



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE
TELECOMUNICACIONES**

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE VIABILIDAD PARA ACTIVACIÓN DE UNA
RED NEW RADIO (5G) ENTRE LAS BANDAS SUB-6 GHZ Y MMWAVE EN
LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de ingeniero en telecomunicaciones

AUTORES: Richard Santiago Heredia Molina
Douglas Alexander Cárdenas Muñoz

TUTOR: Ing. Klever Carrión C. MSc

Guayaquil - Ecuador

2025

II. Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Richard Santiago Heredia Molina con documento de identificación N°0603766163, y Douglas Alexander Cárdenas Muñoz con documento de identificación N°0931976625 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, a los 7 días del mes de agosto del año 2025.

Atentamente,



Richard Santiago Heredia Molina
0603766163



Douglas Alexander Cárdenas Muñoz
0931976625

III. Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana.

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

Nosotros, Richard Santiago Heredia Molina, con C.I. 0603766163 y Douglas Alexander Cárdenas Muñoz, con C.I. 0931976625, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Científico: “ESTUDIO COMPARATIVO DE VIABILIDAD PARA ACTIVACIÓN DE UNA RED NEW RADIO (5G) ENTRE LAS BANDAS SUB-6 GHZ Y MMWAVE EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Institución facultada para ejercer plenamente los derechos concedidos.


En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, a los 7 días del mes de agosto del año 2025.

Atentamente,



Richard Santiago Heredia Molina
0603766163



Douglas Alexander Cárdenas Muñoz
0937976625

IV. Certificado de dirección del trabajo de titulación.

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Yo, Klever Filiberto Carrión Gordillo, con documento de identificación N°1102293402 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO COMPARATIVO DE VIABILIDAD PARA ACTIVACIÓN DE UNA RED NEW RADIO (5G) ENTRE LAS BANDAS SUB-6 GHZ Y MMWAVE EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL, realizado por Richard Santiago Heredia Molina con documento de identificación N°0603766163, y Douglas Alexander Cárdenas Muñoz con documento de identificación N°0937976625, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, a los 7 días del mes de agosto del año 2025.

Atentamente,



Klever Filiberto Carrión Gordillo
1102293402

V. Dedicatoria

Dedico este artículo a mis padres, quienes son mi pilar para apoyarme en cualquier aspecto de mi vida, impulsándome a seguir adelante en mi camino de aprendizaje. También quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis profesores y al Ing. Patricio Heredia cuya orientación y conocimientos han sido fundamentales para alcanzar mis metas académicas y el desarrollo de este estudio.

Dedico este artículo a mis padres, por brindarme su apoyo a lo largo de este proceso y ser un guía en los momentos de confusión y enseñarme que nunca debo conformarme con menos de lo que puedo lograr. A mis profesores, que han sido una gran influencia en mi vida académica y personal les dedico este artículo como un gesto de reconocimiento y gratitud.

VI. Agradecimiento

Agradecimiento a mi Familia y a mis profesores por el apoyo y la orientación en el tiempo oportuno. También agradecer al Ing. Patricio Heredia que de manera altruista brindó su ayuda y guía para la realización de esta Tesis brindándome sus conocimientos profesionales. Agradezco también a mi tutor por su tiempo y guía para llevar un proceso correcto en el desarrollo del estudio.

Agradezco a mi padres y seres queridos por su apoyo y paciencia a lo largo de este camino académico ya que su confianza en mí ha sido mi mayor motivación. Agradezco a mi tutor y profesores por su gran orientación y su dedicación a lo largo de este proceso por todo eso y más, les dedico este logro con profundo agradecimiento y humildad.

VII. Resumen

El trabajo realizado a continuación analiza la viabilidad del despliegue de redes 5G en las bandas sub-6GHz y mmWave en el barrio Centenario de la ciudad de Guayaquil. Este trabajo, parte de la creciente necesidad de los servicios móviles de alta velocidad y baja latencia en zonas con gran cantidad de usuarios, lo que evidenció la necesidad de evaluar tecnologías que sean capaces de responder a estos desafíos de forma eficiente.

La investigación se desarrolló bajo la metodología del tipo descriptiva-cuantitativa, apoyándose en revisión bibliográfica de artículos indexados y simulaciones. Para desarrollar esto se utilizaron herramientas como G-NetTrack Lite, para la recolección de parámetros de UpLink, y DownLink en el campo, se utilizó MATLAB 2025, donde se realizaron simulaciones del tráfico, latencia y los eventos de handover.

Los resultados mostraron que las bandas sub-6GHz proporcionan una mejor cobertura, de hasta 1000 m por celda, velocidades de más del 3000% mejor a la red actual LTE y estabilidad en zonas urbanas, permitiendo una baja latencia y un menor número de handover. En cambio, la banda mmWave, si bien ofrece mayor movilidad, presenta una cobertura limitada, de hasta 100 m por celda, en especial si se trata de interiores.

Observando los resultados, se concluye que, para los sectores como el barrio Centenario, las bandas sub-6GHz resultan ser más viables para un despliegue inicial de la red 5G, pero se recomienda que en lugares con alta concentración de usuarios se implemente la mmWave como complemento de red.

i. Palabras claves

1; Sub-6GHz 2; mmWave 3; Handover 4; Latencia 5; Tráfico.

