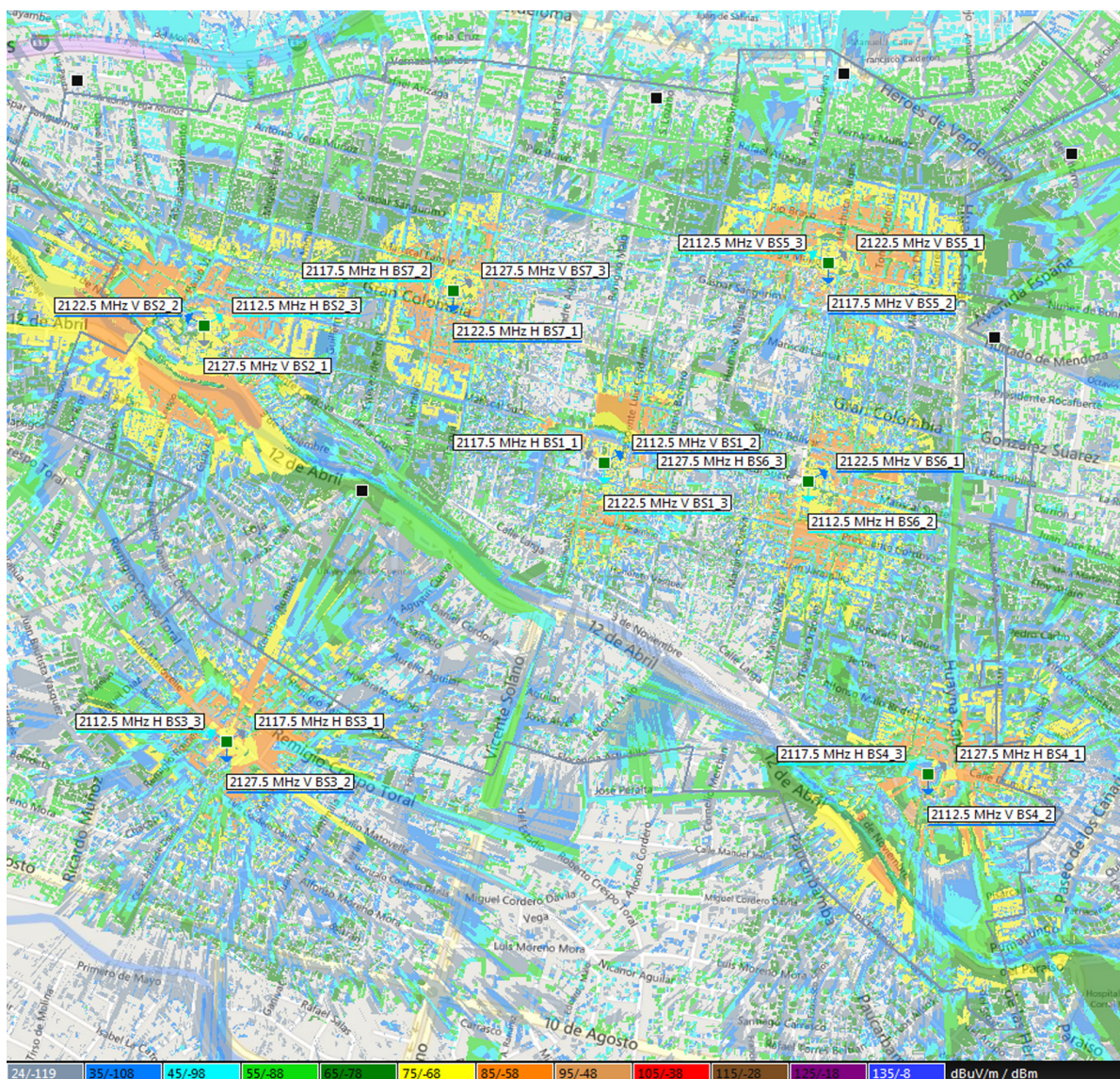
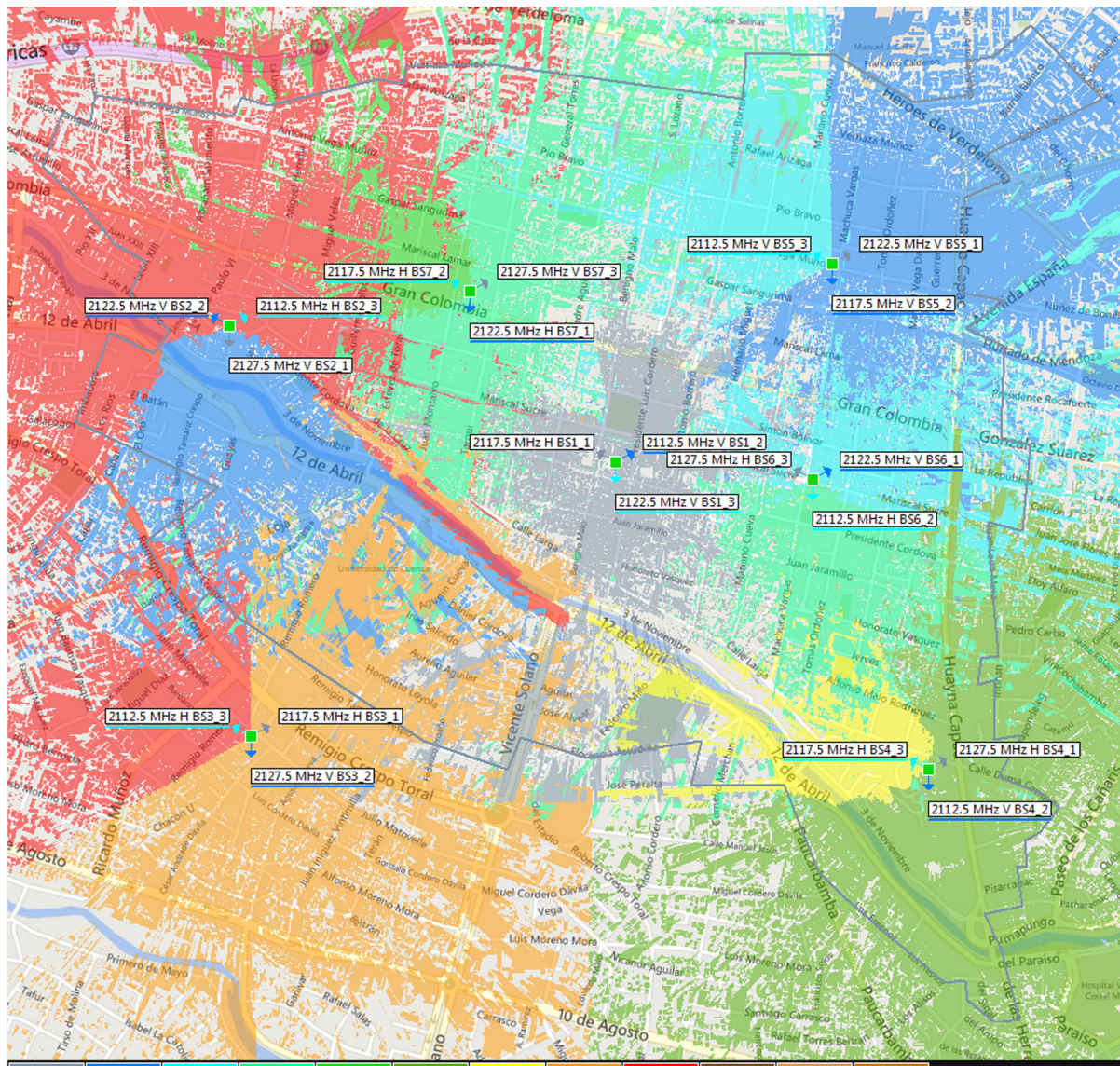


Figura 4.18. Cobertura RSRP: Siete nodos activos.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA



109

Figura 4.19. Cobertura de mejor servidor: Siete estaciones activas.

El comportamiento individual de cada nodo se presenta en la Figura 4.19, donde se observa, por ejemplo que la Catedral de la Inmaculada Concepción de 50m de altura aproximadamente produce sombra a las señales propagadas por el nodo BS1. Este inconveniente de la zona central de la ciudad de Cuenca, por la densidad de altas edificaciones, no es único para la tecnología LTE, ya que las mismas particularidades se presentan para las tecnologías 3G, siendo esto un problema para satisfacción de calidad de servicio para todas las operadoras, de acuerdo a la ARCOTEL.

En la Figura 4.20 se presenta la simulación de cobertura de la red, luego de modificar el azimuth, ángulo contado en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

geográfico que indica la dirección a la que apuntan las antenas de cada sector. Se modifica específicamente los nodos BS1, BS2, BS5, BS6 y BS7, cuya nueva dirección se puede comparar con la Figura 4.17.

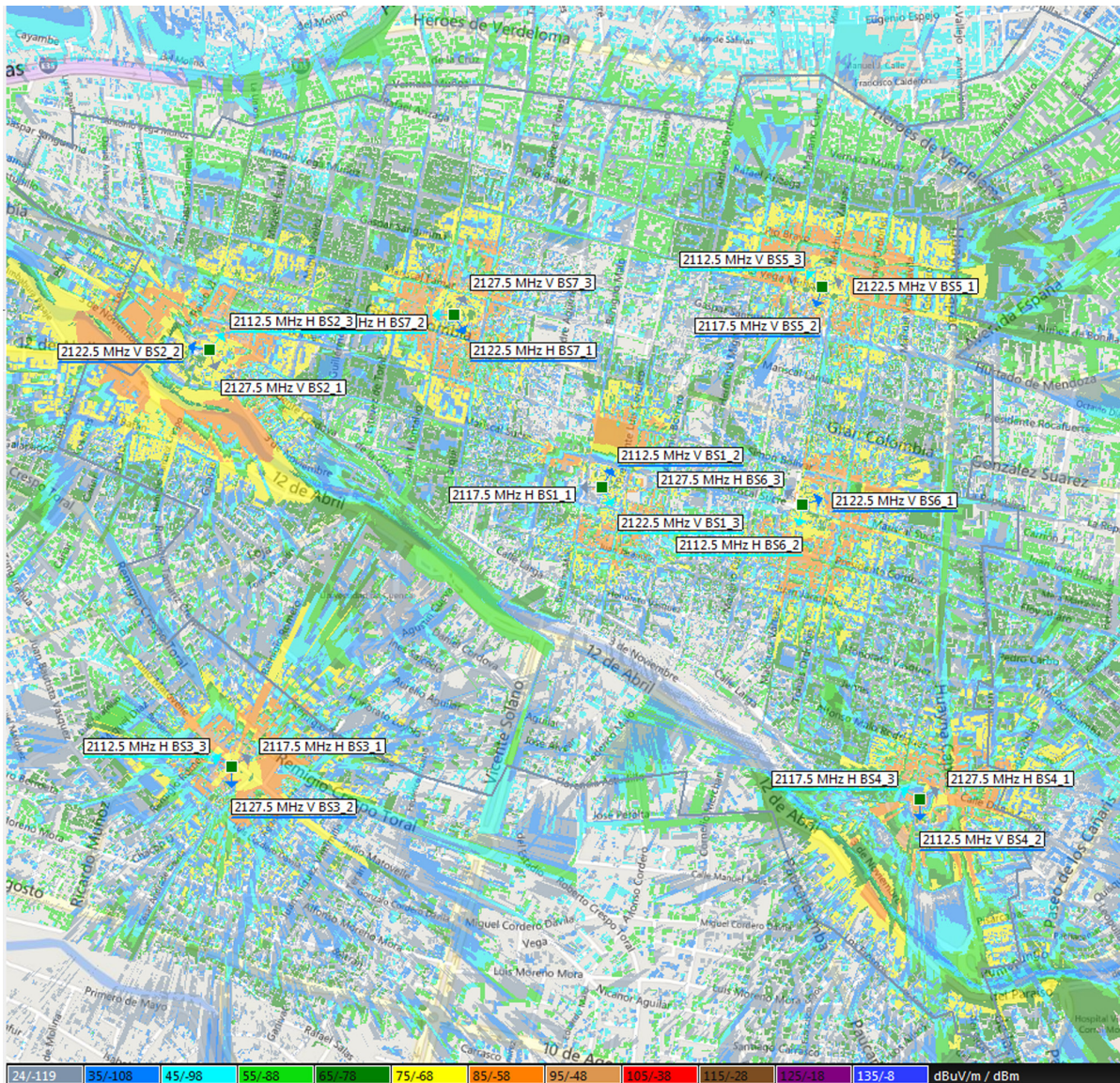


Figura 4.20. Cobertura RSRP: Modificación Azimuth.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Una comparación respecto a niveles de cobertura se indica en la Figura 4.21, donde se observa una diferencia total mínima entre las dos redes, sin embargo se mantiene las nuevas direcciones de antena ya que se han escogido en función de las zonas de sombra producidas por pérdidas de difracción por altas edificaciones.

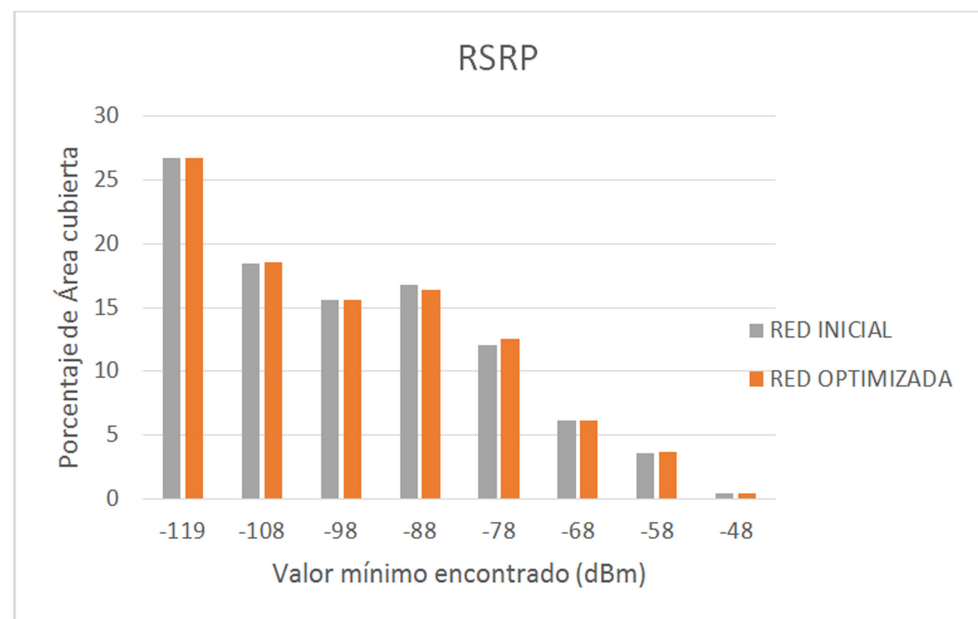


Figura 4.21. Comparación RSRP: Red de 7 nodos.

Los resultados respecto a la relación señal a interferencia más ruido generada (SNIR) en la red de 7 nodos con variación de azimuth se exhiben en la Figura 4.22. Cabe mencionar que se mantiene un factor de reúso de frecuencias de 4, que permite controlar la interferencia intercelular, obteniéndose niveles de SNIR superiores a 10 dB en un 43% del área, de acuerdo la gráfica comparativa de la Figura 4.35.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA



Figura 4.22. Predicción SNIR: Siete nodos activos.

Los valores de capacidad máximos obtenidos por celda se observan en la Figura 4.23, donde un porcentaje de área de 15% alcanza una velocidad de 6.4Mbps y un porcentaje de 14% la velocidad máxima de 25Mbps, de acuerdo a las estadísticas presentadas en la Figura 4.36.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

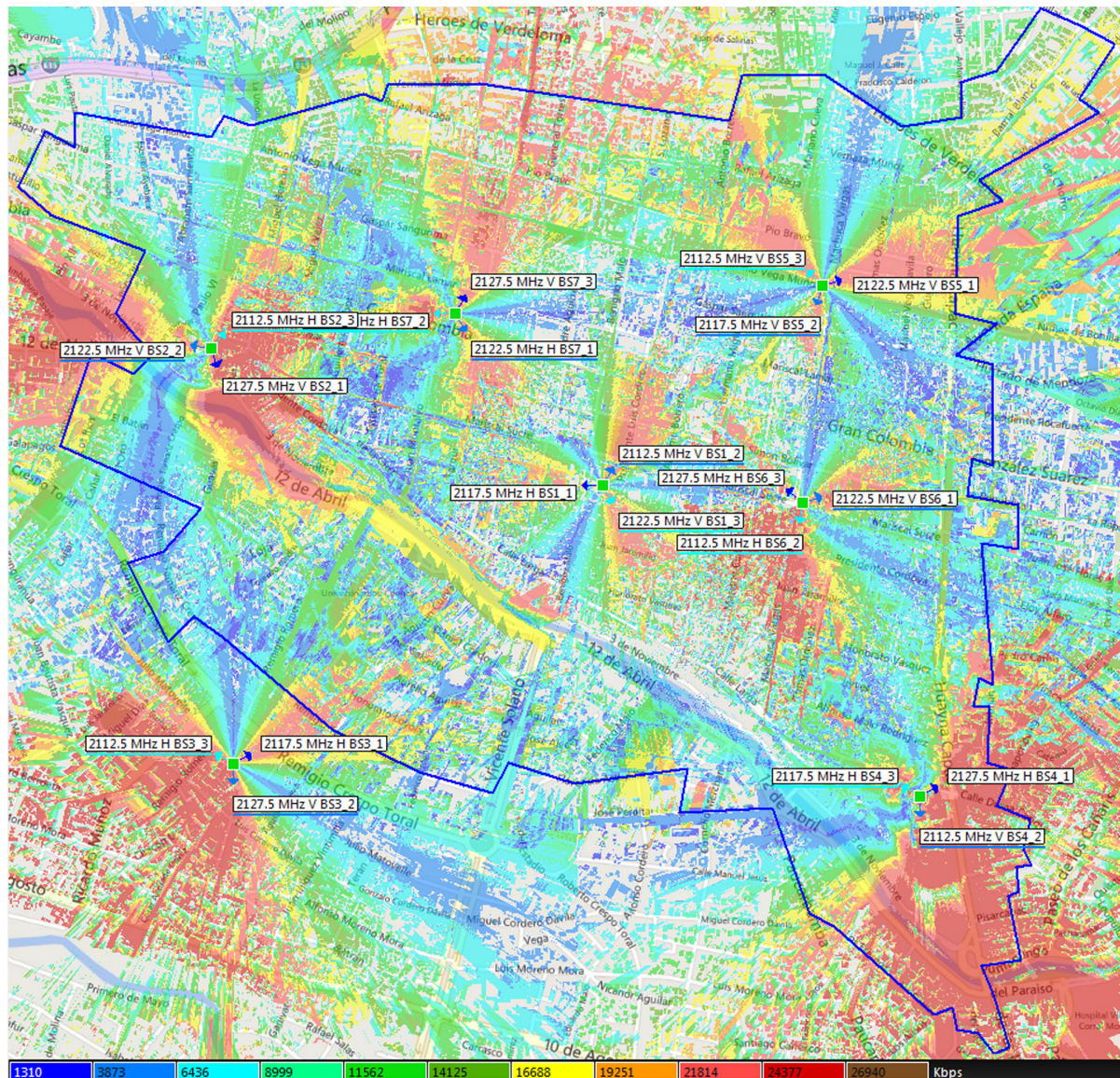


Figura 4.23. Predicción de Rendimiento: Siete nodos activos.

4.5. RED LTE: 10 ESTACIONES ACTIVAS.

De acuerdo al esquema de infraestructura de la operadora CNT, se activan 3 estaciones base adicionales, cuya ubicación se indica en la Figura 4.24 junto con sus características en la Tabla 4.5.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Nodos B	Descripción	Latitud	Longitud	Altura (m)	Tilt(°)
BS8	Benigno Malo y Rafael María Arízaga	2°53'23.53" S	79°0'12.6" O	20	-3.2
BS9	Luis Pauta y Antonio Vega Muñoz	2°53'22.16" S	79°1'0.64" O	18	-3.4
BS10	Av. 12 de Abril y Pasaje Manuel Agustín Aguirre	2°53'57" S	79°0'37" O	20	-4.5

Tabla 4.5. Configuración nodos BS8-BS9-BS10.