VIII. Abstract

The following work analyzes the feasibility of deploying 5G networks in the sub-6GHz and mmWave bands in the Centenario neighborhood of the city of Guayaquil. This work arises from the growing needs for high speed and low latency mobile services in areas with a large number of users, so it is necessary to evaluate technologies that are able to respond to these challenges efficiently.

The research was developed under a descriptive-qualitative methodology, based on a bibliographic review of indexed articles and simulations. To develop this, tools such as G-NetTrack Lite were used to collect UpLink and DownLink parameters in the field, MATLAB 2025 was used, where simulations of traffic, latency and handover events were performed.

The results show that the sub-6GHz bands provide better coverage and stability in urban areas, allowing low latency and fewer handover events. On the other hand, the mmWave band, although it offers greater mobility, has limited coverage, especially in indoor areas.

Observing the results, it was concluded that for sectors such as barrio Centenario, the sub-6GHz bands are more viable for initial deployment of the 5G network, but it is recommended that in places with a high concentration of users, mmWave be implemented as a network complement.

i. Keywords.

1; Sub-6GHz 2; mmWave 3; Handover 4; latency 5; Traffic

IX. Índice de Contenido

I. Portada	1
II. Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	2
III. Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana.	3
IV. Certificado de dirección del trabajo de titulación.	4
V. Dedicatoria	5
VI. Agradecimiento	5
VII. Resumen	6
i. Palabras claves	6
VIII. Abstract	7
IX. Índice de Contenido	8
X. Introducción	10
a. Primera generación 1G AMPS	10
b. Segunda generación 2G GSM	11
c. Tercera generación UMTS	12
d. Cuarta generación 4G LTE	12
e. Quinta generación 5G New Radio	13
f. Estudio del 5G en América Latina	13
g. Motivaciones del 5G	14
h. Banda de Sub-6 GHz	16
i. Banda mmWave	17
j. Matlab	17
k. G-NetTrack	18
l. Artículos relacionados	19
XI. Metodología	21
m. Diagrama de bloques.	21
n. Esquema del funcionamiento de las bandas para 5G	22
o. Simulación en Matlab	22
p. Resultados	32
q. Latencia vs SNR para sub-6 GHz y mmWave	33
r. Throughput (Mbps) vs SNR para sub-6 GHz y mmWave	34
s. Capacidad de tráfico por número de usuarios para sub-6 GHz y mmWave	36
t. Handover para sub-6 GHz y mmWave	37
u. Tabla y datos reales AWS	38

v. Tabla esquematizada para comparación (LTE vs New Radio)	41
w. Costo estimado de despliegue de una red New Radio (5G)	43
XII. Discusión	47
XIII. Conclusiones	49
XIV. Recomendaciones.	50
XV. Bibliografía	51
XVI. Anexos	53
Anexo 1	53
Anexo 2	57
Anexo 3	61

X. Introducción

Desde el principio de las telecomunicaciones móviles se ha demostrado un avance significativo y constante en su evolución; todas las generaciones han tenido un propósito y queda claro que cada sucesor, hasta el presente de quinta generación, ha mejorado el funcionamiento de viabilidad de su antecesor [1]. Siempre que se ha implementado una nueva generación de telecomunicación, se mejoran fallas como la latencia, la velocidad, la capacidad de usuarios y eficiencia espectral, incorporando mejoras continuas, pensando en optimizar la experiencia de los usuarios.

El desarrollo de las comunicaciones inalámbricas ha evolucionado de manera significativa desde sus inicios en la red 1G, donde se receptaban de manera analógicas las llamadas de voz [2], hasta el día de hoy que ya existen dispositivos inteligentes que demandan la necesidad de datos y aumenta la proliferación de servicios de alta velocidad y baja latencia, es aquí donde toma importancia la red 5G.

Claro está, implementar una red 5G trae resoluciones estratégicas para una adecuada infraestructura y espectro de frecuencias portadoras que sean altas para un ancho de banda masivo, lo que incluye una densa adecuación de estaciones de base y antenas cuya cantidad vaya acorde a la infraestructura en mención [1].

Dentro del claro avance tecnológico que implica el uso de las redes 5G en Ecuador, como lo es la autonomía de ciertos dispositivos y el despliegue de altas velocidades de transmisión de datos, se prevé como opciones viables las bandas sub-6 GHz y mmWave para determinar cuál es la más adecuada para una implementación eficiente [3]. Para esto es importante empezar conociendo la historia de las redes.

a. Primera generación 1G AMPS

Fue implementada comercialmente en los años 80s más específicamente en 1983 [4]. Estas redes eran completamente analógicas, su principal función era permitir las comunicaciones de voz de manera inalámbrica. EL sistema que se utilizó fue el AMPS (Advance Mobile Phone System), la tecnología 1G revolucionó la comunicación al permitir la movilidad, aunque con limitaciones técnicas [5].

La calidad de la voz era muy baja, contenía un alto nivel de ruido y distorsión, además de que presentaba constantes caídas de llamada, otro grave problema de esa generación era la seguridad, ya que no tenía mecanismos de cifrado, lo que la volvía fácil para interceptar las llamadas con el uso de radios de escáner. Estas redes operaban en la banda de 800MHz [6] y usaban modulación de frecuencia para transmitir la señal.

A pesar de esto, la 1G fue una pieza clave para el posterior desarrollo de las redes móviles ya que estableció una infraestructura básica y demostrar que era posible además de viable la comunicación móvil.

b. Segunda generación 2G GSM

La segunda generación llegó a principios de los 90 y marcó una transición de lo analógico a lo digital en las comunicaciones móviles, estas redes tenían como estándar a GSM (Global System for Mobile Communication), esto dio una mejora bastante significativa en lo que a calidad de voz se refiere y permitió el desarrollo del servicio de mensajes de texto (SMS) [5]. La digitalización también mejoró la seguridad puesto que se implementaron técnicas de encriptación.

El uso de las tecnologías como TDMA (Time Division Multiple Access) y CDMA (Code Division Multiple Access) permitió utilizar de forma más eficiente el espectro radioeléctrico, dando un aumento en la cantidad de usuarios, además de esto, se pudieron agregar capacidades básicas de transmisión de datos móviles [7], lo que ayudó en la funcionalidad como el acceso a correos electrónicos y servicios de internet básicos mediante WAP (Wireless Application Protocol).

Aunque las velocidades eran bastante bajas comparadas con las actuales (hasta 384kbps con tecnologías como EDGE, Enhanced Data Rates for GSM Evolution) [8], la 2G sentó las bases de servicios móviles que se conoce hoy en día. Esto permitió la proliferación de la telefonía celular en muchas partes del mundo y estandarizó la gestión de voz y datos en las redes móviles, además de la creación de nuevos modelos de negocio en el ámbito de las telecomunicaciones.

c. Tercera generación UMTS

La tercera generación se enfocó para cubrir la necesidad creciente que había en esa época de los servicios móviles de multimedia y la urgencia de acceso a una mayor velocidad. Su implementación comenzó en el año 2000, y uno de los estándares más conocidos es el UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [2], basado en WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Esta generación permitía una tasa de transferencias de datos mucho más altas si son comparadas con su antecesora la 2G, con velocidades teóricas de hasta 2Mbps.

La 3G también habilitó la posibilidad de ver videos online y utilizar aplicaciones que requerían una conexión continua a internet. Esta generación trajo consigo la idea del “internet móvil” lo que abrió las puertas a los smartphones y al nacimiento de los ecosistemas de las aplicaciones inteligentes, además se integró la voz y datos en un solo sistema.

La cobertura global de la 3G no fue inmediata, y su despliegue varió mucho dependiendo del operador y las condiciones regulatorias del país en el que se deseaba implementar, sin embargo, su impacto fue evidente, pues permitió una mejor conexión en tiempo real permitiendo impulsar la productividad, entretenimiento y comunicación a nivel global.

d. Cuarta generación 4G LTE

La cuarta generación, 4G, se enfocó en ofrecer conectividad de alta velocidad para los datos con una arquitectura basada en el protocolo IP [9]. A diferencia de 3G, 4G no fue solo una mejora pequeña o algo simple, sino que tuvo una redefinición del modelo de red. LTE (Long Term Evolution) se convirtió rápidamente en el estándar predominante de esta generación, ofreciendo velocidad de hasta 100Mbps si el dispositivo móvil estaba en movimiento.

Esta generación permitió el desarrollo de servicios de streaming con videos en alta definición, videollamadas de alta calidad, juegos en línea sin tanto retardo y las aplicaciones de realidad aumentada. También mejoró la latencia de las conexiones, creando una comunicación más fluida y estable, en especial en entornos urbanos densos. Las redes 4G favorecieron también el uso de la nube y el almacenamiento remoto de datos.

Desde el punto de vista técnico, 4G trajo mejoras en la eficiencia espectral, la calidad de servicio (QoS) y la arquitectura de red simplificada mediante técnicas como la OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) y MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [6], [9]. Su despliegue incrementó significativamente el uso del teléfono móvil como herramienta de trabajo. Es esta la generación que se está convirtiendo en la base de la sociedad hiperconectada.

e. Quinta generación 5G New Radio

La quinta generación o 5G es la innovación más actual en las redes móviles. No pretende ser solo un aumento de conexión, sino que también una plataforma integral en la que los servicios puedan conectarse, algunos de ellos son el Internet de las Cosas (IoT), los vehículos autónomos y las ciudades inteligentes. Esta red está diseñada para ofrecer mayor velocidad, menor latencia (llegan a ser menor a 1 ms) y capacidad de conectar cientos de dispositivos por kilómetro cuadrado [10].

El 5G también da más opciones de frecuencia como las: sub-6 GHz, que son estables y de mayor alcance, y las mmWave, que permiten velocidades extremadamente altas de hasta 7Gbps, pero con sensibilidad a los obstáculos físicos. Estas diferencias, basados en los estudios comparativos, permiten analizar su viabilidad en los diferentes entornos urbanos, como el de la ciudad de Guayaquil.

f. Estudio del 5G en América Latina

La aplicación de redes 5G en Latinoamérica ha empezado pero los avances son muy diferentes según el país en el que se emplee. Por ejemplo, en Colombia se realizaron pruebas en redes 5G aplicados en ciudades como Bogotá y Medellín en donde se pudo identificar varias oportunidades de utilización en sectores como la salud, industria y el transporte [11]. El proceso fue acompañado por estudios técnicos que evaluaron la viabilidad del uso de espectro en bandas sub-6 GHz y mmWave.