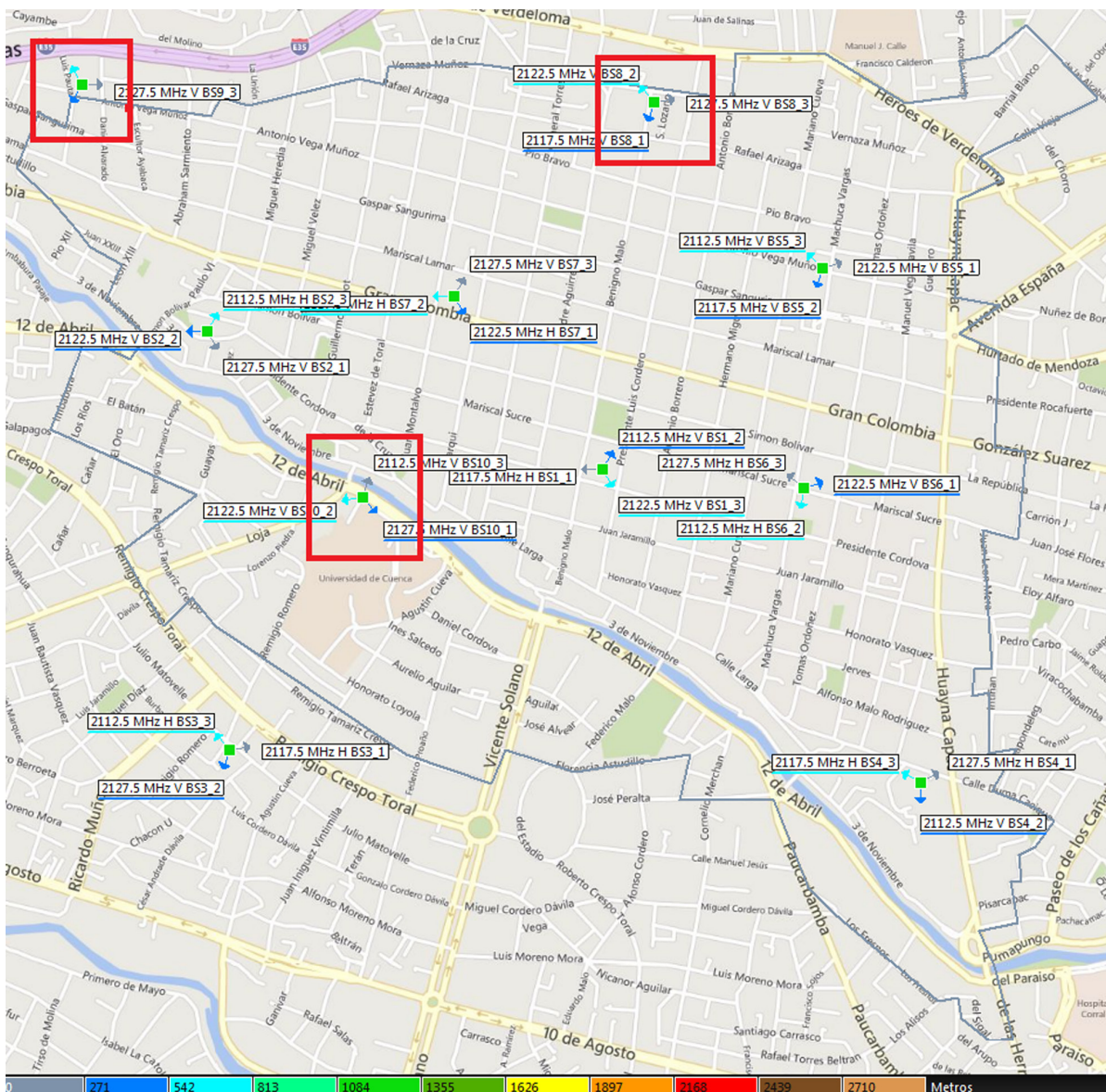


Figura 4.24. Nodos BS8-BS9-BS10 activados.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Los nodos BS8 y BS9 se activan para mejorar los valores de nivel de potencia en el borde del área de estudio, y el nodo BS10 para mejorar la cobertura en dirección de la Av. Loja y en dirección de la Universidad de Cuenca. Como se observa en la Figura 4.25, se obtienen mejores niveles de potencia en las zonas requeridas, en comparación con la Figura 4.20 en la que estos nodos están inactivos. Sin embargo, el nodo BS10 no alcanza niveles de potencia que superen los -78dBm en dirección de la Av. Loja.

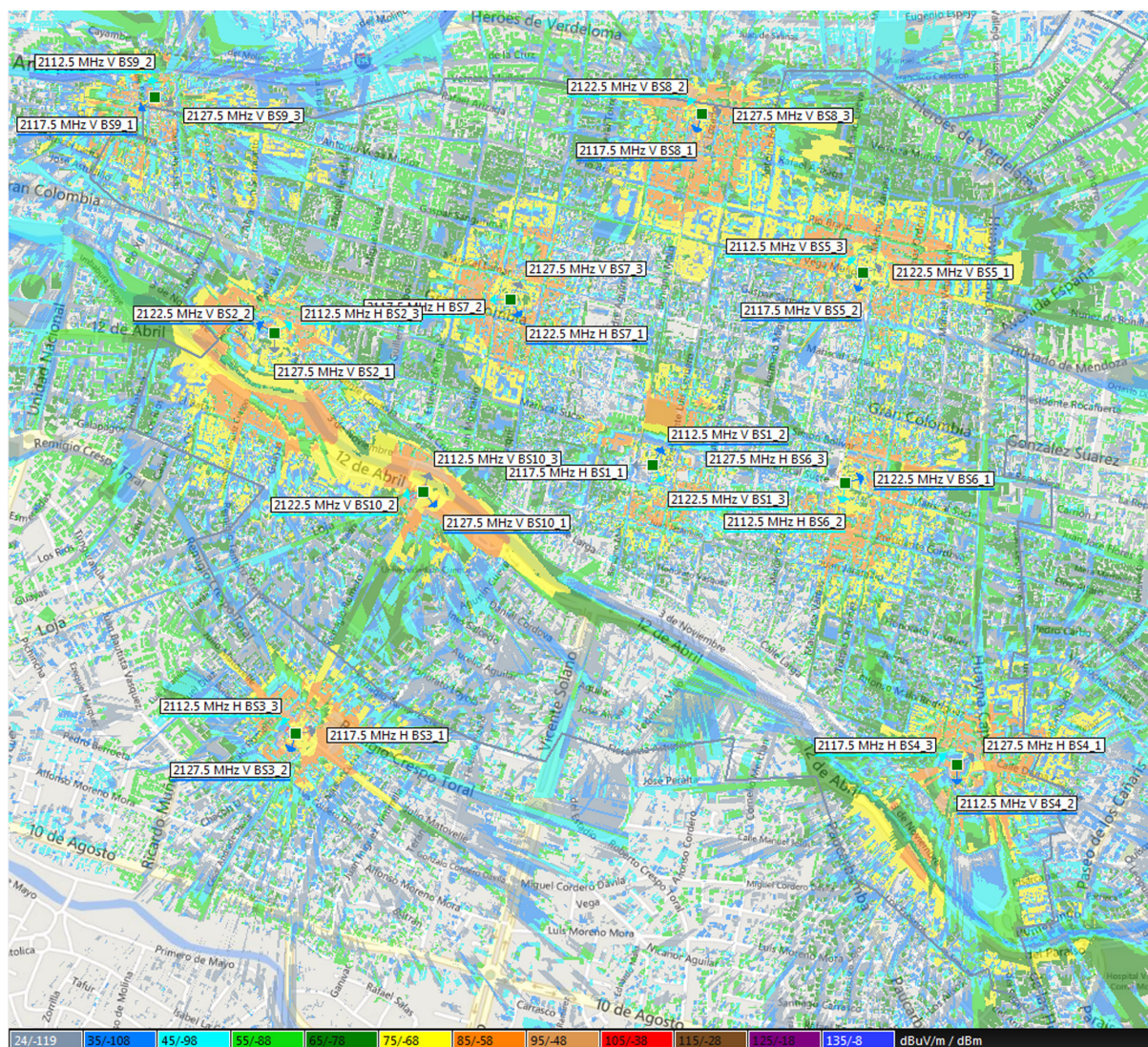


Figura 4.25. Cobertura RSRP: Diez nodos activos.



El mapa de mejor servidor de los nuevos nodos se presenta en la Figura 4.26. Donde se resalta en color rojo el comportamiento descrito para el nodo BS10, cuya cobertura se encuentra muy limitada en dirección de BS10_2.

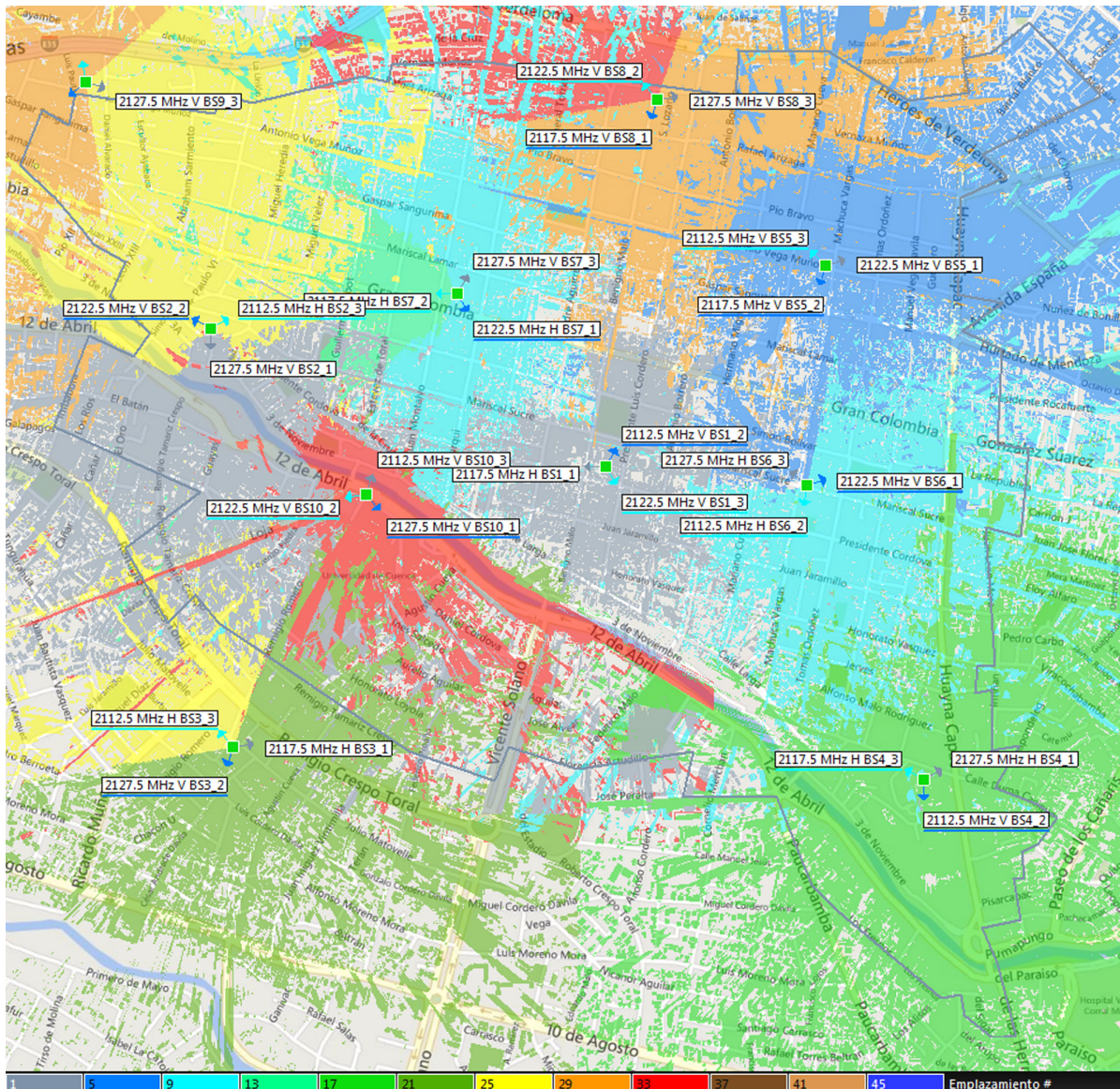


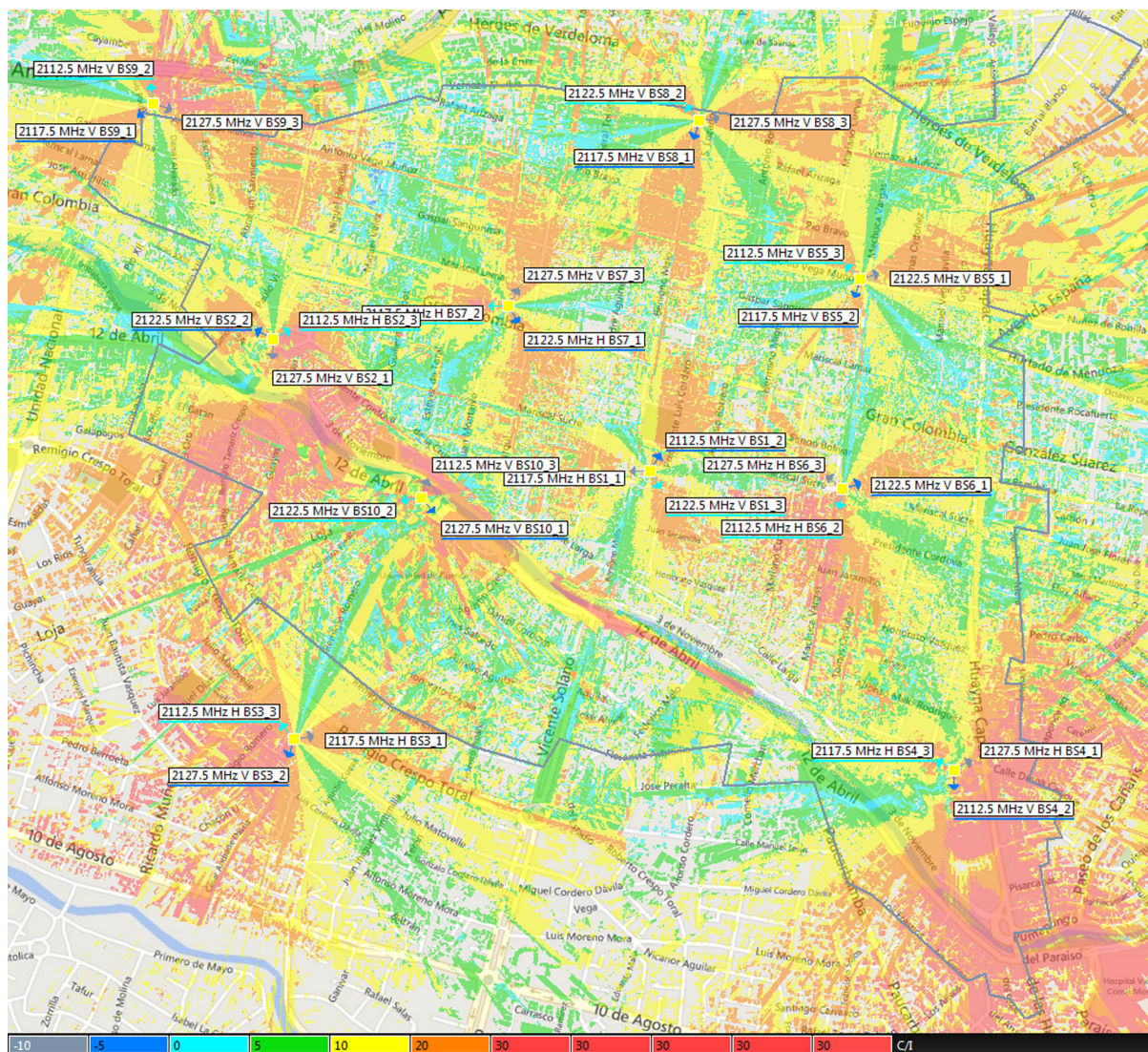
Figura 4.26. Cobertura de mejor servidor: Diez estaciones activas.

Se mantiene el esquema de reuso de frecuencias, asignando las bandas de 5MHz a los nuevos nodos de manera que la distancia entre sectores co-canal sea la mayor posible. Los resultados de SNIR y capacidad se presentan en las Figuras 4.27 y 4.28, los valores obtenidos son menores a los del esquema de red de 7 estaciones (Figuras 4.22 y 4.23), ya que se genera mayor interferencia al aumentar el número de nodos.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

El nivel de SNIR obtenido en un mayor porcentaje de área (41,3% según Figura 4.35) de la Figura 4.27 supera los 10dB, valor que permite el uso de modulación de orden 16QAM 2/3. En cambio, para la Figura 4.22, se mantiene un nivel de 10dB para un mayor porcentaje de área, pero ese último valor es superior (42.81% según Figura 4.35), lo que demuestra que se obtienen menores niveles de SNIR a medida que se aumenta el número de nodos.



117

Figura 4.27. Predicción de SNIR: Diez nodos activos.

Si se comparan los valores de rendimiento de las Figuras 4.23 (Red de 7 nodos) y la Figura 4.28 (Red de 10 nodos), se obtiene de acuerdo a la Figura 4.36 estadística, que para la red de 7 nodos activos un 29% de área soporta velocidades menores a 8,9Mbps, en cambio para la red de 10 nodos el área que soporta las velocidades mencionadas es mayor alcanzando un 34%.



Para las velocidades altas sucede lo contrario, ya que la red de 7 nodos soporta velocidades mayores a 16.8Mbps en un área de 40,6%, y la red de 10 nodos soporta estas velocidades en un área menor de 37%. Por lo tanto, se tiene un mejor rendimiento con la red de 7 nodos debido a que se evita interferencia, pero a coste de menores niveles de potencia de cobertura.

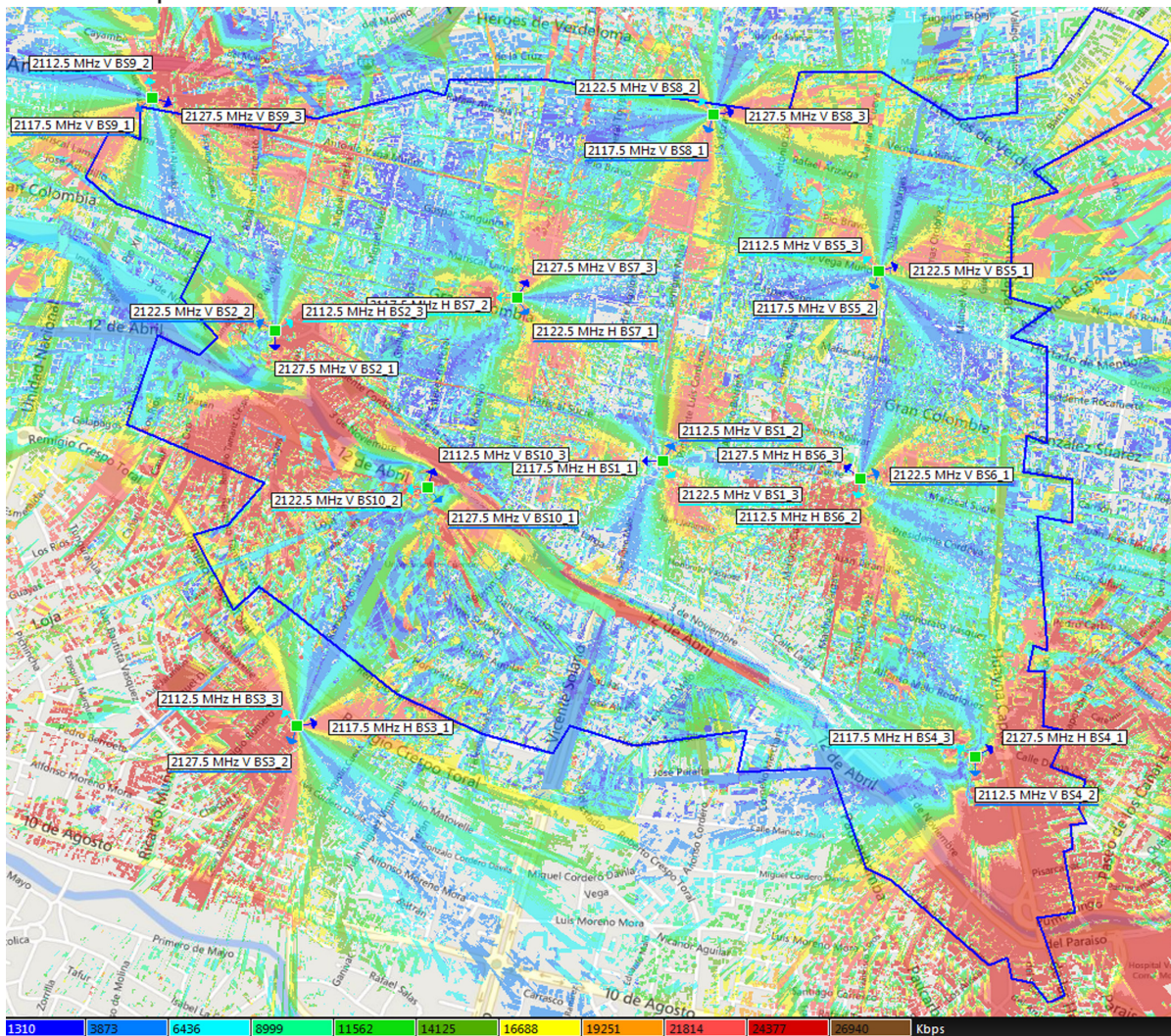


Figura 4.28. Predicción de capacidad: Diez nodos activos.

4.6. RED LTE: 12 ESTACIONES ACTIVAS.

La falta de cobertura en la zona central genera la necesidad de buscar una solución para lograr mejorar los niveles de potencia de recepción en esa zona, la propuesta que se plantea es la de aumentar el número de nodos desplegados. Estas estaciones base adicionales cumplirán con la necesidad de incrementar el nivel de cobertura además de aumentar la capacidad de la red, sin embargo se requiere un reajuste de la misma para disminuir el solapamiento entre celdas vecinas.

El nuevo esquema de red se presenta en la Figura 4.29, donde se han añadido y activado dos estaciones base, BS11 y BS12. La operadora CNT no cuenta con estaciones base adicionales en la zona central, por lo que la ubicación de los nodos elegidos pertenece a torres de antenas de la operadora Movistar, con el objetivo de plantear la posibilidad de uso compartido de estas estructuras y modificar el diseño de red sin necesitar instalar nuevas torres en el centro Histórico de la ciudad de Cuenca.

La Tabla 4.6 presenta los parámetros de configuración de los nodos BS11 y BS12, cuya potencia de transmisión es de 7W, ya que deben cubrir una menor área de servicio:



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Nodos B	Descripción	Latitud	Longitud	Altura (m)	Tilt(°)
BS11	Antonio Borrero y Mariscal Lamar	2°53'42.5" S	79°0'9.1" O	30	-10
BS12	Benigno Malo y Calle larga	2°54'4.9" S	79°0'19.9" O	25	-8

Tabla 4.6. Configuración nodos BS11-BS12.

Los niveles de cobertura superiores en la zona central de la red de 12 radiobases se pueden diferenciar de manera visual entre las Figuras 4.30 (12 nodos activos) y 4.25 (10 nodos activos), con lo que se disminuye el porcentaje de zonas de sombra que ahora superan el límite de RSRP de -120dBm, alcanzando niveles de cobertura aceptables en casi toda el área de estudio.

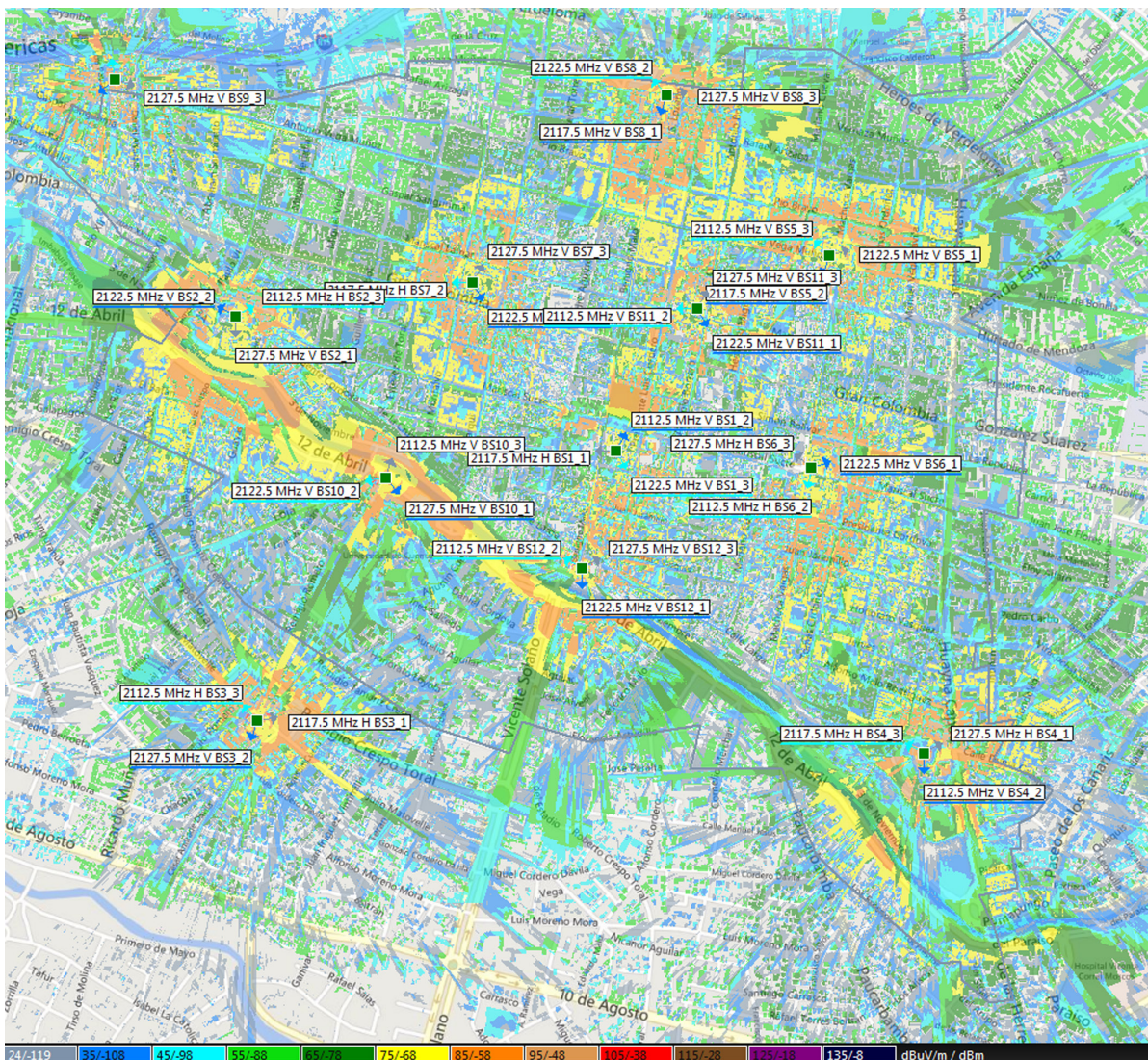


Figura 4.30. Cobertura RSRP: Doce nodos activos.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

De acuerdo a la imagen 4.31 donde se presenta la simulación de mejor servidor, se observa el comportamiento positivo del nodo BS12, cuya cobertura incluye la zona de la Av. Solano. Por su lado el nodo BS11 posee una cobertura limitada debido a su complicada ubicación respecto a la densidad y altura de edificaciones que lo rodean. Pero los niveles de potencia alcanzados en las zonas de cada nodo son superiores, si se compara las Figuras 4.25 (10 nodos activos) y 4.30 (12 nodos activos) de simulación de cobertura RSRP.

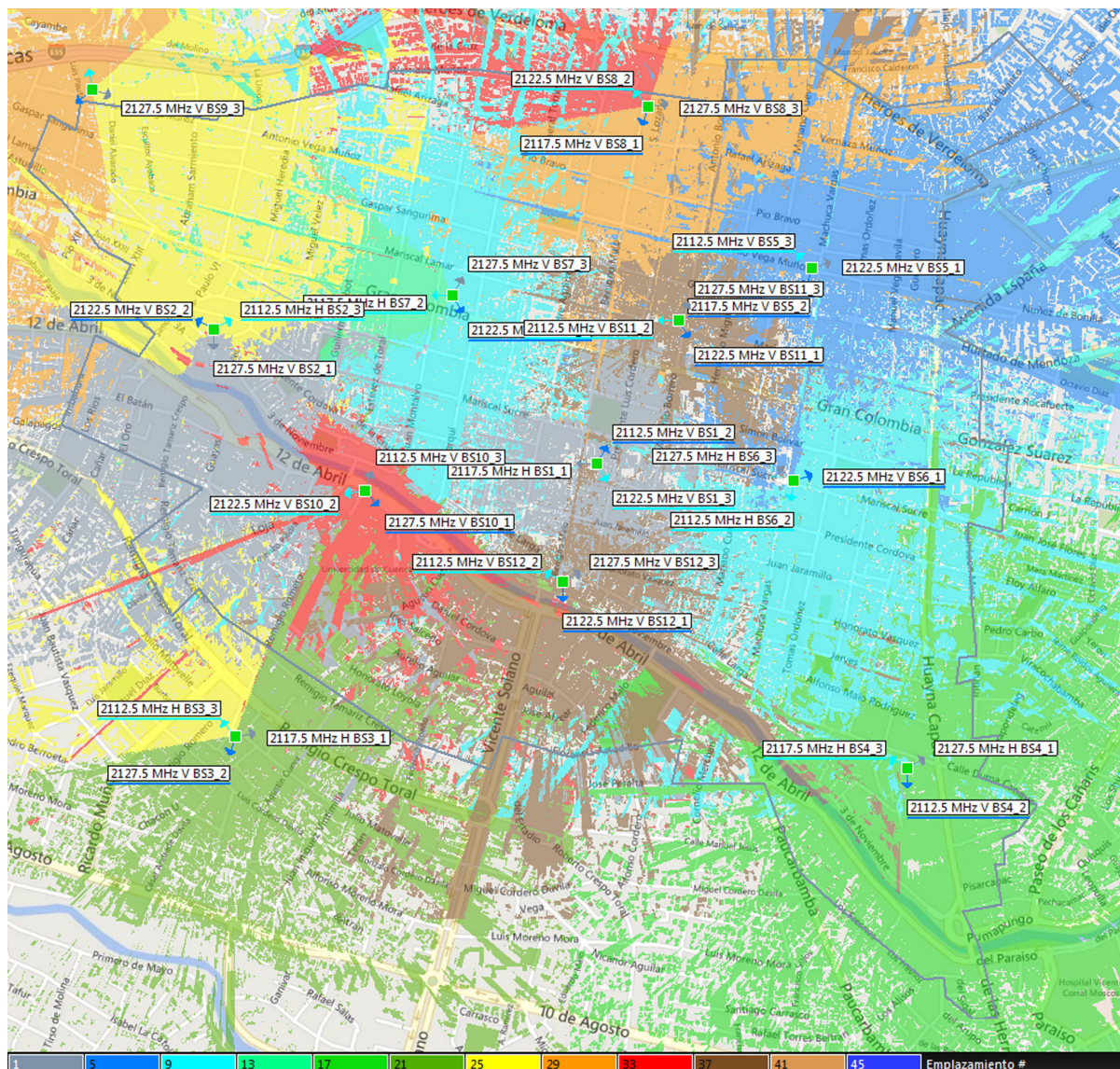


Figura 4.31. Cobertura de mejor servidor: Doce estaciones activas

DANIELA BARRERA SALAMEA

EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

La Figura 4.33 ilustra en el mapa los valores máximos de rendimiento alcanzados, donde en un 17% de área cubierta se obtiene velocidades de 6.4Mbps y en un 15% velocidades superiores a 24,9Mbps, de acuerdo a la gráfica 4.36.

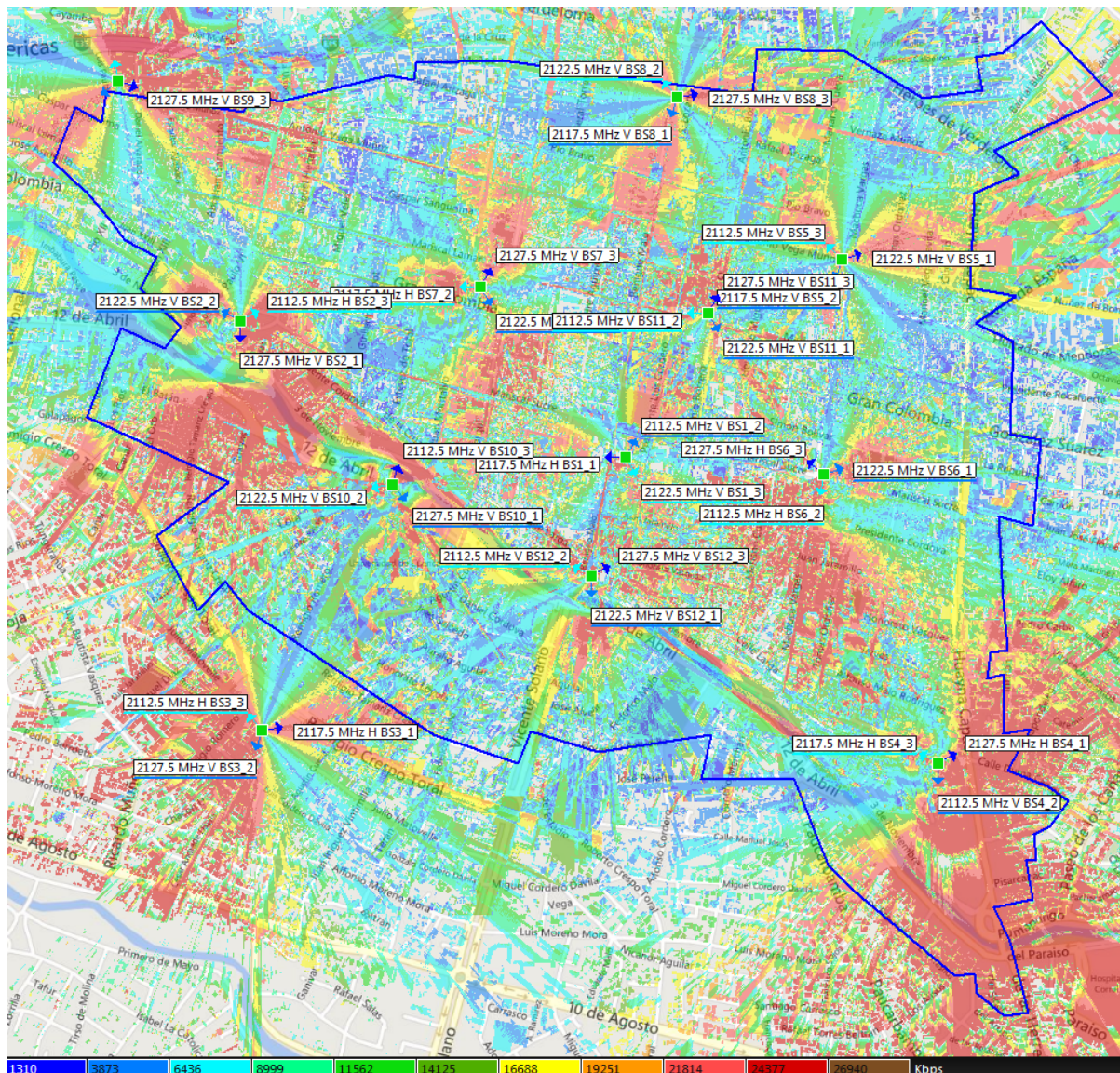


Figura 4.33. Predicción de rendimiento: Doce nodos activos.



A continuación, se presentan las figuras comparativas de las simulaciones realizadas con 7, 10 y 12 nodos activados, de las respectivas predicciones de RSRP, SNIR y rendimiento, a las cuales se ha hecho referencia anteriormente por valores estadísticos. A medida que aumenta el número de nodos se varió el tilt de algunas radiobases para controlar su área de servicio y evitar solapamiento. Los parámetros finales se presentan en el ANEXO 1

En la Figura 4.34, la red de 12 nodos activos presenta mayores porcentajes de cobertura para todos los niveles de potencia, excepto para el nivel de -119 dBm, lo que representa una reducción de zonas de sombra y de áreas que se encuentran cerca del límite del nivel de cobertura definido. Sin embargo, este nivel (-119dBm) mantiene el mayor porcentaje de área cubierta.

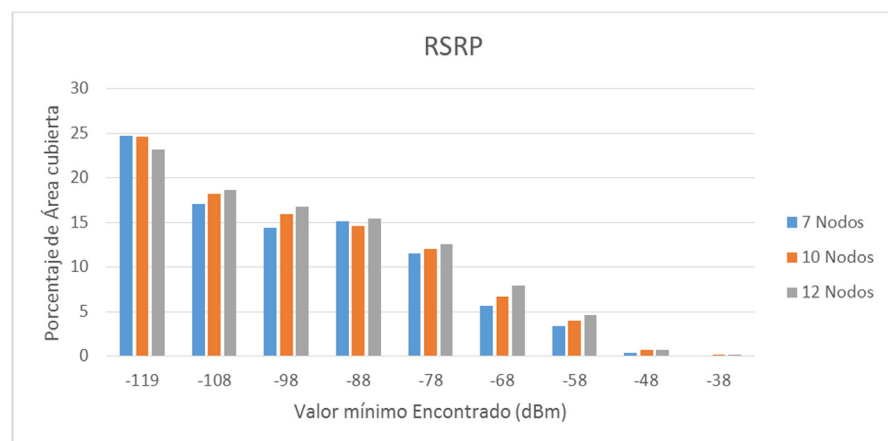


Figura 4.34. Comparación RSRP: Redes de 7,10 y 12 nodos.

El comportamiento de niveles de SNIR, Figura 4.35, demuestra que a pesar de tener un mayor número de nodos, el diseño de red de 12 nodos activos, posee niveles de SNIR mejores que la red de 10 nodos y comparables a la red de 7 nodos. Por ejemplo, el porcentaje de área cubierta con niveles superiores a 20dB e inferiores a 30dB es de un 25% por parte de la red de 12 nodos, de 22.7% por la red de 10 nodos y de 25.2% por la red de 7 nodos.

Si bien la diferencia es mínima, esto demuestra que la red de 12 nodos presenta buenas características para satisfacer los requerimientos del área de estudio.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

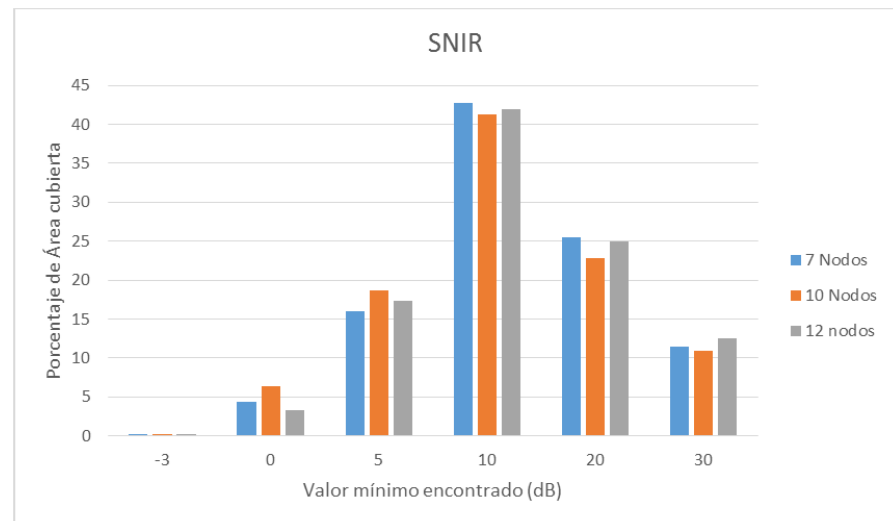


Figura 4.35. Comparación SNIR: Redes de 7,10 y 12 nodos.

Por último, respecto a rendimiento, Figura 4.36, si se considera velocidades de transmisión de datos mayores a 14,7Mbps, se puede concluir que la red de 12 nodos posee un porcentaje de área de 48.5% donde se supera la tasa de datos mencionada. Por su parte las redes de 10 y 7 nodos poseen porcentajes de área de 44,3% y 48,6% respectivamente que superan una velocidad de 14,7Mbps.

125

En general las 3 redes poseen altos porcentajes de área cubierta, para las velocidades de 6,4Mbps, 11,6Mbps y 24,9Mbps.

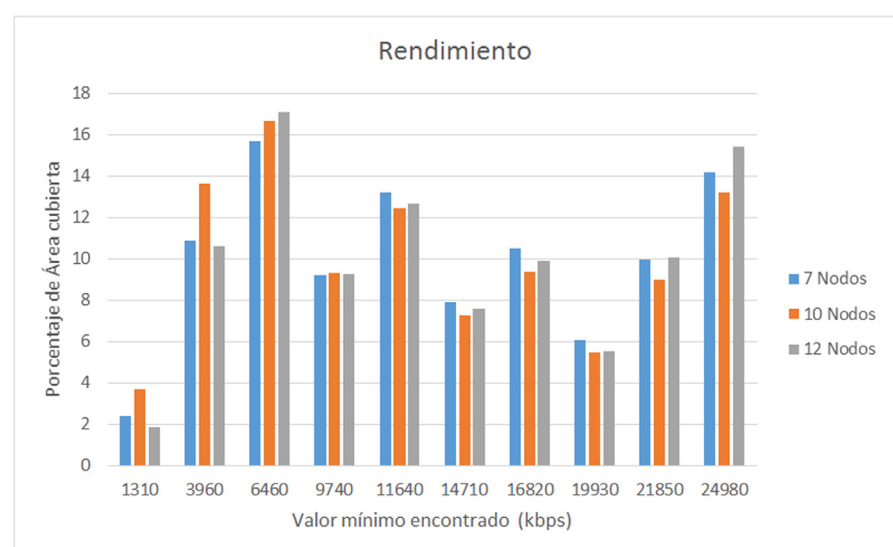


Figura 4.36. Comparación Rendimiento: Redes de 7,10 y 12 nodos.