En un ámbito regional, la escasa infraestructura, la desactualización de los marcos regulatorios además de la separación de asignación de espectro, son desafíos cada vez más comunes en países latinoamericanos. Los marcos legales no se encuentran completamente adaptados a las necesidades del New Radio, lo que retarda su implementación de manera eficaz. Contando que la inversión pública y privada cambia significativamente entre regiones, produciendo rupturas

en el ritmo de adopción [10].

En un análisis sobre el estado del 5G en países de Latinoamérica, se reveló que, en Uruguay, Brasil, y Perú ya han comenzado con las licitaciones y despliegue de manera formal. Por otro lado, en países como Ecuador hay avances limitados por retrasos en la asignación de bandas y falta de claridad en la regulación [12], [13] . A pesar de estos retos, se reconoce que New Radio tiene el potencial de transformar los sectores productivos de la región, siempre que se acompañe de estrategias de inclusión digital y políticas de despliegue sostenibles.

g. Motivaciones del 5G

i) Demanda de datos

En los últimos años, se ha generado un gran consumo de datos. Hace una década bastaba solo con una llamada móvil. Hoy en día se ven videos en línea con alta definición, videollamadas y se utilizan aplicaciones que necesitan estar todo el tiempo en línea. Todo esto contribuye a aumentar el tráfico de la red como se puede apreciar en el siguiente gráfico de la figura 1.

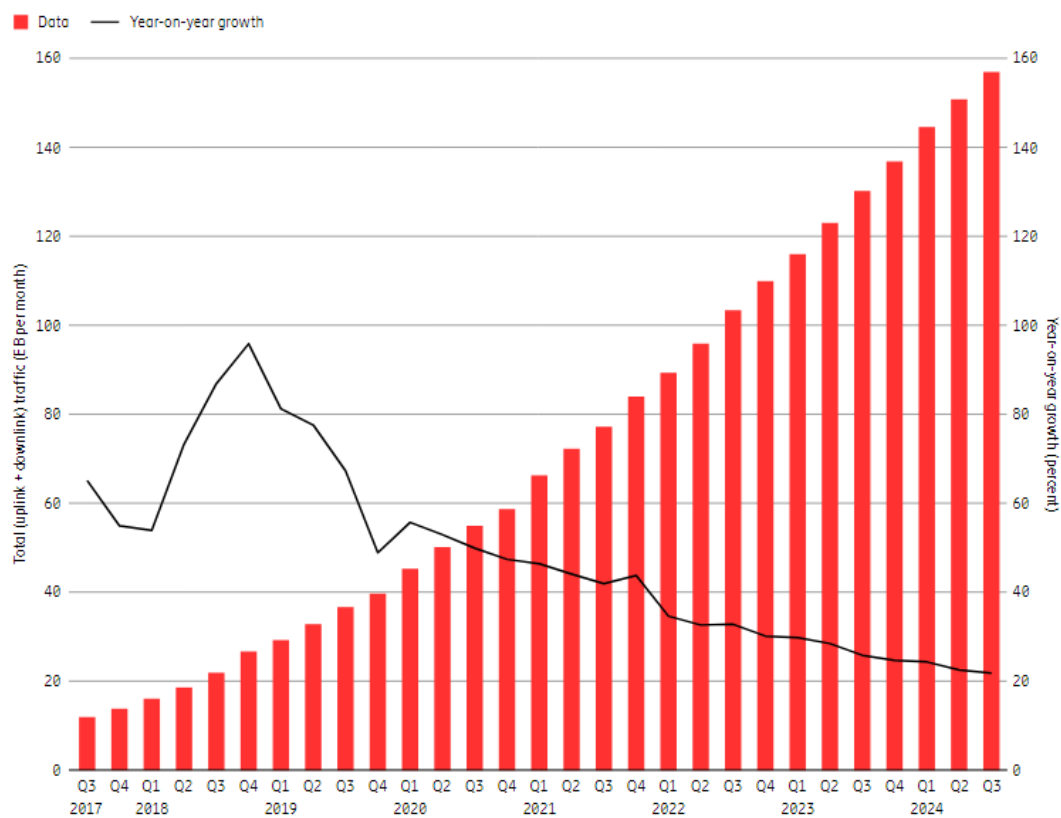


Figura 1 Tráfico de datos global y crecimiento año a año (ExaBytes per month)[14]

Como se puede apreciar en la figura 1, el incremento año a año desde el 2017 ha tenido un crecimiento exponencial del 30%. El crecimiento se mantuvo así exceptuando el pico del 90% que se puede apreciar entre el 2018 y 2019.

A largo plazo, este crecimiento de datos se da por el aumento de las suscripciones de los móviles en dispositivos inteligentes. Según la figura 2, se puede percibir cómo crece el uso de las redes 5G por la necesidad de tener una mejor conexión a internet de manera inalámbrica.