4.7. COMPARACIÓN DE ANCHO DE BANDA

A partir de la última red simulada con 12 estaciones base activadas, se realiza una comparación del comportamiento de la misma cuando se varía el ancho de banda asignado a cada sector de la red. Los valores de ancho de banda utilizados son 10, 15 y 20MHz permitidos por el estándar 3GPP. [1]

Para un ancho de banda de 10MHz, se dispone únicamente de 2 segmentos de frecuencia, Tabla 4.7, que fueron configurados para su asignación a cada celda.

Bandas de Frecuencias (MHz)
2110-2120
2120-2130

Tabla 4.7. Bandas de Frecuencia de 10MHz

A continuación se presentan las imágenes de simulación de cobertura, SNIR y rendimiento correspondientes a un ancho de banda de 10MHz.

126

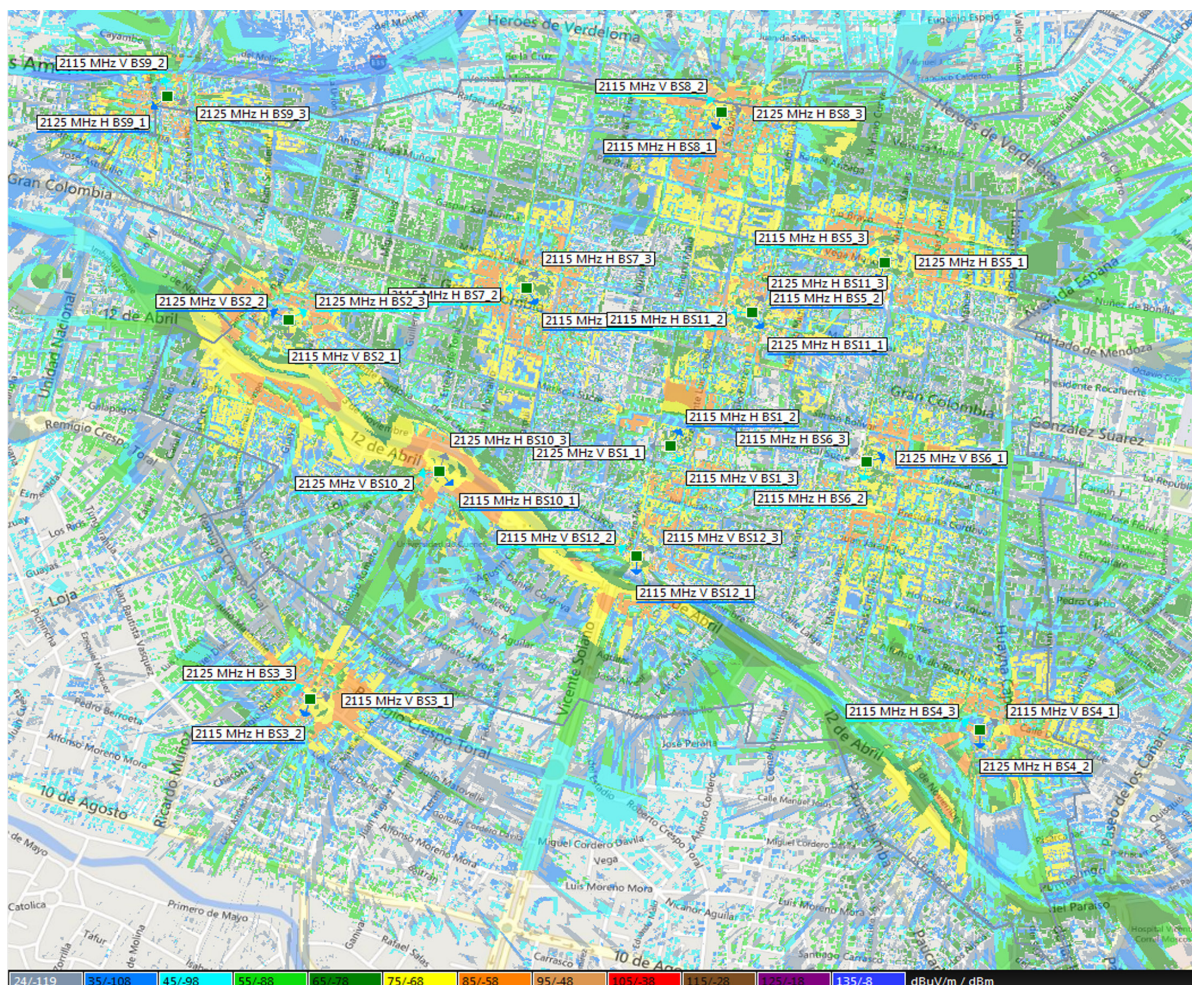


Figura 4.37. Cobertura RSRP: Ancho de Banda 10MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

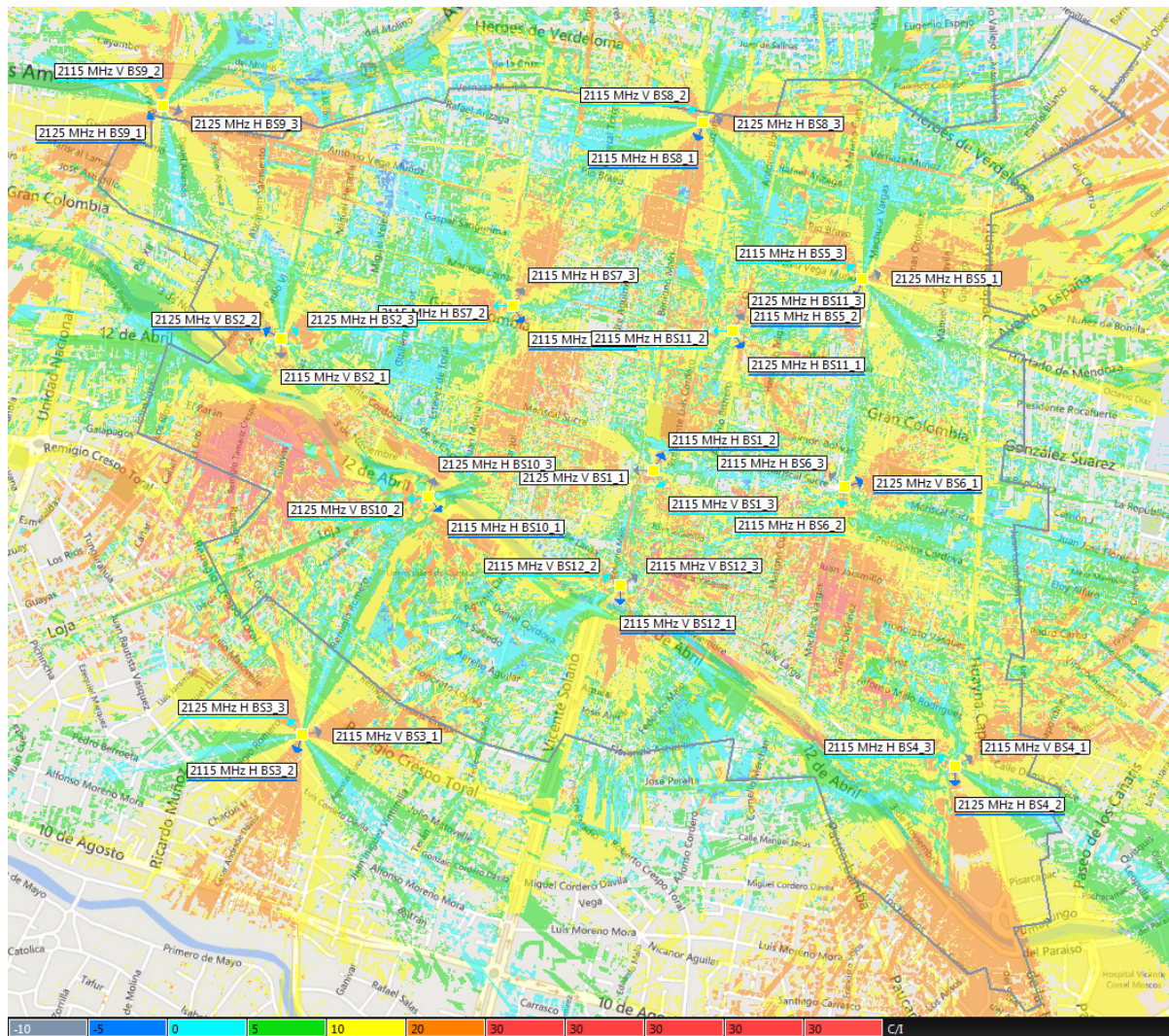


Figura 4.38. Predicción SNIR: Ancho de Banda 10MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

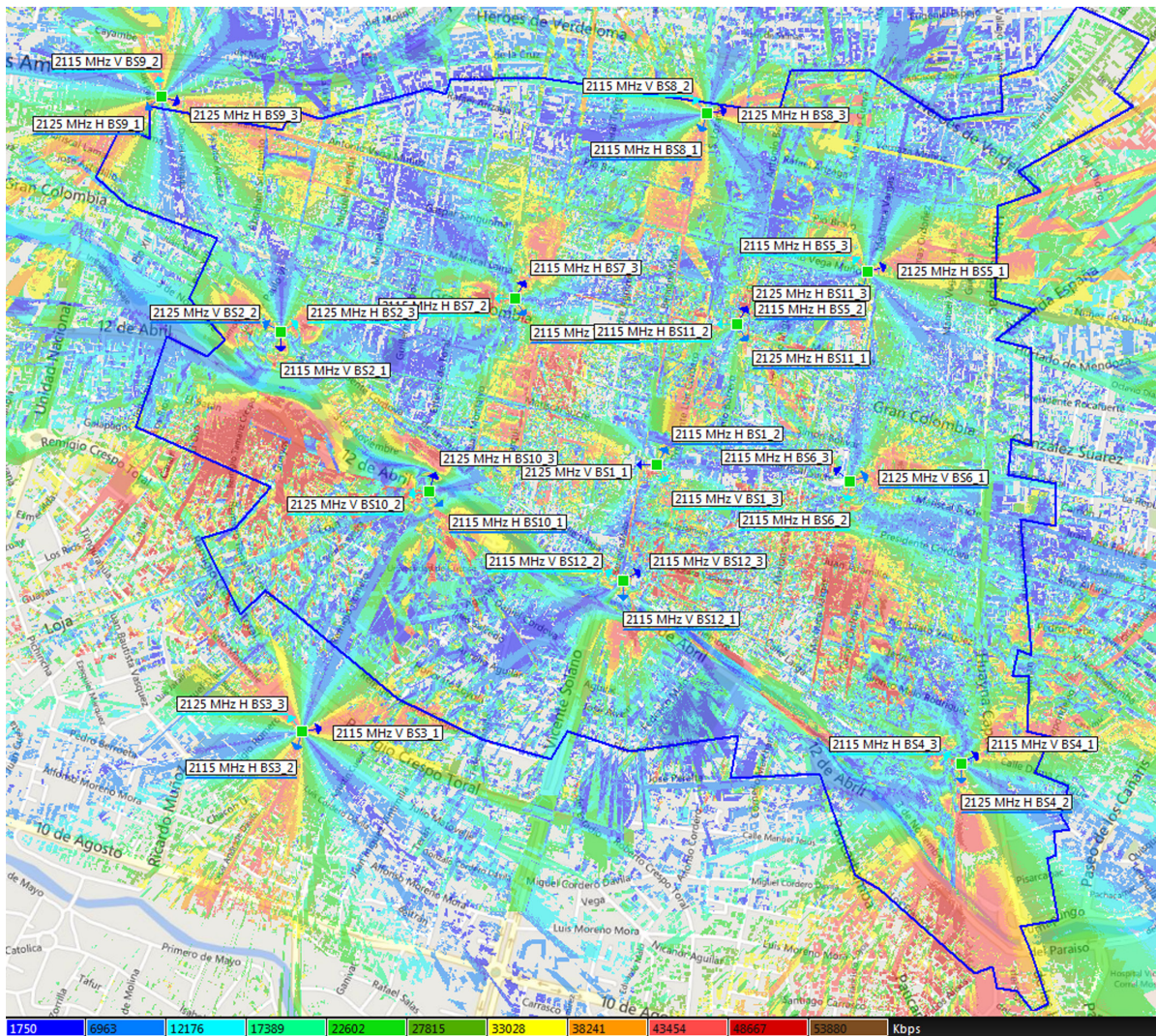


Figura 4.39. Predicción de Rendimiento: Ancho de Banda 10MHz

En cambio, para el esquema de 15MHz, no se puede dividir el ancho de banda disponible (20MHz) en un número exacto de segmentos de frecuencia, sin embargo se configuraron 2 segmentos que se indican en la Tabla 4.8.

Bandas de Frecuencias (MHz)

2110-2125

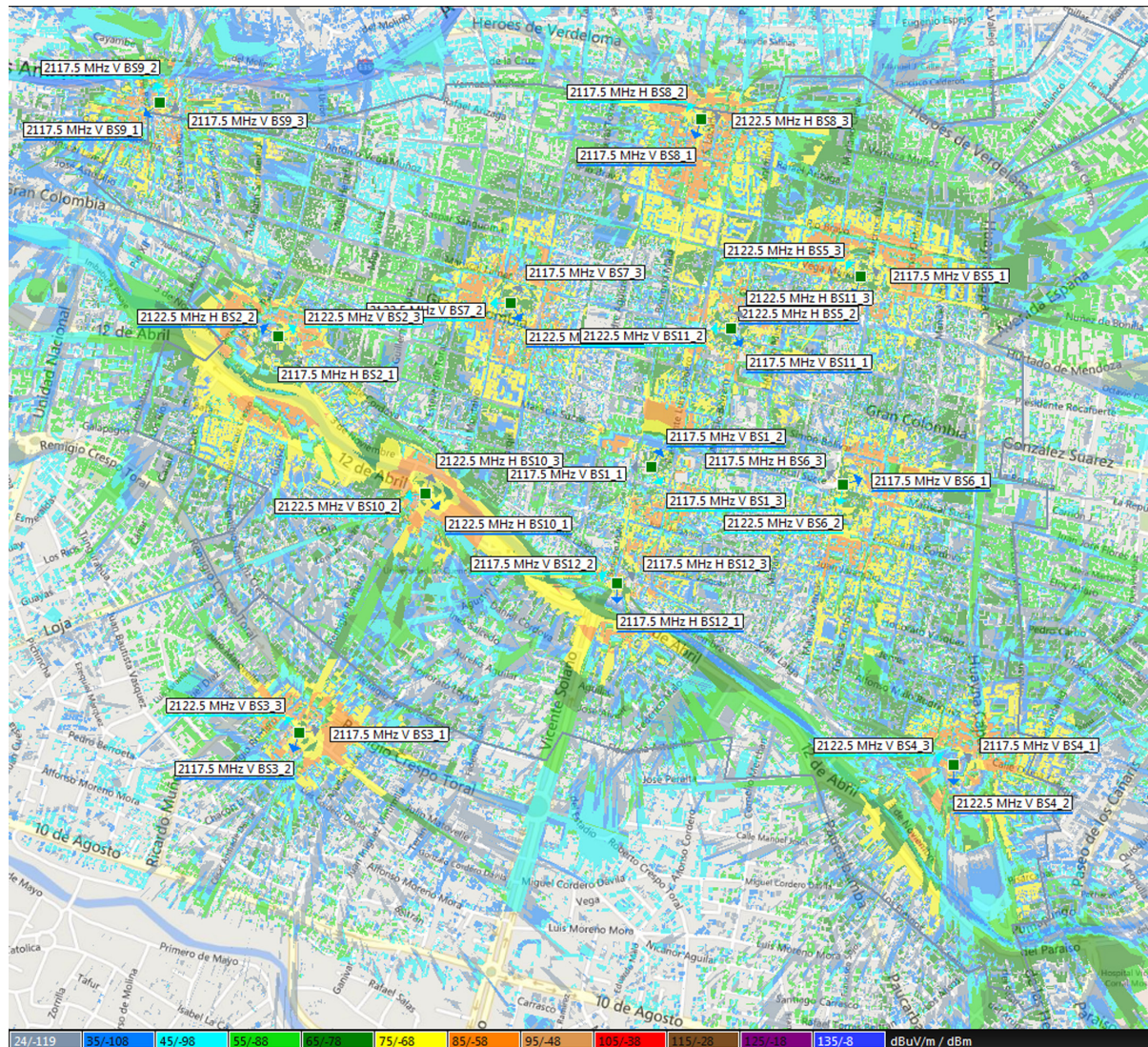
2115-2130

Tabla 4.8. Bandas de Frecuencia de 15MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Las siguientes figuras representan las simulaciones de cobertura, SNIR y rendimiento correspondientes a un ancho de banda de 15MHz.