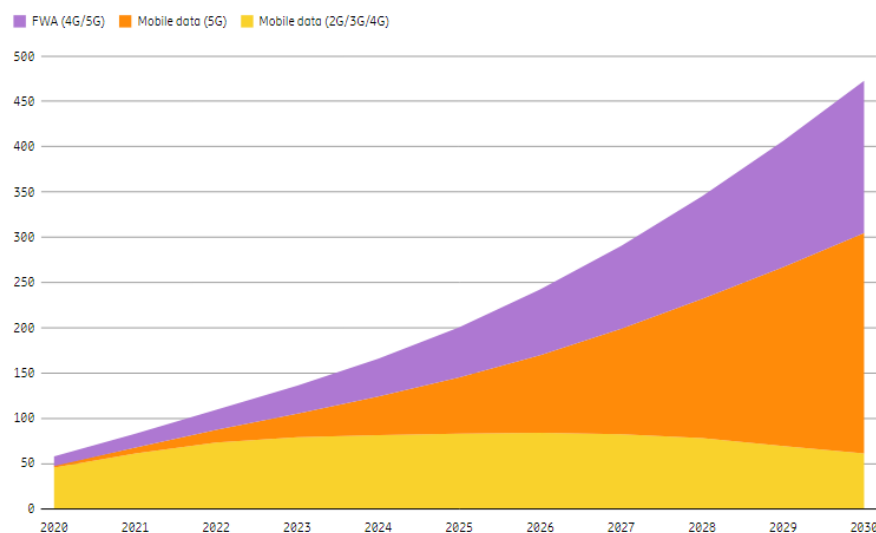


Figura 2. Incremento de la red 5G en el transcurso de los años. [14]

ii) Seguridad

Según [15], la seguridad del 5G se articula en pilares fundamentales como la confidencialidad que garantiza, mediante un cifrado simétrico, la protección de datos sensible en redes críticas contra las interceptaciones y su divulgación ilegal. Se utilizan protocolos como el PDCP (Packet Data Convergence Protocol) y la señalización 5G AKA (Authentication and Key Agreement) para prevenir la pérdida de información en dispositivos IoT.

iii) Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC)

Las comunicaciones URLLC constituyen uno de los principales servicios de la arquitectura 5G New Radio como también lo son el eMMB (enhanced Mobile Broadband) y mMTC (massive Machine-Type Communications). URLLC está diseñada para que funcionen aplicaciones críticas con un nivel de confiabilidad superior al 99.999% [16].

Para lograr esto, URLLC se apoya en algunas innovaciones técnicas al nivel del acceso a radio. Entre estas destaca el uso de los llamados mini-slots, una codificación robusta (como Low-Density Parity-Check y códigos polares) y la duplicación de los paquetes en distintas bandas o tiempos que permite asegurar la entrega exitosa e inclusive bajo situaciones adversas al canal. Esto también permite la preempción de tráfico eMMB, otorgando la prioridad absoluta a paquetes URLLC cuando se encuentra congestión [17].

URLLC se fortalece mediante arquitecturas como la de network slicing, la cual permite crear una partición exclusiva de la red que se dedicará a desarrollar comunicaciones, y el uso del Edge computing aproxima los servidores al usuario final para reducir el tiempo de respuesta. En entornos muy densos, como los sistemas de IoT en los sectores industriales, estos dispositivos son claves para garantizar el QoS. En [18], se demostró como la falta de la coordinación entre estos nodos puede aumentar la latencia de manera significativa si no se emplean estrategias de computación periférica.

Como se observa la URLLC puede dar una mejor calidad de servicio siempre y cuando se apliquen las mejores opciones de optimización de los sistemas de manera correcta para que no se afecten operaciones críticas en ningún momento.

h. Banda de Sub-6 GHz

La banda de sub-6 GHz, o como también suele ser llamada “la banda media”, conforma parte del espectro 5G que abarca las frecuencias desde los 600MHz hasta 6 GHz, concentrada en los rangos de frecuencia de 3.3GHz a 4.2GHz para aplicación comercial. Esta banda tiene dos ventajas cruciales: una cobertura muy amplia y semejante a la actual 4G LTE, con una capacidad de transmisión mayor. La banda sub-6 GHz nos da un equilibrio entre la velocidad, penetración de señal, y la fiabilidad, esto incluso en interiores o zonas altamente pobladas [19].

El funcionamiento óptimo de esta banda depende del diseño avanzado del MIMO, lo que permite enviar y recibir múltiples flujos de datos de manera simultánea. En [20] indica que, en la estaciones base, la antenas deben de superar los desafíos como su acoplamiento entre elementos, manteniendo una alta eficiencia de radicación que sea mayor al 80% y mantener un aislamiento adecuado entre canales [21].

i. Banda mmWave

La banda de ondas milimétricas o (mmWave) en las redes 5G utiliza las frecuencias que se sitúan aproximadamente entre los 24GHz y los 100 GHz, lo cual permite alcanzar altas tasas de transmisión de datos, esto se da gracias al gran ancho de banda que dispone, lo que permite alcanzar velocidades superiores a 1Gbps convirtiéndose como la mejor opción para aplicaciones donde se requiere grandes volúmenes de datos, como lo son un video de alta definición o la realidad aumentada [22].