129

Figura 4.40. Cobertura RSRP: Ancho de Banda 15MHz

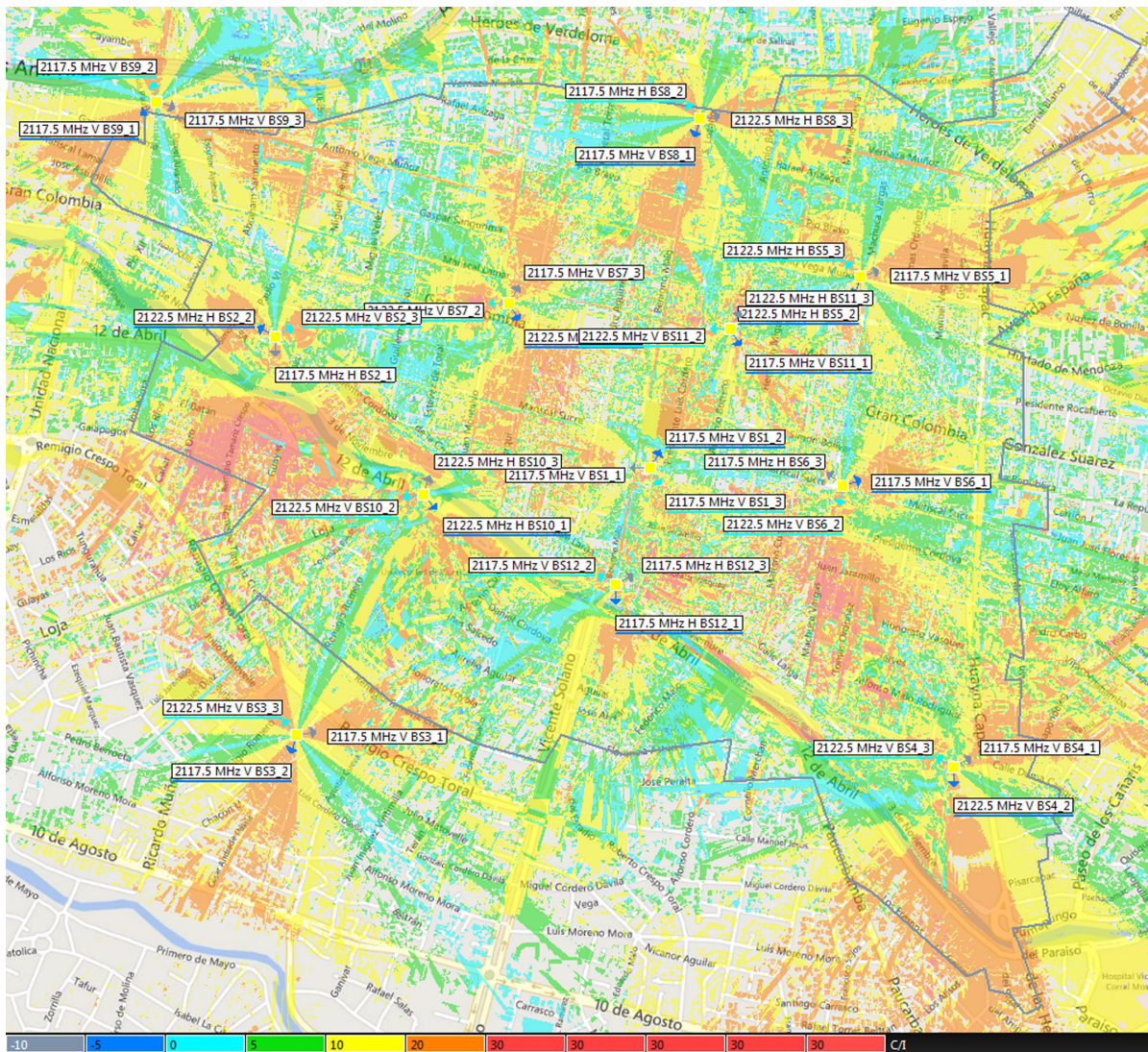
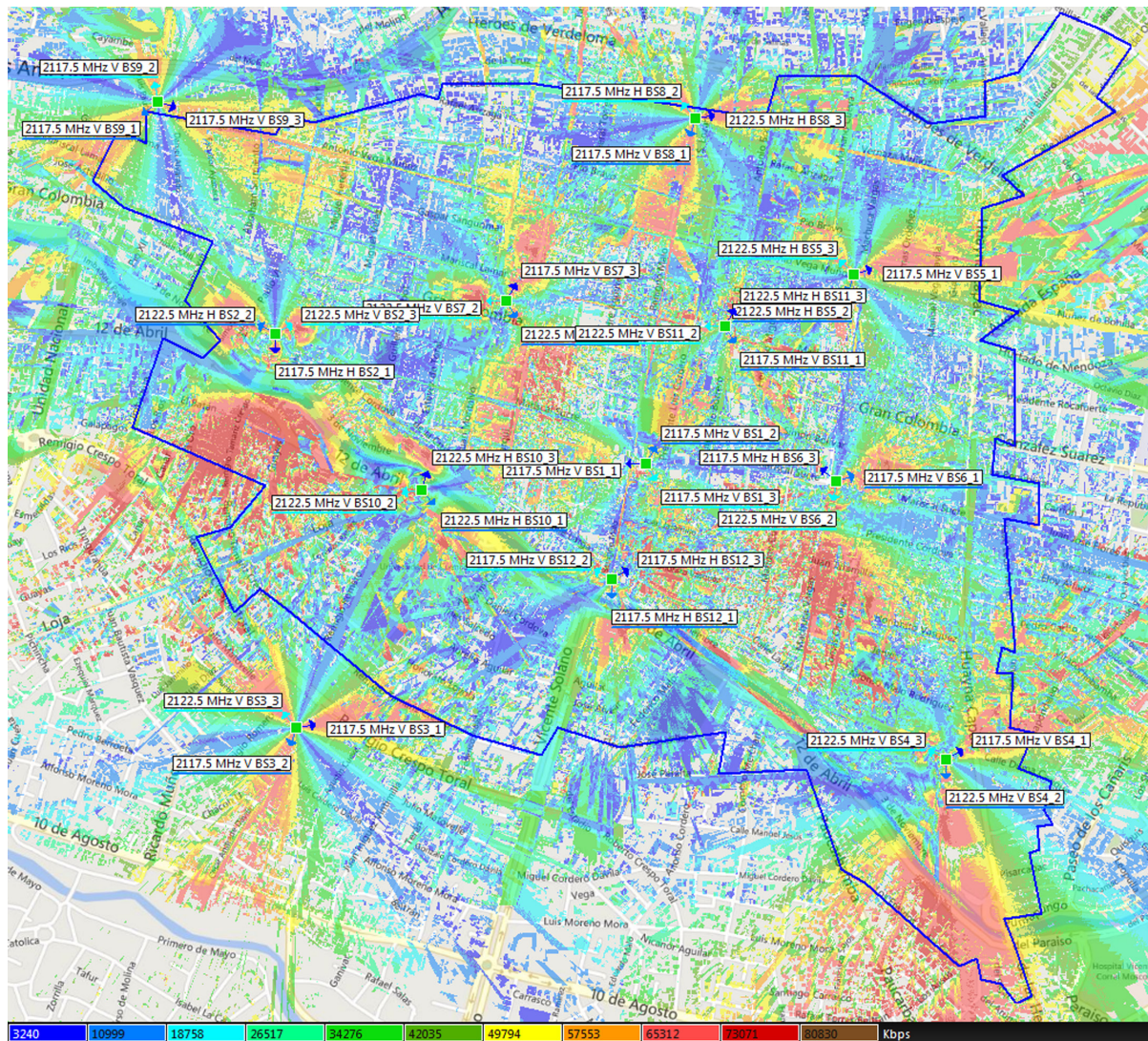


Figura 4.41. Predicción SNIR: Ancho de Banda 15MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA



131

Figura 4.42. Predicción Rendimiento: Ancho de Banda 15MHz

Finalmente, se presentan los resultados de simulación para un ancho de banda de 20MHz, donde se configura reúso de frecuencias de 1, Tabla 4.9.

Banda de Frecuencia (MHz)

2110-2130

Tabla 4.9. Banda de Frecuencia de 20MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

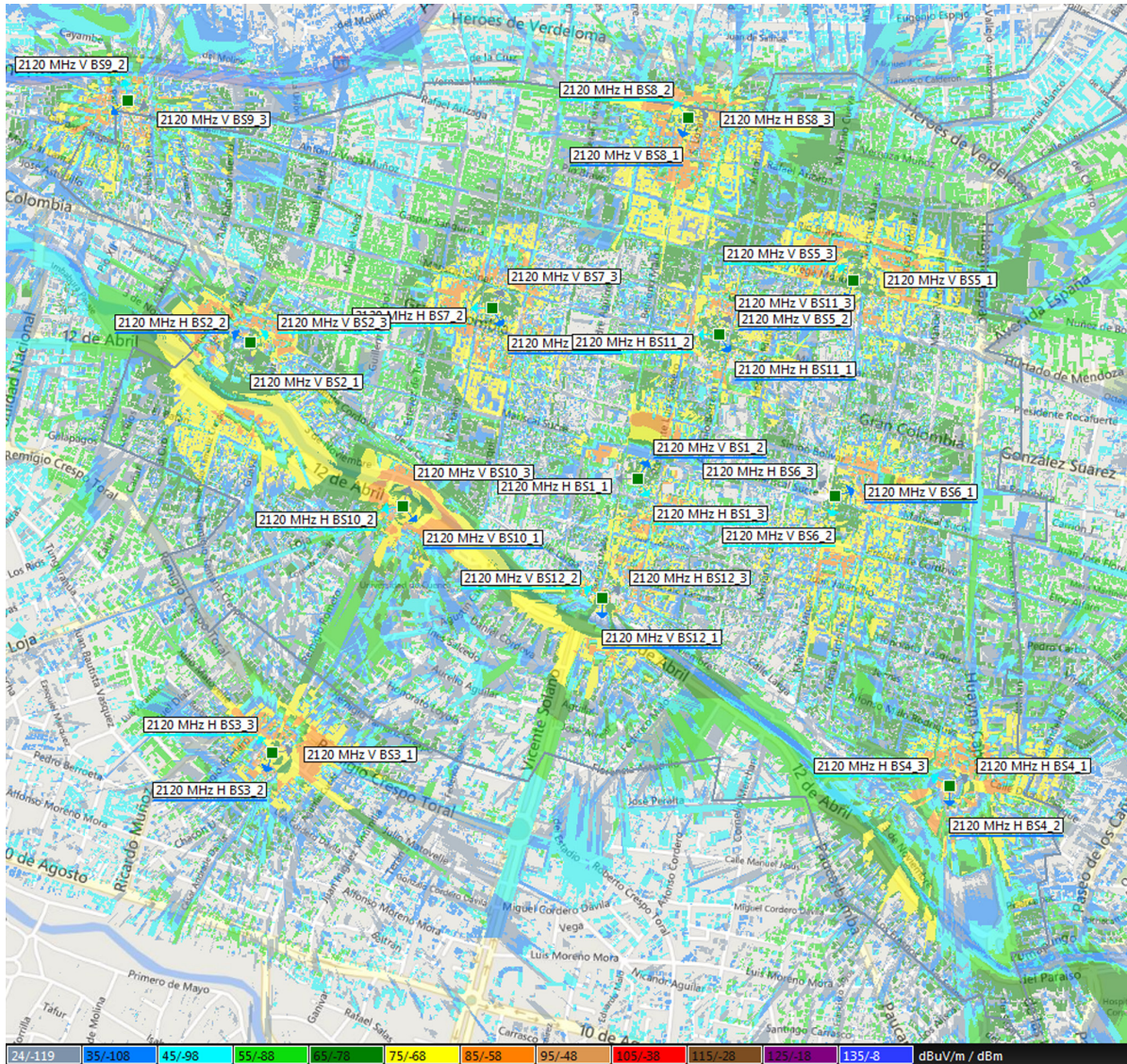


Figura 4.43. Cobertura RSRP: Ancho de Banda 20MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

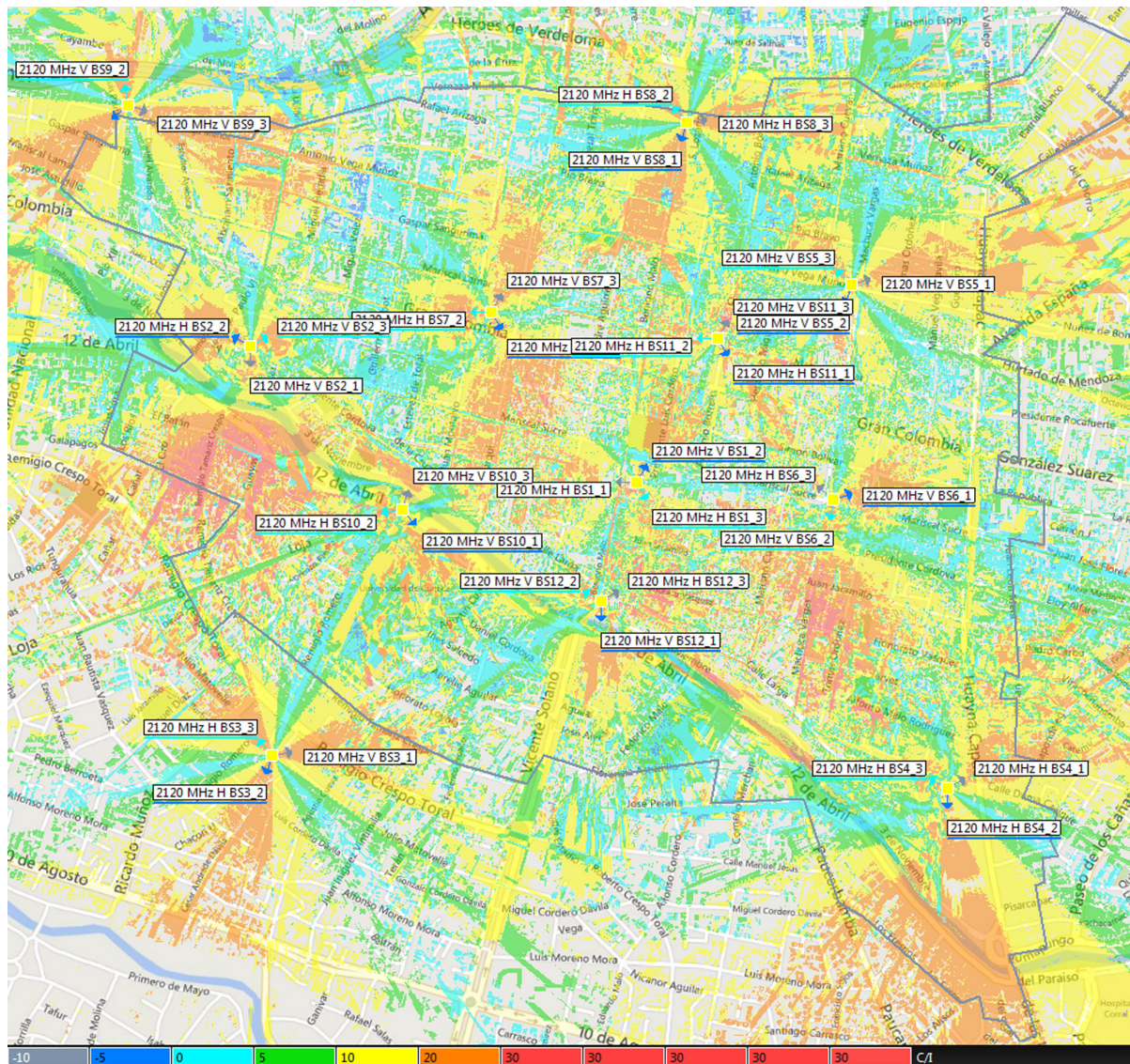


Figura 4.44. Predicción SNIR: Ancho de Banda 20MHz



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

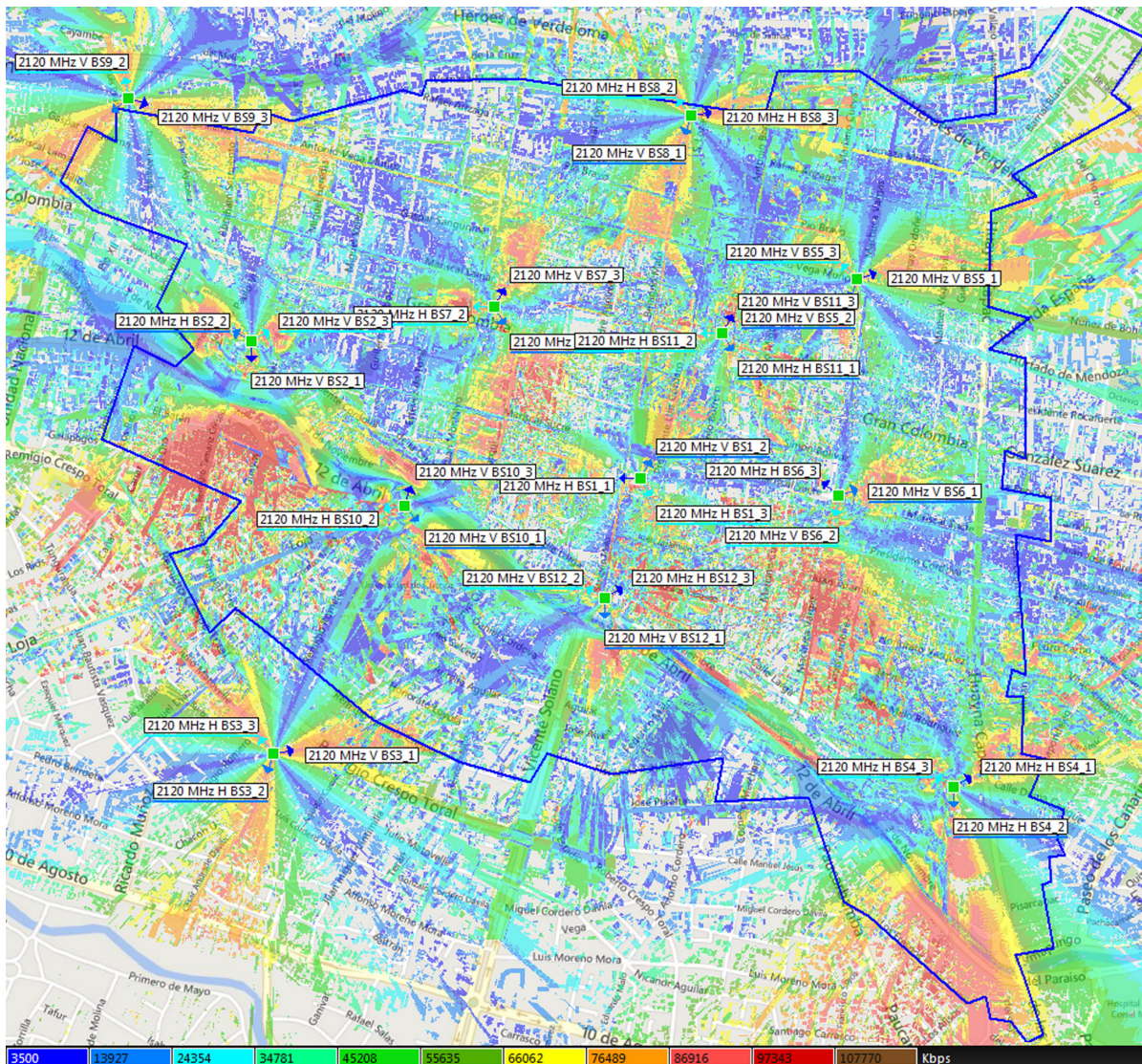


Figura 4.45. Predicción Rendimiento: Ancho de Banda 20MHz

Los resultados estadísticos para la simulación de nivel de cobertura RSRP para los distintos ancho de banda analizados, se comparan en la Figura 4.46. Se incluye los resultados obtenidos con una configuración de 5MHz y reúso de frecuencias de 4, obtenidos en el apartado 4.6.

A partir de la Figura 4.46, se puede concluir que a mayor ancho de banda se tiene un menor porcentaje de área cubierta, pues a pesar de que los porcentajes para cada nivel de potencia son similares se tiene una tendencia a disminuir cuando el ancho de banda es mayor. Es decir, con 20MHz una menor área supera el límite (-119dBm).



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

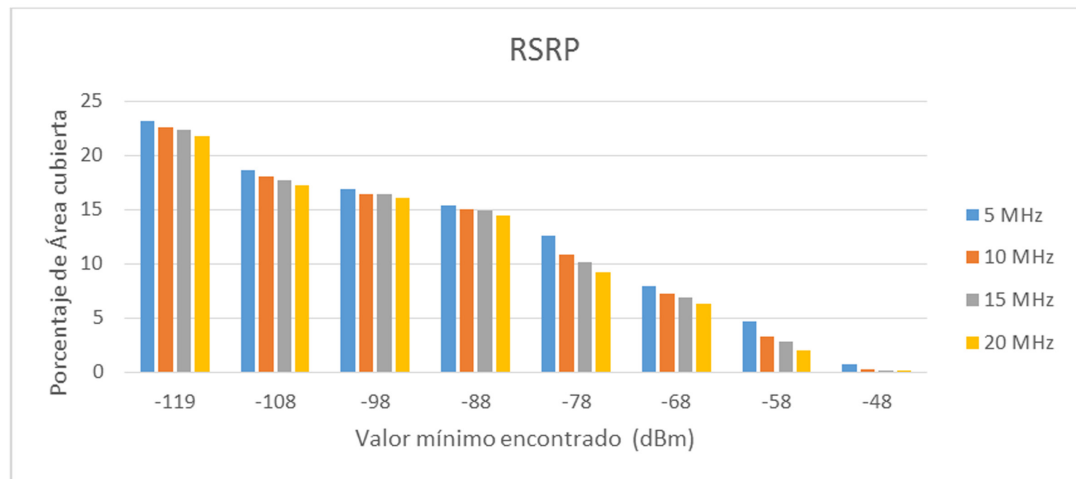


Figura 4.46. Comparación de cobertura RSRP para distintos anchos de banda.

En la comparación de niveles de SNIR, presentada en la Figura 4.47, se observa que para los 4 casos el mayor porcentaje de área posee un valor de SNIR entre 10dB y 20dB que es positivo en comparación con el límite (-10dB). Por otro lado, se diferencia claramente que con una asignación de ancho de banda de 5MHz, el área que posee niveles superiores a 20dB es mucho mayor, lo que demuestra la ventaja de utilizar un esquema de reúso de frecuencias.

135

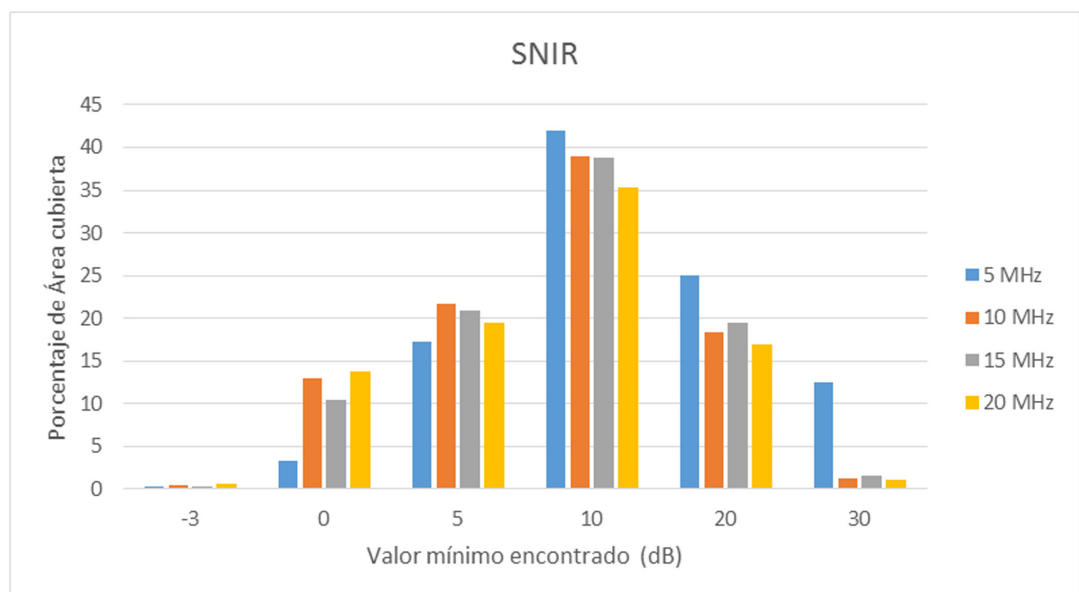


Figura 4.47. Comparación de niveles de SNIR para distintos anchos de banda.