Sin embargo, las mmWave presentan limitaciones en su propagación. Debido a la alta frecuencia que manejan estas ondas sufren mayores pérdidas por la absorción atmosférica y tiene una clara deficiencia en la capacidad para penetrar los obstáculos físicos como lo son las paredes, árboles o incluso la lluvia. Esto lleva a que la cobertura de una celda mmWave se vea reducida y por lo tanto se requiera de una alta densificación de estaciones bases en comparación con otras bandas, en especial para los entornos altamente densos [23].

Para contrarrestar esas desventajas, se emplean tecnologías como la Massive MIMO y beamforming, que permite dirigir la energía del haz de manera precisa hacia los usuarios lo que mejora de manera significativa la ganancia de señal y reduce la interferencia [24]. Estas técnicas son sumamente importantes para garantizar el rendimiento confiable en escenarios de alta frecuencia, donde las condiciones para su propagación pueden llegar a ser muy adversas.

En términos prácticos, la implementación de las mmWave se enfocó en lugares donde se requiera una gran capacidad de transmisión en espacios reducidos y con una alta demanda de usuarios, es decir, en lugares como estadios, centros comerciales, aeropuertos y redes industriales [25]. En estos casos la mmWave se ve como una solución eficaz para la alta congestión de red que suelen tener esos sitios también da un mejor servicio en cuanto latencia para sectores que lo requieran.

j. Matlab

Matlab es un programa que consiste en sintaxis, operadores, tipos de datos, indexación y manipulación de matrices en algunos de los dominios matemáticos que soporta como lo son el algebra lineal, derivación e integración, transformada de Fourier y otros. Los usuarios pueden presentar resultados gráficos en formas bidimensionales y tridimensionales.

Los datos se pueden importar y exportar, analizarse y preprocesarse como también explorarse visualmente [26].

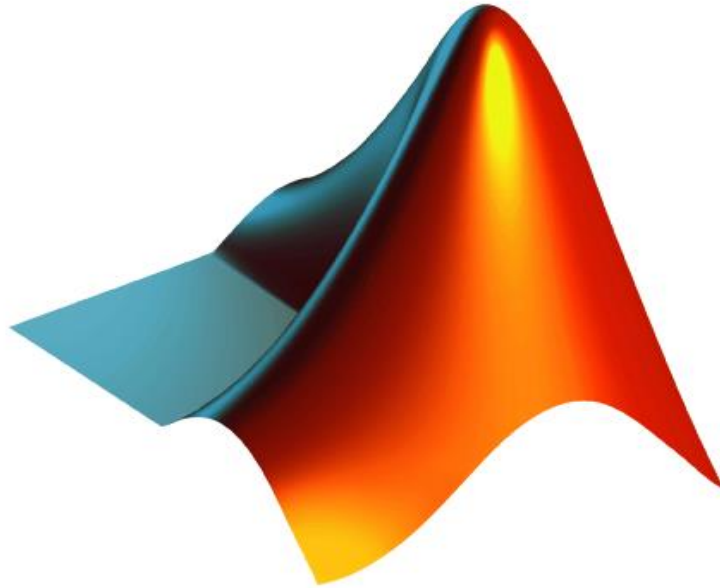


Figura 3 Logotipo de Matlab [27]

k. G-NetTrack

G-NetTrack, figura 4, es una aplicación para el sistema Android desarrollada por Gyokov Solutions que permite monitorear redes móviles 2G, 3G, 4G y 5G desde un smartphone. Su principal función es la de realizar drive test registrando parámetros como el RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality), SINIR (Signal to Interference plus Noise Ratio) Y PCI (Physical Cell Identity). También genera archivos de texto y KML (Keyhole Markup Language), que son elementos muy útiles para analizar. Muestra en gráficas la intensidad de la señal y la ubicación GPS en tiempo real [28].



Figura 4 Captura de pantalla de la aplicación. Fuente: captura hecha desde un teléfono Android.

I. Artículos relacionados

Al igual que el proyecto propuesto, alrededor del mundo se han llevado a cabo distintos temas que se asemejan a este y se consideran importantes para tener en cuenta al momento de plantear el presente estudio. Es por esto por lo que los siguientes artículos son considerados importantes o relevantes para saber lo que se ha descubierto.

En Austria, se realizó un análisis experimental comparativo entre los canales sub-6 GHz y mmWave en condiciones donde existía tráfico vehicular, los datos dictaban de autos con una velocidad máxima de 90 km/h en donde los parámetros que se tomaron en cuenta para

el artículo son la ganancia de trayectoria, dispersión de retardo, doppler spread y coherencia temporal; concluyeron que en entornos de alta movilidad, la banda sub-6 GHz es mejor para cobertura y confiabilidad mientras que, la mmWave necesita de técnicas adicionales como lo son el beamforming para lograr un rendimiento estable[29].

El artículo titulado “Un estudio comparativo de rendimiento entre las bandas de frecuencia onda milimétrica (mmWave) y sub-6 GHz para las redes 5G orientadas a escenarios urbanos”, realizado en Estados Unidos, evaluó el uso de indicadores tales como la velocidad de datos, cobertura, latencia y capacidad de penetración, por lo que terminó concluyendo que ambas tienen ventajas y limitaciones; Si bien la mmWave tiene mayor velocidad esta carece de cobertura, mientras que la Sub-6 GHz tiene mayor cobertura pero una menor velocidad, por lo que el uso combinado de las mismas es la mejor elección [30].

En el artículo de Haghshenas et al. se analizaron la comunicación vehicular en zonas urbanas con el fin de comparar el desempeño de sub-6 GHz y mmWave bajo perspectiva de la comunicación de infraestructura a vehículo. Para esto se usaron simuladores que identificaron que mmWave se veía limitada en propagación, lo que afectaba su capacidad de servicio. Por el contrario, sub-6 GHz resultó más robusta bajo el mismo escenario, especialmente donde había una alta densidad de usuarios [31].

XI. Metodología

La metodología que se usará para la realización de este proyecto es descriptiva y cuantitativa, ya que no se pretende realizar directamente un cambio, sino que se busca analizar, comparar y describir las opciones técnicas que pueden brindar las bandas sub-6 GHz y la mmWave tomando en cuenta la viabilidad del despliegue de una red 5G en la ciudad de Guayaquil (Barrio Centenario).

Para llevar a cabo este estudio se realizó una simulación en Matlab donde mediante las especificaciones definidas por la entidad que estandariza las tecnologías móviles a nivel mundial, 3GPP (3rd Generation Partnership Project), se busca tener resultados técnicos convincentes para realizar la comparativa de las bandas.

m. Diagrama de bloques.

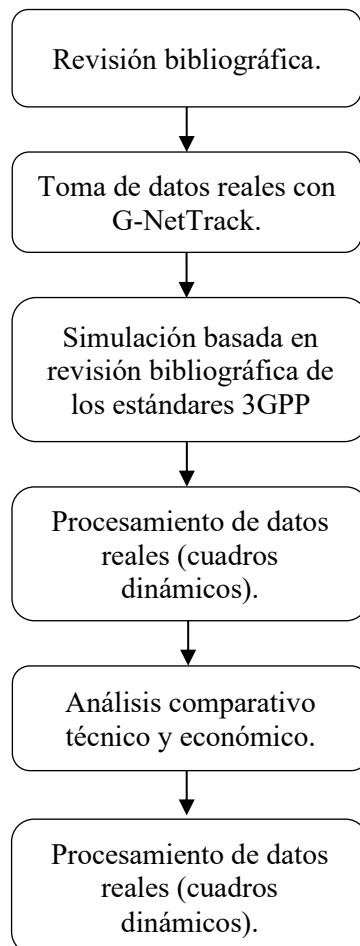


Figura 5 Diagrama de bloques. Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la figura 5, se presenta un diagrama de bloques que resume de forma estructurada las etapas que se desarrolla en este estudio comparativo. Se inicia con una revisión bibliográfica, esto permite establecer un marco teórico sólido de las generaciones de redes desde la 1G hasta la 5G, especificando las bandas sub-6 GHz y mmWave de New Radio. Posteriormente, se tomó datos reales en el Barrio Centenario mediante la aplicación G-NetTrack, destacando parámetros de velocidad de bajada y subida en la red LTE. A continuación, se establece un escenario teórico de rendimiento en una red 5G, considerando todas las condiciones para una implementación eficaz de la red. Finalmente, se realizó un análisis comparativo técnico y económico entre ambas bandas, determinando cual es la más viable para implementar en la red New Radio.

n. Esquema del funcionamiento de las bandas para 5G

En la figura 6 se aprecia el esquema propuesto donde se emplea la configuración MIMO para distribución de la señal que sale de cada una de las antenas hacia el dispositivo móvil, donde se suman para mejorar su calidad. Cabe recalcar que para el presente estudio se realiza una simulación, y el esquema propuesto es meramente didáctico.

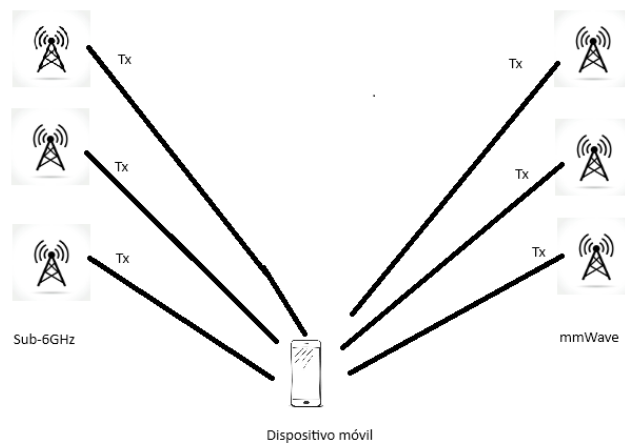


Figura 6. Esquema de la implementación de las bandas para 5G. Fuentes: Autores.

o. Simulación en Matlab

Los parámetros utilizados en esta simulación se seleccionaron según los estándares de la 3GPP para garantizar que esta simulación sea lo más técnica posible.

i. Bandas de frecuencias utilizadas

Las bandas de frecuencias que se asignaron para la Sub-6 GHz y mmWave fueron basadas en el estándar TS 38.101 de la 3GPP en donde para:

- Sub-6 GHz fue de 3.5GHz que es la FR1 que está en la banda n78.
- mmWave fue de 28GHz que es FR2 que es la banda n257.