Respecto a rendimiento, la capacidad máxima que se obtiene en función del ancho de banda se presenta en la Tabla 4.10., de acuerdo a la Figura 4.48.

Ancho de Banda (MHz)	5	10	15	20
Rendimiento (Mbps)	24.9	49.9	74.9	99.9

Tabla 4.10. Rendimiento Máximo Simulado

Por otro lado, las velocidades alcanzadas para un mayor porcentaje de área para cada ancho de banda se presentan en la Tabla 4.11.

Ancho de Banda (MHz)	5	10	15	20
Porcentaje de Área (%)	17.1	18.9	18	18.2
Rendimiento (Mbps)	6.4	7.9	11.8	15.8

Tabla 4.11. Rendimiento para mayor porcentaje de área.

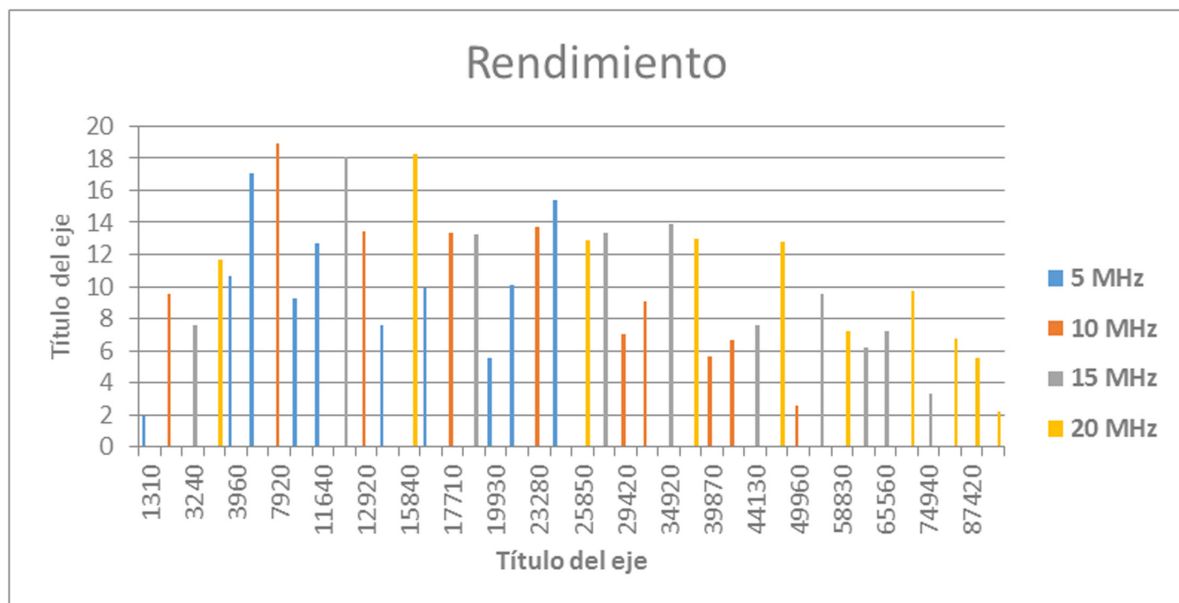


Figura 4.48. Comparación de Rendimiento para distintos anchos de banda.

4.8 COMPARACIÓN TÉCNICAS MIMO.

En las simulaciones realizadas se trabajó con una configuración 2x2 MIMO, sin embargo para el esquema final de red con 12 eNodeB activados, se varía la configuración de técnica MIMO que éstas soportan. Para lograr una mejor comparativa del efecto que tienen las diferentes técnicas MIMO en el rendimiento de la red, se presentan las siguientes figuras que representan las simulaciones de nivel de SNIR y rendimiento para las configuraciones SIMO y de Diversidad de Transmisión (TxDiv).



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Los niveles de cobertura RSRP se mantienen iguales para las dos técnicas de antenas por lo que no se presenta una comparación de este tipo de simulación en este apartado.



Figura 4.49. Predicción de SNIR: Técnica SIMO



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA



Figura 4.50. Predicción de SNIR: Técnica TxDiv

De acuerdo a la Figura 4.51 para niveles de SNIR menores a 5dB con la técnica SIMO se tiene un porcentaje de área de 39,7%, para la técnica MIMO se tiene un porcentaje de área de 20,6% y para Diversidad de Transmisión un porcentaje de 26,6%, lo que demuestra que la técnica SIMO posee niveles más bajos de SNIR en un mayor porcentaje de área. Sucediendo lo contrario para valores más altos de SNIR, donde la técnica MIMO cubre un mayor porcentaje de área que las otras técnicas.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

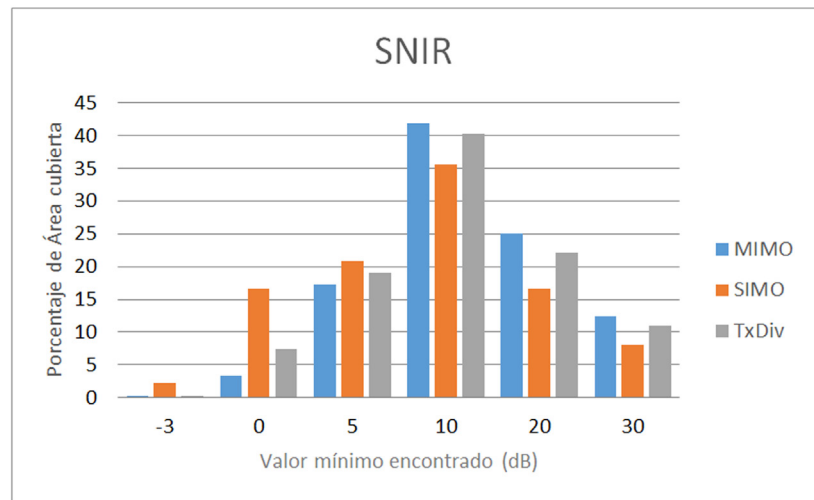


Figura 4.51. Comparación de niveles SNIR para técnicas MIMO.

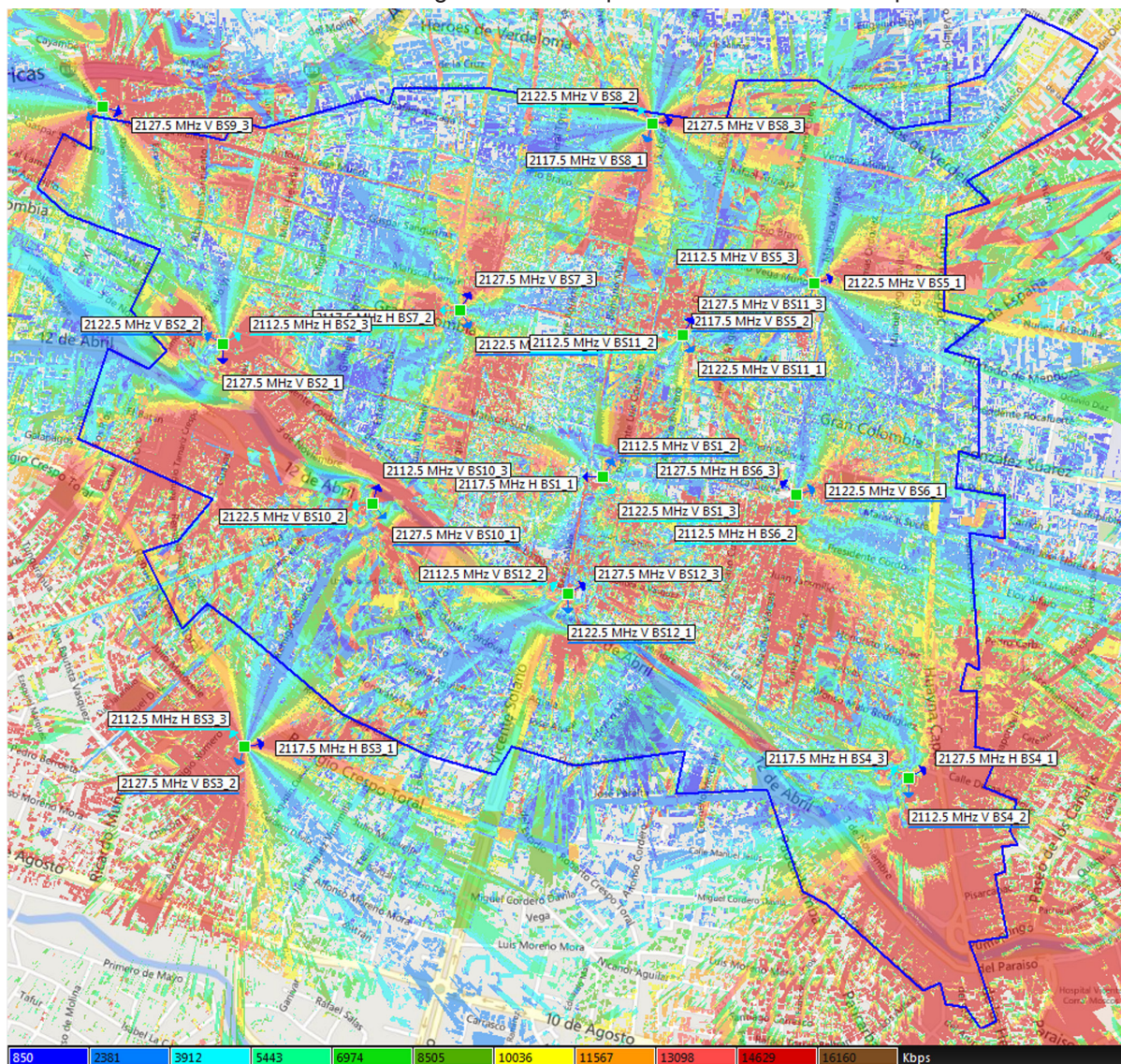


Figura 4.52. Predicción de Rendimiento: Técnica SIMO



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

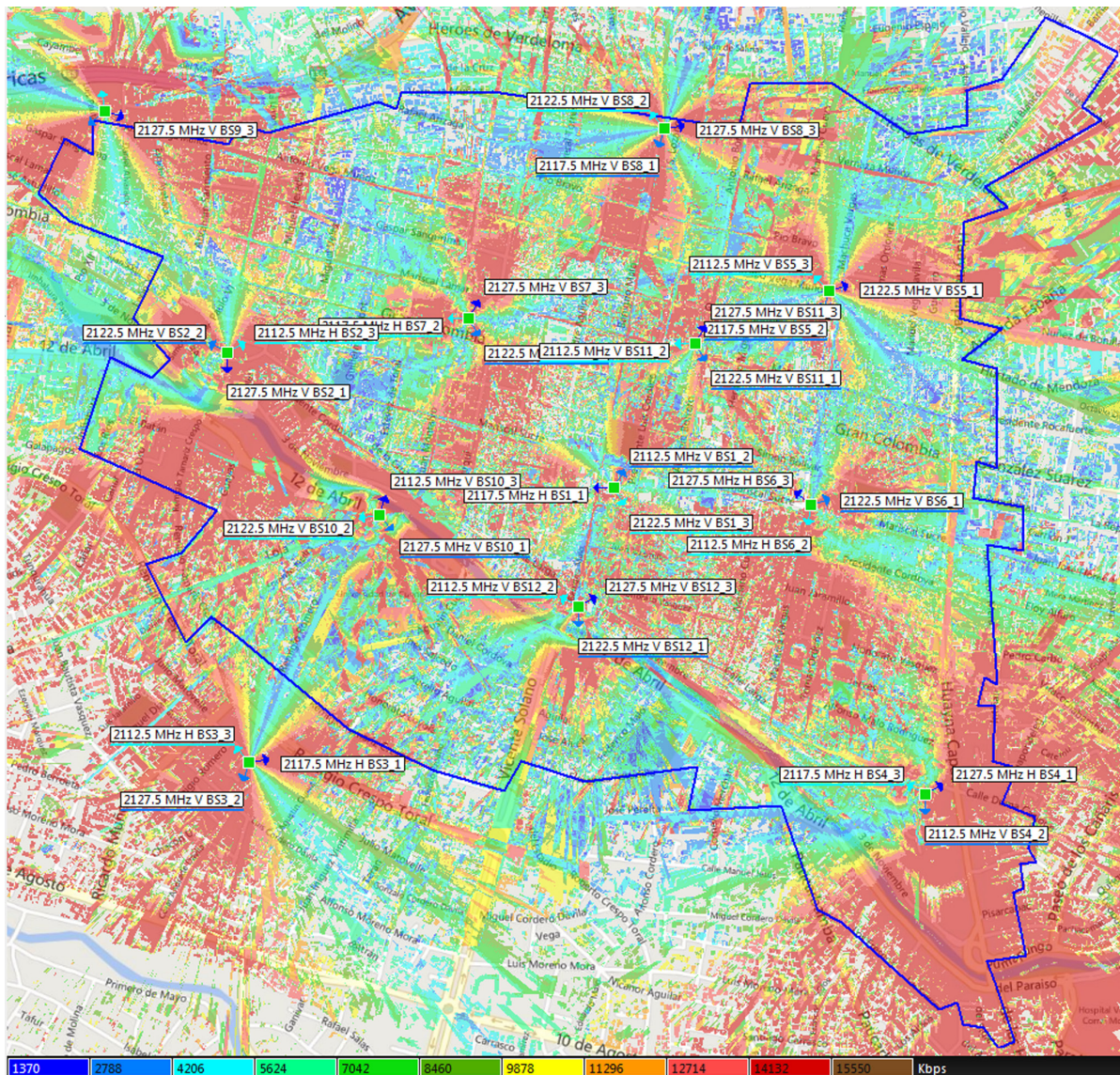


Figura 4.53. Predicción de Rendimiento: Técnica TxDiv



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

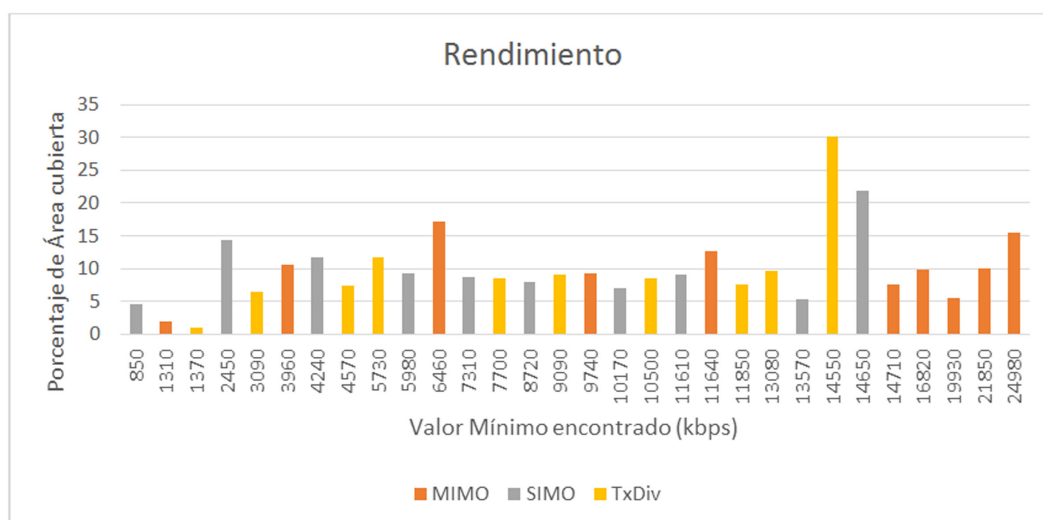


Figura 4.54. Comparación Rendimiento para técnicas MIMO

De acuerdo a la Figura 4.54 comparativa, con las técnicas SIMO y TxDiv se alcanzan niveles similares de rendimiento, con una máxima tasa de datos entre 14.6Mbps y 14.5Mbps, sin embargo se debe tomar en cuenta, que de acuerdo a la Figura 4.51 la técnica multiantena TxDiv posee niveles más altos de SNIR, lo que le da una ventaja frente al esquema SIMO. La técnica MIMO, por su lado genera los mayores niveles de rendimiento siendo el máximo un valor de 24.9Mbps.

141

4.9 RED EN 700MHZ

Finalmente se analiza el comportamiento de la red de 12 nodos activos, si a cada uno de ellos se configura la banda de frecuencia de transmisión de 700MHz, manteniendo un ancho de banda de 5Mhz para cada uno.

Los segmentos de frecuencia configurados se presentan en la Tabla 4.12.

Bandas de Frecuencias (MHz)
788-793
793-798
798-803

Tabla 4.12. Segmentos de Frecuencia de 5MHz



En la Figura 4.55 se observa los resultados de simulación de cobertura RSRP, que presenta niveles mayores de potencia de recepción en comparación con la red configurada en el apartado 4.6.

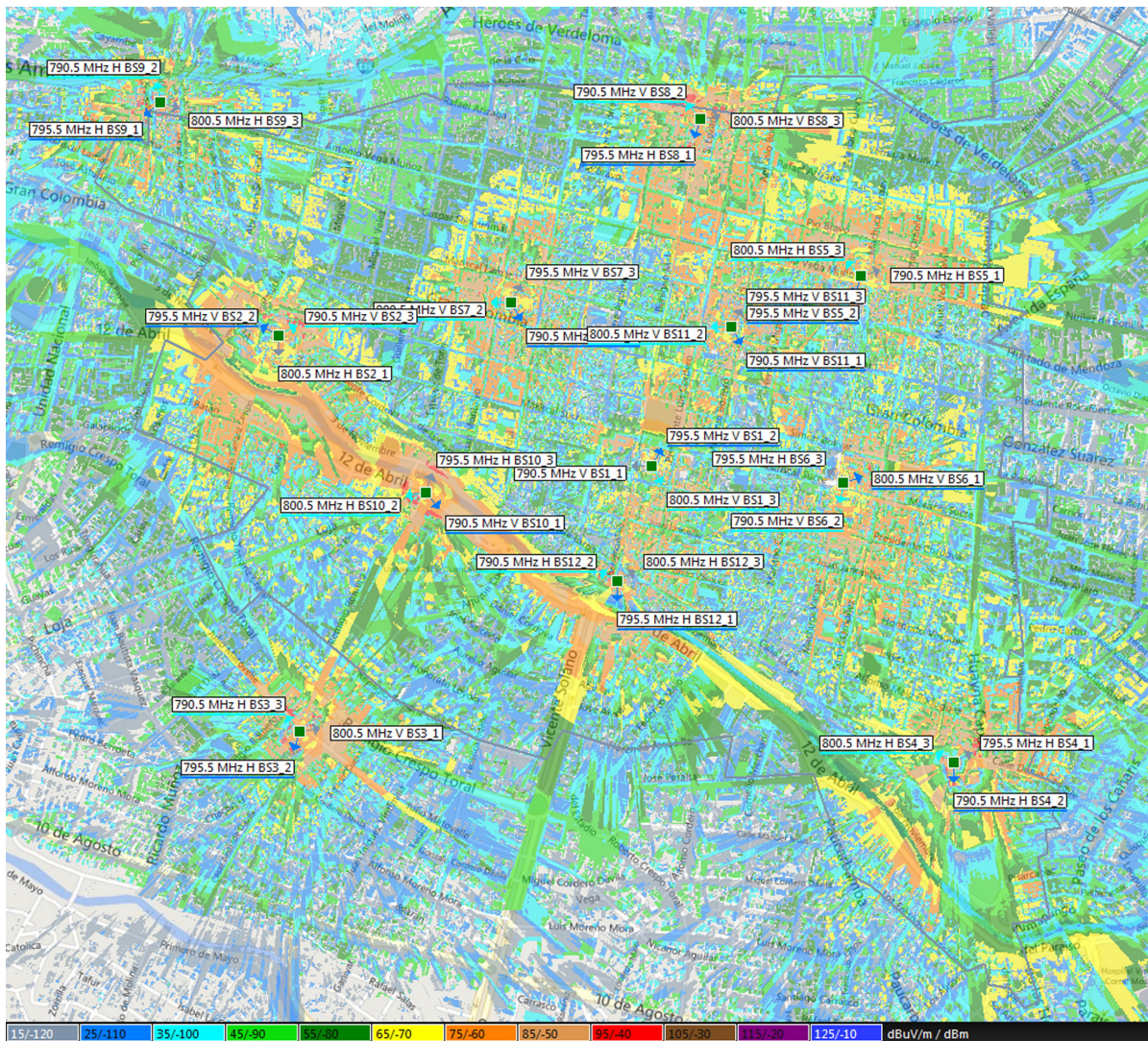


Figura 4.55. Cobertura RSRP: Banda 700MHz

Los resultados de simulación de niveles de SNIR y rendimiento se presentan en las Figuras 4.56 y 4.57.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

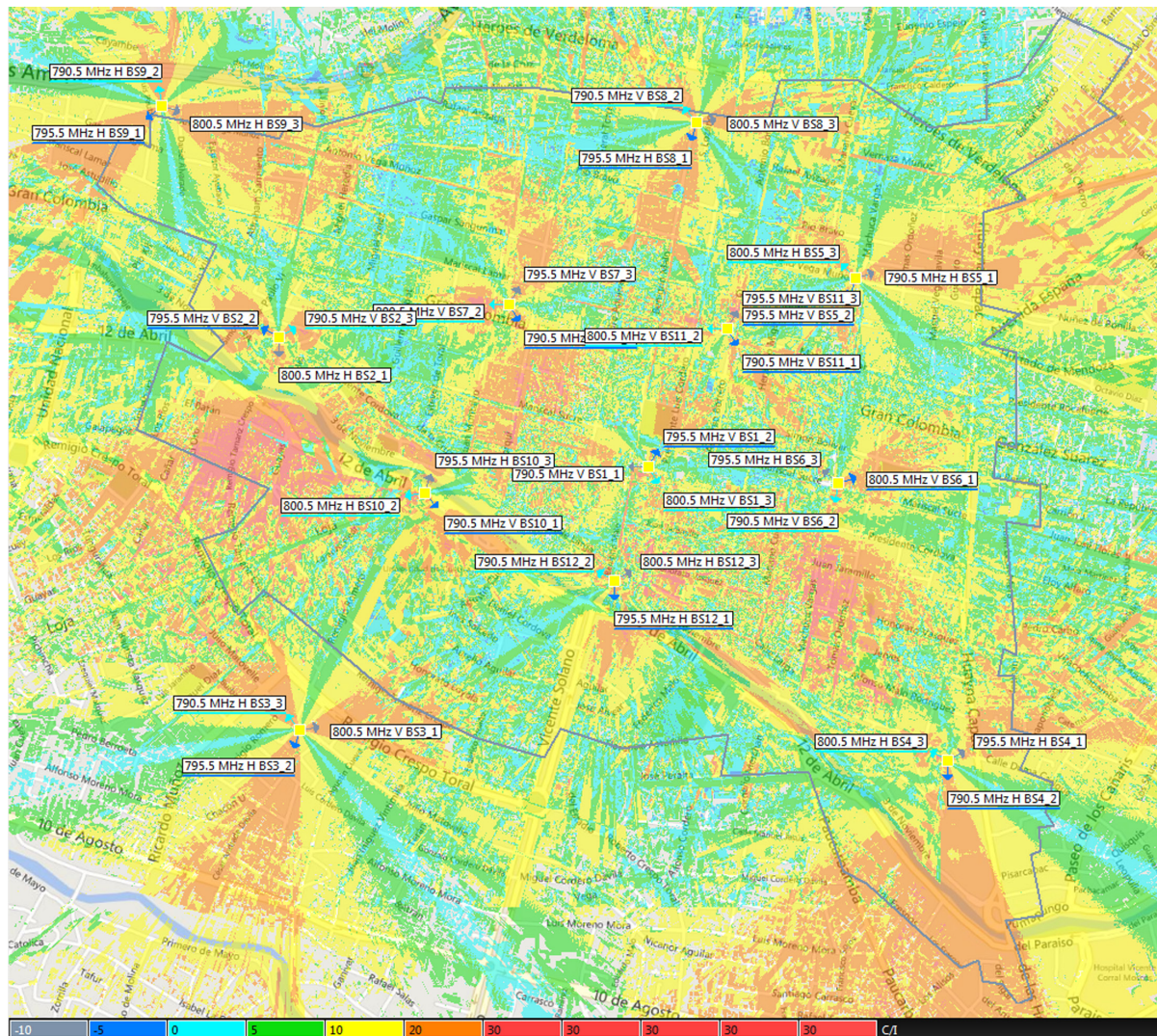


Figura 4.56. Predicción de SNIR: Banda 700MHz.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

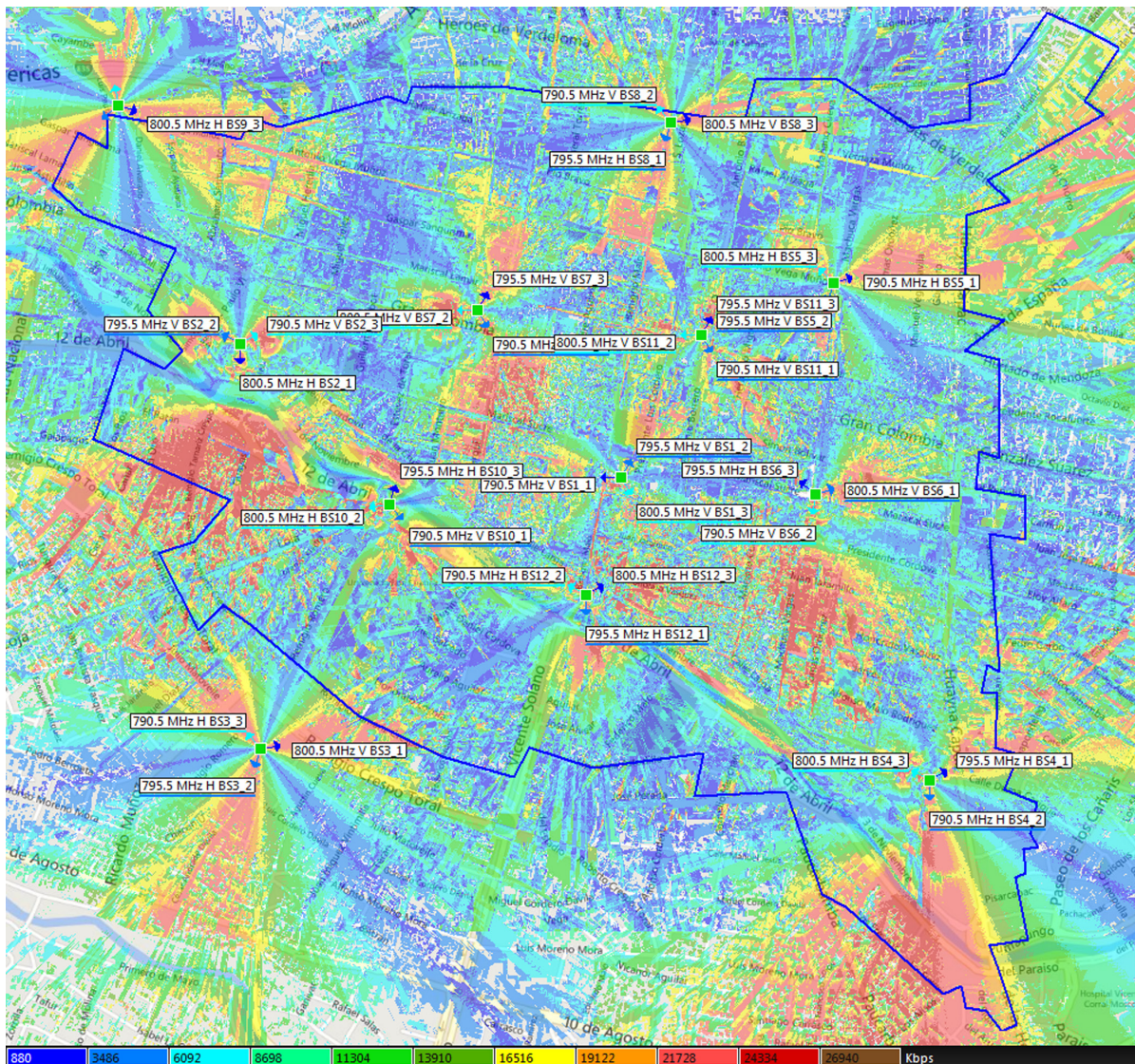


Figura 4.57. Predicción de Rendimiento: Banda 700MHz.

De acuerdo a la Figura 4.58 comparativa de niveles de RSRP, se concluye que con una frecuencia de transmisión de la banda de 700MHz se alcanza un mayor porcentaje de área de cobertura con mejores niveles de potencia que una red configurada con la banda de 1700-2100MHz.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

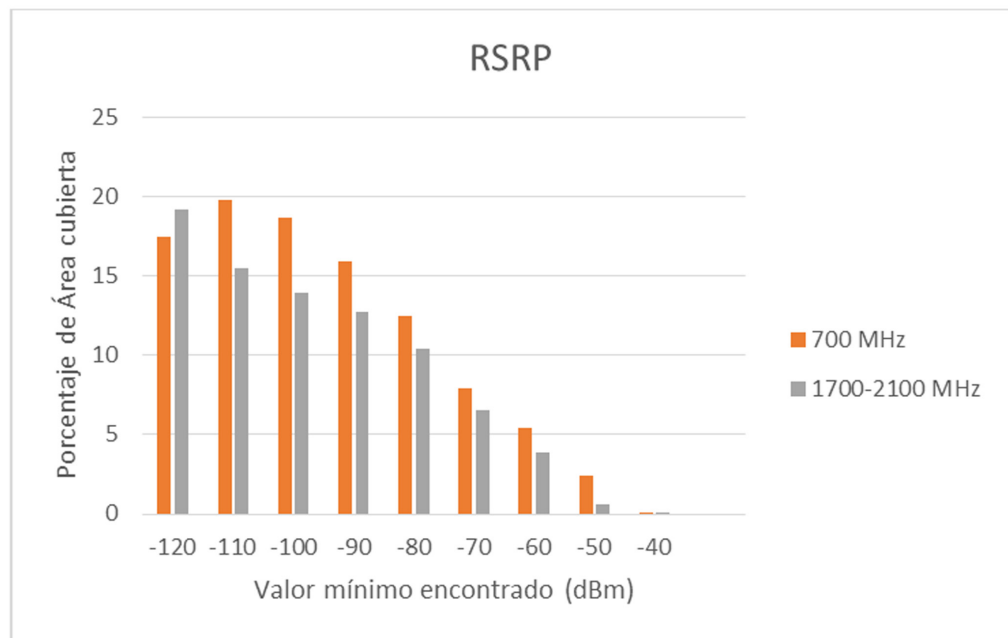


Figura 4.58. Comparación de RSRP para frecuencias de transmisión 700MHz y 1700-2100MHz

Sin embargo, la comparación de niveles de SNIR, denotan que con una frecuencia de transmisión de 700MHz se tiene un mayor porcentaje de área con valores menores de SNIR para toda el área de estudio, como se observa en la Figura 4.59, sucediendo lo contrario para la banda de frecuencia 1700-2100MHz.

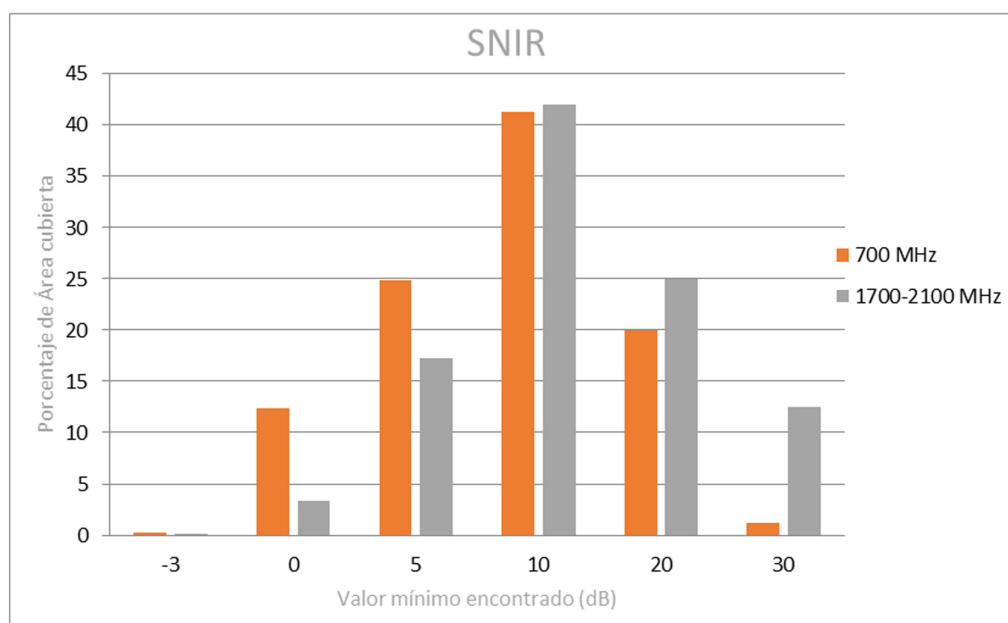


Figura 4.59. Comparación de SNIR para frecuencias de transmisión 700MHz y 1700-2100MHz.



En función de la conclusión anterior acerca de niveles de SNIR, es comprensible que en la Figura 4.60 comparativa de niveles de rendimiento, para la frecuencia de 700MHz se presente un mayor porcentaje de área con niveles bajos de rendimiento, contrario a la frecuencia 1700-2100MHz donde un 25% de área supera velocidades de 21.8Mbps.

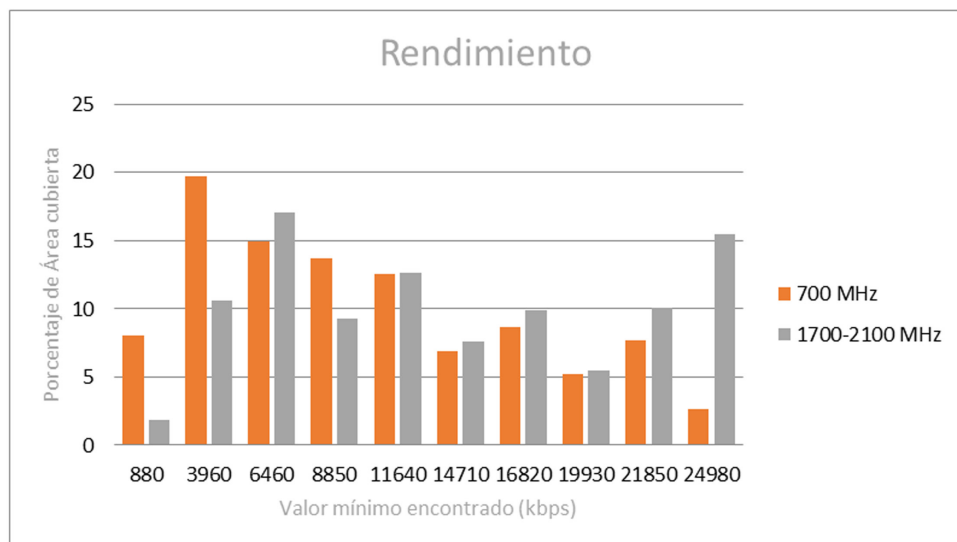


Figura 4.60. Comparación de Rendimiento para frecuencias de transmisión 700Mhz y 1700-2100MHz

4.10. CÁLCULO DE CAPACIDAD

Una vez definido el esquema de red en el apartado 4.5, conformado por 12 eNodeB activos que proporcionan mayores niveles de cobertura sobre el área de estudio, se realiza a continuación, una estimación de la capacidad de la red en función de la demanda de usuarios para la operadora considerada CNT.

La demanda actual de usuarios clientes de la operadora CNT, se estima a partir del porcentaje de penetración de esta empresa en el mercado, la cantidad de habitantes de la zona en estudio y el porcentaje de penetración del servicio móvil (Líneas Activas) en el Ecuador, como se indica en la Tabla 4.13. Los datos de penetración se obtienen por parte de la ARCOTEL y la densidad poblacional en el centro histórico de Cuenca en [9].



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

Número de Habitantes Centro Histórico de Cuenca	A	73683
Penetración de Telefonía Móvil en el Ecuador (%)	B	113,32
Número de Usuarios Móviles en Centro Histórico	$C=A*B/100$	83498
Penetración en el mercado de operadora CNT (%)	D	3,6
TOTAL DE USUARIOS CNT	$E=C*D/100$	3006

Tabla 4.13. Número de usuarios de operadora CNT.

Si se considera una distribución uniforme del número de usuarios calculado sobre la superficie del centro histórico, y que la red está conformada por 12 estaciones base trisectoriales, la demanda de usuarios para cada sector se indica en la Tabla 4.14.

Total de Usuarios CNT	E	3006
Número de Nodos de Red	F	12
Número de Sectores por Nodo	G	3
TOTAL DE USUARIOS POR SECTOR	$H=E/(12*3)$	84

Tabla 4.14. Número de usuarios por sector.

147

La capacidad total de una celda se calculó en el apartado 1.7.1, en función del ancho de banda asignado. Los resultados para los anchos de banda de 5Mhz y 20Mhz, considerando una modulación 64QAM 4/5 y MIMO 2x2 se presentan en la Tabla 4.15, que son considerados en esta sección.

Ancho de Banda (MHz)		5	20
CAPACIDAD POR SECTOR(Mbps)	I	28,2	112,9

Tabla 4.15. Capacidad total por sector.

A partir de estos valores se calcula la velocidad de descarga de datos posible por usuario, para distintos porcentajes de utilización simultánea de la red. El porcentaje de 100% significa que todos los usuarios por sector calculados anteriormente se comunican en el mismo instante de tiempo. En cambio, el porcentaje de 1,2% significa que un único usuario se comunica, al que se le asigna todos los recursos de la red. Los resultados se exponen en las Tabla 4.16 y 4.17.



CAPACIDAD POR SECTOR(Mbps)	I	28,2				
PORCENTAJE DE UTILIZACION SIMULTANEA(%)	J	100	50	20	5	1,2
NUMERO DE USUARIOS SIMULTANEOS	$K=H*J/100$	84	42	17	4	1
RENDIMIENTO POR USUARIO (Mbps)	$L=I/K$	0,336	0,671	1,658	7,05	28,2

Tabla 4.16. Velocidad de descarga de datos por usuario. Ancho de banda 5MHz.

CAPACIDAD POR SECTOR(Mbps)	I	114,5				
PORCENTAJE DE UTILIZACION SIMULTÁNEA (%)	J	100	50	20	5	1,2
NUMERO DE USUARIOS SIMULTANEOS	$K=H*J/100$	84	42	17	4	1
RENDIMIENTO POR USUARIO (Mbps)	$L=I/K$	1,344	2,73	6,74	28,6	114,5

Tabla 4.17. Velocidad de descarga de datos por usuario. Ancho de banda 20MHz.

148

En función de la Tabla 4.16, si la red se configura con un ancho de banda de 5MHz, que es el valor que CNT utiliza en la actualidad, se puede servir simultáneamente, por ejemplo: a 4 usuarios (5% utilización) con una velocidad de 7Mbps, a 17 usuarios (20%) con una velocidad de 1,65Mbps y a todos los usuarios (100%) con una velocidad máxima de 336kbps. Se debe tener en cuenta que la modulación utilizada requiere un SNIR mínimo de 16.8dB de acuerdo a la Tabla 4.3, por lo tanto los usuarios deben encontrarse en zonas cercanas al nodo.

Con un ancho de banda de 20Mhz, Tabla 4.17, se alcanzan mejores velocidades de datos ya que se dispone de una mayor cantidad de recursos. Por ejemplo, se pueden comunicar en el mismo instante de tiempo 4 usuarios (5%) con una velocidad de 28,6Mbps, 17 usuarios (20%) con 6,74Mbps y todos los usuarios (100%) con un máximo de 1,34Mbps.

Las velocidades ofertadas a los usuarios son altas considerando que se supone una comunicación paralela de los porcentajes de usuarios analizados. Con un ancho de banda de 20MHz se cuadruplica la velocidad de datos para cada caso, aproximadamente.

Proyectando un incremento de demanda futura, se repiten los cálculos anteriores, para un 100% y 200% de crecimiento de usuarios CNT.

Para un 100% de crecimiento, se tiene un total de usuarios por sector de 167, para los cuales, con un ancho de banda de 5Mhz, las velocidades alcanzadas se presentan en la Tabla 4.18.



EVALUACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE RED LTE ADECUADA A LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA

CAPACIDAD POR SECTOR (Mbps)	28,2				
PORCENTAJE DE UTILIZACION SIMULTANEA (%)	100	50	20	5	0,6
NUMERO DE USUARIOS SIMULTANEOS	167	84	33	8	1
RENDIMIENTO POR USUARIO	0,169	0,336	0,854	3,52	28,2

Tabla 4.18. Velocidad de descarga de datos por usuario para un crecimiento de 100% de demanda.

Donde, si 33 usuarios en un mismo sector requieren descargar información paralelamente, la velocidad alcanzada sería aproximadamente 800kbps. Pero, si el objetivo es brindar por lo menos una velocidad de descarga de 1Mbps a un usuario LTE, esto significaría que se requiere redimensionar la red. Aunque se debe considerar la probabilidad de que un número igual o mayor a 33 usuarios se comuniquen exactamente en el mismo instante de tiempo.

Para un crecimiento de 200%, y manteniendo un ancho de banda de 5MHz, las velocidades de descarga de datos alcanzadas por usuario, se indican en la Tabla 4.19. Donde, para porcentajes mayores a 20% de utilización la velocidad alcanzada no sobrepasa 570kbps.

149

CAPACIDAD POR SECTOR(Mbps)	28,2				
PORCENTAJE DE UTILIZACION SIMULTANEA(%)	100	50	20	5	0,4
NUMERO DE USUARIOS SIMULTANEOS	251	125	50	13	1
RENDIMIENTO POR USUARIO	0,112	0,226	0,564	2,169	28,200

Tabla 4.19. Velocidad de descarga de datos por usuario para un crecimiento de 200% de demanda.

Finalmente, con el mismo método de la Tabla 4.13, se calculó la demanda actual de usuarios de las operadoras Movistar y Claro, cuyos porcentajes de penetración se incluyen en el apartado 2.2, y se analizó el comportamiento de la red simulada si CNT alcanzará la misma cantidad de usuarios que estas operadoras.

Si CLARO posee una demanda de clientes de 57363 en el centro histórico de Cuenca, la cantidad de usuarios por sector es de 1593. Por lo tanto, si la red simulada posee esta demanda los niveles de velocidades de descarga son los presentados en la Tabla 4.20. Se mantiene un ancho de banda de 5Mhz.



CAPACIDAD POR SECTOR(Mbps)	28,2				
PORCENTAJE DE UTILIZACION SIMULTANEA(%)	100	50	20	5	0,06
NUMERO DE USUARIOS SIMULTANEOS	1593	797	319	80,0	1,0
RENDIMIENTO POR USUARIO	0,018	0,035	0,088	0,353	28,200

Tabla 4.20. Velocidades de descarga para demanda de usuarios igual a Claro.

Se puede resaltar que para un porcentaje de utilización simultánea de usuarios de 20%, la velocidad por consumidor es menor a 100kbps, es decir, si en realidad se requiere satisfacer 319 usuarios por sector al mismo tiempo, es indispensable redimensionar la red para poder ofrecer mayores capacidades a los clientes. Sin embargo, se debería considerar la probabilidad de solicitud de datos paralela de esta cantidad de usuarios para un único sector.

Para el caso de MOVISTAR, que posee una demanda de 23797 clientes en el centro histórico de Cuenca, la cantidad de usuarios por sector es de 661. Las velocidades ofertadas a los clientes se resumen en la Tabla 4.21.

CAPACIDAD POR SECTOR(Mbps)	28,2				
PORCENTAJE DE UTILIZACION SIMULTANEA(%)	100	50	20	5	0,15
NUMERO DE USUARIOS SIMULTANEOS	661,0	330,0	132,0	33,0	1,0
RENDIMIENTO POR USUARIO	0,043	0,085	0,214	0,855	28,200

Tabla 4.21. Velocidades de descarga para demanda de usuarios igual a Movistar.

El escenario es comparable al analizado con la operadora Claro, pero en este caso las velocidades son menores a 100kbps si se considera un 50% de utilización simultánea, lo cual implicaría que 330 usuarios transmiten simultáneamente.

A partir de la estimación de capacidad de la red analizada, se puede concluir que las velocidades reales que se entregan al usuario son mucho menores que los máximos ofertados para la tecnología LTE. Pues, por ejemplo, si se busca una velocidad de 20Mbps, en un sector de capacidad de 28,2Mbps (5Mhz) significa que más del 70% de los recursos de tráfico de datos se asignan a un único usuario. Esta situación es poco probable, especialmente si se considera horas pico de tráfico, donde todos los recursos de red deberán ser distribuidos a los clientes disminuyendo la tasa de datos real.



CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del proyecto:

En el estándar de LTE se definen velocidades de transmisión de datos pico de 300Mbps para enlace descendente y 75Mbps para enlace ascendente. En el apartado 1.8, se demuestra el cálculo de estas velocidades teóricas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se asume una técnica 4x4 MIMO, una modulación 64QAM 1/1, un ancho de banda de 20MHz y principalmente que todos los recursos son asignados a un único usuario.

Estas condiciones no son alcanzables en la realidad, pues los recursos de un eNodeB deberán ser asignados a varios usuarios simultáneamente, además de que estos requerirían un teléfono móvil que soporte 4x4 MIMO. Por otro lado el tipo de modulación dependerá de la relación SNIR que recepte el usuario en determinado momento, además de que la codificación 1/1 utilizada no posee redundancia. Por lo tanto, todos los aspectos descritos afectarán y definirán la verdadera tasa de datos que un usuario puede llegar a experimentar.

152

Respecto al despliegue de LTE en Cuenca, en el análisis regulatorio se define que actualmente todas las operadoras poseen frecuencias para el despliegue de este tipo de red, frecuencias que son reconocidas a nivel mundial para sistemas IMT, lo que garantiza interoperabilidad entre países y menores costos de despliegue de red.

En un enfoque hacia el Centro Histórico de Cuenca, se analizó los requerimientos para la implantación de nuevas estructuras en esta zona, los mismos que buscan la mimetización de las torres para disminuir el impacto visual en esta zona patrimonial, razón por la cual se plantea como solución el uso compartido de estructuras físicas entre las operadoras.

Para el análisis de una red LTE sobre el área mencionada, luego de comparar las plataformas de planificación: ICS TELECOM, ATOLL y XIRIO ONLINE. Se concluyó que XIRIO ONLINE presenta menores características que las otras plataformas, aunque dispone de cartografía libre de baja resolución para el usuario. Tanto ICS TELECOM como ATOLL presentan significativas funciones para planificación y optimización de redes de telecomunicaciones. El software elegido es ICS TELECOM para el cual se dispone de cartografía digital de alta resolución de la ciudad de Cuenca.

Una vez finalizado los estudios anteriores se inició la fase de simulación de una red LTE utilizando estructuras existentes pertenecientes a la operadora CNT en el Centro Histórico de Cuenca. Esta operadora fue elegida por la disponibilidad de información y por ser la única con frecuencias asignadas para LTE al inicio de este proyecto.



El modelo de pérdidas de propagación elegido para la simulación fue ITU-R P.525 / 526 Deygout por demostrar a través de simulación y en función de sus características, ser el más adecuado para aprovechar las ventajas de una cartografía digital de alta resolución, plasmando de manera más precisa el comportamiento de la red LTE sobre un área urbana con una densidad alta de edificaciones.

Las conclusiones obtenidas a través de los distintos escenarios de red simulados en el capítulo 4, son:

- La simulación de los cuatro nodos LTE que la operadora posee en la actualidad sobre la zona de estudio, demuestra que el área de cobertura de los mismos es deficiente, por lo que se requiere de un mayor número de nodos para obtener niveles de cobertura aceptables en todo el territorio.
- La comparación realizada para esta red variando la asignación de ancho de banda de los nodos de 5 a 20 MHz, demuestra notablemente la diferencia de rendimiento con velocidades máximas de 24.9Mbps para 5 MHz y 99Mbps para 20MHz. Los resultados de simulación de SNIR no son uniformes en todo el terreno debido a los pocos nodos con los que se cuenta, sin embargo se puede notar un incremento de interferencia en ciertas zonas debido al reúso de frecuencias de 1 para una configuración de 20MHz.
- Con el objetivo de obtener niveles de cobertura tolerables sobre la gran mayoría del terreno, se incrementó el número de radiobases activas de 7 a 10, cuyos resultados reflejaban mejores porcentajes de cobertura en zonas cercanas a los nodos, cubriendo casi en su totalidad los bordes de la zona de estudio delimitada. Sin embargo, en la zona central se diferencian varias áreas de sombra de cobertura debido principalmente a la densidad y altura de edificaciones. Por lo que se vio necesario incrementar a 12 el número de nodos activos.
- Los dos últimos nodos adicionales pertenecen a la operadora Movistar, ya que CNT no cuenta con más infraestructura en la zona. Esto demuestra las ventajas de optar por el uso compartido de infraestructura entre operadoras, ya que no solo coincidió la ubicación de las torres con el centro de las zonas de sombra de cobertura sino que además se obtuvieron resultados positivos respecto a niveles de potencia alcanzados.
- En función de la comparación de niveles de SNIR para las redes de 7, 10 y 12 nodos activos, se concluye que el aumento a 12 radiobases no representa un cambio crítico respecto a interferencia generada por el mayor número de nodos. Por el contrario, los niveles son similares entre las 3 redes.



- Una vez definida la red que proporciona mejores niveles de cobertura, se realizó una variación de ancho de banda asignado a la red. Donde se demostró que se obtiene mejores valores de SNIR para una asignación de 5Mhz donde es posible configurar un factor de reuso de frecuencias de 4. No existe mayor variación entre los resultados para anchos de banda de 10 y 15Mhz, sin embargo, se reconoce que el peor caso se presenta con 20Mhz de ancho de banda.
- Los resultados respecto a rendimiento demuestran velocidades máximas de 24,9Mbps para 5Mhz, 49,9 para 10Mhz, 74,9 para 15MHz y 99,9 para 20MHz. La gran diferencia de velocidades de datos entre las distintas configuraciones, frente a poca diferencia de niveles SNIR, permite considerar el aumento de ancho de banda en la configuración de la red para maximizar la capacidad de la misma.
- Los resultados de variación de técnicas multiantena demostraron que la mejor opción para la red simulada es MIMO, ya que con esta configuración se obtienen niveles superiores a 10dB para un mayor porcentaje de área cubierta, y se supera con 10Mbps las velocidades máximas alcanzadas con las otras técnicas.
- Entre las técnicas SISO y TxDiv, la segunda proporciona mejores niveles de SNIR que se reflejan en un mayor porcentaje de área con velocidades mayores a 11,8Mbps.
- A partir de la simulación realizada, con una frecuencia de transmisión de 700MHz, se obtiene niveles mayores de cobertura, y un mejor comportamiento de las señales frente a las zonas de alta difracción, por lo que se cubre un mayor porcentaje de área que el obtenido con la banda de 1700-2100MHz. Sin embargo se presentan menores niveles de capacidad de red, por lo que la decisión de trabajar con esta banda, debe considerar un equilibrio entre mayor cobertura y menores niveles de rendimiento.
- Por otro lado, a través del análisis de capacidad de la red simulada para la demanda actual de usuarios CNT, esta podría servir a un 20% de usuarios simultáneos con velocidades hasta de 1,6Mbps. Si se configura un ancho de banda de 20 MHz la velocidad se cuadruplica.
- Para un crecimiento futuro de 100% o 200% las velocidades para un 20% de utilización simultáneo de usuarios no superan 1Mbps. Y si se iguala a la demanda actual de Movistar y Claro los valores disminuyen a menos de 300kbps, donde se requiere considerar cual es la probabilidad de uso simultáneo de la red para valores de 132 o 319 usuarios, respectivamente.



- Finalmente, a partir de las simulaciones realizadas, se concluye que la operadora CNT que requiere un mayor número de radiobases para alcanzar niveles medios de cobertura en toda la zona de estudio, obtendría resultados positivos al reutilizar su propia infraestructura, además de las ventajas respecto a gastos económicos.

Sin embargo para una totalidad de cobertura y para mejorar la capacidad de su red, es indispensable la instalación de un mayor número de nodos, para lo que se recomienda el uso compartido de infraestructura en vista de los resultados obtenidos a través de la simulación. Por supuesto, se deberá analizar la factibilidad de uso compartido de los nodos elegidos, en función de los parámetros expuestos en el capítulo 2.

En función de los cálculos de capacidad y de las proyecciones de demanda futura, se confirma nuevamente la necesidad de aumentar el número de radiobases, para lo cual se podría analizar conceptos de femtoceldas y Home eNodeB.



RECOMENDACIONES

Considerando la necesidad de instalación de mayor número de radio bases adicionales a la infraestructura que la operadora CNT posee en la actualidad para el despliegue de una red LTE sobre el Centro Histórico de Cuenca. Y que satisfaga la demanda actual y futura de usuarios con niveles de cobertura aceptables en el mayor porcentaje de área posible, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Se debe realizar una planificación de red que equilibre niveles de cobertura, interferencia, ruido y rendimiento, además de optimizar parámetros técnicos como el direccionamiento y tilt adecuado de las antenas.
- Realizar una estimación apropiada del crecimiento de usuarios con servicio LTE para los próximos meses, de acuerdo a la proyección propia de la operadora.
- Tener en cuenta las estrategias de asignación de recursos en función del índice de calidad de servicio propio de LTE basado en los servicios solicitados.
- Analizar técnicas ICIC para disminuir interferencia co-canal.
- Estudiar el comportamiento de la red con el modo de transmisión TDD.
- Considerar la instalación de nodos denominados Femtoceldas y Home eNodeB.

Se recomienda el uso de una herramienta de simulación para realizar la planificación de la red y estudiar su comportamiento. Este tipo de estudio se puede realizar con fines académicos.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] 3rd Generation Partnership Project. (2008). TR 25.913. *Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 8)*. V8.0.0. Disponible en: <http://www.3gpp.org/DynaReport/25913.htm>. Captura: 15/03/15
- [2] 3rd Generation Partnership Project. (2009). ETSI TR 36.942. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios*. V8.2.0. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36-series.htm>. Captura: 26/03/15
- [3] 3rd Generation Partnership Project. (2013). TS 36.133. *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management (Release 8)*. V8.22. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36133.htm>. Captura: 26/03/15
- [4] 3rd Generation Partnership Project. (2014). TS 36.101. *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. (Release 8)*. V8.25.0. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36101.htm>. Captura: 27/03/15
- [5] 3rd Generation Partnership Project. (2009). TS 36.213. *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures (Release 8)*. V8.8.0. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36213.htm>. Captura: 22/02/15
- [6] Atoll. (2006). *Global RF Planning Solution*. Francia
- [7] Atoll. (2011). *User Manual LTE*. V3.1.0. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/120613980/Atoll-3-1-0-User-Manual-for-LTE-Networks#scribd>. Captura: 22/03/15.
- [8] Barría, K. Ferreira, O. González, R. Jiménez, D. Moreno, P. Rudas, E. *Comparación de los Modelos de Difracción y Propagación*.
- [9] Bermeo, H. Barrera, C. Vintimilla, L. Briones, P. Loaiza, V. Alvaro, V. Cedillo, A. (2012). *Dipecho VII "Implementación de la metodología de análisis de vulnerabilidades a nivel cantonal"*. Cuenca, Ecuador.
- [10] Cox, C. (2012). *An Introduction to LTE* (1a. ed.). Inglaterra, Gran Bretaña: WILEY
- [11] Fernández, I. (2014). *Planificación y dimensionado de una red LTE*. Tesis pregrado. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España



[12] Gessner, C. Roessler, A. (2009). *LTE technology and LTE test; a deskside chat*. Rohde & Schwarz, Alemania

[13] Gessner, C. Roessler, A. Kottkamp, M. (2012). *UMTS Long Term Evolution (LTE)-Technology Introduction*.

[14] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2009). *Reglamento de acceso y Uso compartido de telecomunicaciones*. Quito, Ecuador

[15] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2012). *Plan Nacional de Frecuencias*. Quito, Ecuador. Disponible en: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/plan_nacional_frecuencias_2012.pdf. Captura: 10/03/15

[16] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2012). *Resolución RTV-390-15-CONATEL-2012. Reglamento de acceso y Uso compartido de telecomunicaciones*. Tulcán, Ecuador

158

[17] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2012). *Resolución RTV-679-24-CONATEL-2012*. Quito, Ecuador

[18] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2012). *Resolución TEL-804-29-CONATEL-2012*. Babahoyo, Ecuador

[19] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2012). *Resolución TEL-805-29-CONATEL-2012*. Babahoyo, Ecuador

[20] Gobierno de Ecuador. Consejo Nacional de Telecomunicaciones. (2015). *Resolución-TEL-138-04-CONATEL-2015*. Quito, Ecuador

[21] Gobierno de Ecuador. Ilustre Concejo Cantonal de Cuenca. (2005). *Ordenanza que regula la implantación de estaciones radioeléctricas fijas de los servicios de radiocomunicaciones fijo y móvil terrestre en el cantón Cuenca*. Cuenca

[22] Gobierno de Ecuador. Ilustre Concejo Municipal de Cuenca. (2010). *Ordenanza para la Gestión y Conservación de las áreas Históricas y Patrimoniales del cantón Cuenca*. Cuenca

[23] Holma, H. Toskala, A. (2009). *LTE for UMTS- OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. Inglaterra, Gran Bretaña: WILEY



- [24] International Telecommunication Union. (1994). *Recomendación UIT-R P.525-2, Cálculo de la atenuación en espacio libre*.
- [25] International Telecommunication Union. (2009). *Recomendación UIT-R P.526.11, Propagación por difracción*.
- [26] International Telecommunication Union. (2010). *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*. Electronic publication, Geneva
- [27] International Telecommunication Union. (2012). M.1036-4. *Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications (IMT) in the bands identified for IMT in the Radio Regulations (RR)*. Electronic publication, Geneva
- [28] International Telecommunication Union. (2012). *Recomendación UIT-R P.526.12, Propagación por difracción*.
- [29] Kawser, M. Bin, N. Hasan, N. Raman, M. (2012). *Downlink SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE*. Islamic University of Technology. Awantipora, India
- [30] Parreño, J. (2011). *Ángulo Down Tilt*. Escuela politécnica del Ejército. Quito, Ecuador.
- [31] Radio Frequency Systems. (2015). *Product Data Sheet: APTXV18-206516*. Hanover, Germany
- [32] Rathi, S. Malik, N. Chahal, N. Malik, S. (2014). *Throughput for TDD and FDD 4G LTE Systems*. Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication. Nueva Delhi, India
- [33] Sesia, S. Toufik, I. Baker, M. (2011). *LTE The UMTS Long Term Evolution*. Inglaterra, Gran Bretaña: WILEY
- [34] Software solutions in radiocommunications ATDI. (2005). *Signal propagation modeling In Urban Environment*. Paris, Francia
- [35] Software solutions in radiocommunications ATDI. (2007). *LTE fixed mobile convergence with ICS telecom*. Paris, Francia



[36] Software solutions in radiocommunications ATDI. (2012). *Guidelines for a LTE network design and optimization with ICS designer*. V1.3. Disponible en: <http://www.atdi.com/wp-content/uploads/2012/05/LTE-Guidelines-in-ICS-Designer-v1.3.pdf>. Captura: 28/03/15

[37] Software solutions in radiocommunications ATDI. (2012). *ICS telecom Getting Started*. V0.4. Paris, Francia

[38] Software solutions in radiocommunications ATDI. (2012). *Tutorial LTE network design with ICS telecom*. Paris, Francia

[39] Top Optimized Technologies. (2014). *Estudios sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos*. España

[40] XIRIO Online. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/help/es/index.html>. Captura: 03/03/15

[41] Yuan, M. Cheng, X. *Analysis of Cell Capacity in FDD-LTE Network*. Beijing Telecom Planning & Designing Institute. Beijing, China

[42] Zia, N. (2010). *Pathloss Determination Using Okumura-Hata Model And Cubic Regression For Missing Data For Oman*. Hong Kong, China.



ANEXO 1

La configuración final de las estaciones base eNode B se presentan en la Tabla A1.

Nodos B	Descripción	Latitud	Longitud	Altura (m)	Tilt(°)
BS1	Parque Calderón	2°53'54.6" S	79°0'16.9" O	42	-9
BS2	Colegio Corazones	2°53'42.97" S	79°0'50.08" O	25	-5
BS3	Pista de Bicicross	2°54'18.44" S	79°0'47.95" O	20	-5
BS4	Banco Central	2°54'21.02" S	78°59'50.06" O	25	-4
BS5	Antonio Vega Muñoz y Av. Mariano Cueva	2°53'37.54" S	78°59'58.42" O	30	-6
BS6	Mariscal Sucre y Vargas Machuca	2°53'56.1" S	78°59'59.96" O	32	-6
BS7	Juan Montalvo entre Mariscal Lamar y Gran Colombia	2°53'39.95" S	79°0'29.41" O	30	-7
BS8	Benigno Malo y Rafael María Arízaga	2°53'23.53" S	79°0'12.6" O	20	-5
BS9	Luis Pauta y Antonio Vega Muñoz	2°53'22.16" S	79°1'0.64" O	18	-5
BS10	Av. 12 de Abril y Pasaje Manuel Agustín Aguirre	2°53'57" S	79°0'37" O	20	-5
BS11	Antonio Borrero y Mariscal Lamar	2°53'42.5" S	79°0'9.1" O	30	-10
BS12	Benigno Malo y Calle Larga	2°54'4.9" S	79°0'19.9" O	25	-8