ii. Ancho de banda asignado

El ancho de banda asignado fue elegido mediante las sugerencias del estándar TS 38.101 3GPP que para Sub-6 GHz se escogió el ancho de 100 MHz y para mmWave se optó por el de 400 MHz.

iii. Configuración MIMO

Para la banda de sub-6 GHz se utilizó la configuración MIMO 4x4 que está establecida en estándar TS 38.214 (1).

$$G_{MIMO} = 10 \cdot \log_{10}(N_{tx} \cdot N_{rx}) \quad (1)$$
$$G_{MIMO} = 10 \cdot \log_{10}(4 \cdot 4)$$
$$G_{MIMO} = 12 \text{ dB}$$

Donde:

- G_{MIMO} es la ganancia de la configuración MIMO
- N_{tx} y N_{rx} son el número de los elementos de transmisión y recepción respectivamente.

Mientras que para la mmWave se escogió una configuración Massive MIMO 8x8 que también se encuentra establecida en el mismo estándar que es el TS 38.214.

$$G_{\text{Massive MIMO}} = 10 \cdot \log_{10}(8 \cdot 8) = 18 \text{ dB}$$

iv. Modelos de canal

El modelo de canal utilizado tanto para Sub-6 GHz y mmWave fue basado en el estándar TR 38.901 de la 3GPP.

Para la banda Sub-6 GHz fue el canal “TDL-C” por sus siglas en inglés Tapped Delay Line (Línea de Retardo con Derivaciones). La letra C nos indica que es un perfil específico de dispersión temporal (delay spread), definido en los estándares

3GPP que es un perfil de retardo para zonas urbanas lo que hace óptimo para la simulación. Se trabajará usando una portadora con espaciado de 15 kHz y su número de bloques ser 50.

Mientras que para la banda mmWave se eligió el canal CDL-D (URLLC) sus siglas corresponden a Cluster Delay Line (Línea de Retardo por Clusters) la D nos indica un perfil de canal específico con características de dispersión angular y temporal definidas por alta direccionalidad, lo que nos da enlaces estables.

La URLLC significa Ultra Reliable Low Latency Communications (Comunicaciones Confiables y de Baja Latencia), es la característica emblema de este tipo de banda.

v. **Parámetros de propagación**

La comunicación que se crea entre el UE (User Equipment) y gNB (gNodeB) es la distancia en metros entre el dispositivo del usuario UE y gNB que es la estación base que gestiona la conexión inalámbrica, como se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de propagación

Distancia UE-gNB (m)	Altura gNB (m)	Altura UE (m)
150	25	1.5

vi. **Cálculo de las pérdidas de propagación (PL, Path Loss)**

Para el canal de Sub-6 GHz se utilizó el Modelo UMi (Urban Microcell) el cual ayuda para calcular la pérdida por trayectoria en el espacio libre, puesto que es una versión simplificada basada en el modelo 3GPP TR 38.901, que se enfoca específicamente en las pérdidas por línea de vista directa (LOS) en los entornos urbanos micro celulares. La fórmula 2 sirve para calcular las pérdidas de propagación:

$$PL_{sub6} = 32.4 + 21 \times \log_{10}(d) + 20 \times \log_{10}(f_{resub6}/1GHz) \quad (2)$$

PL_{sub6} es la pérdida de propagación de la banda sub-6 GHz.

d : es la distancia del UE-gNB en metros.

f_{resub6} : es la frecuencia de la banda en este caso 3.5GHz.

32.4: constante base de la pérdida en espacio libre para una señal.

Para mmWave se optó el modelo UMi Canyon en su versión para la banda mencionada anteriormente, ya que se basa en el estándar TS 38.901 y permite un cálculo más preciso con la fórmula 3.

$$PL_{mmWave} = 32.4 + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_{mmwave}/1GHz) + 0.3 \times d \quad (3)$$

PL_{mmWave} es la pérdida de propagación de la banda mmWave.

d : es la distancia del UE-gNB en metros.

f_{mmwave} : es la frecuencia de la banda mmWave para este caso es 28GHz.

vii. Configuración de arreglos de antenas (basado en 3GPP TR 38.901)

Para poder representar las configuraciones típicas de antenas en redes 5G, se modelaron 2 arreglos uniformes rectangulares (URA), diferenciándose entre sub-6 GHz y mmWave.

En sub-6GHz, se utilizó una matriz de dipolos eléctricos en configuración 4x4, para ofrecer una mejor cobertura, que es adecuada para la penetración de la señal en entornos urbanos.

Para el caso de mmWave, se empleó una matriz de 8x8 de micro parches que está operando a 28 GHz, con el objetivo de representar la alta directividad y la ganancia angular más estrecha. Este tipo de antenas es comúnmente utilizado en despliegues densos. Para ver la frecuencia de las bandas se presenta la tabla 2.

Tabla 2. Frecuencia de las bandas.

TIPO DE BANDA	dBi	Frecuencia (GHz)
Sub-6 GHz	8	3.5
mmWave	5	28

viii. Ganancia total del arreglo de antenas (según TR 38.901)

La ganancia total del arreglo se calculó utilizando la ganancia individual de cada elemento como el número total de elementos transmisores y receptores. Bajo esta premisa se utilizó la fórmula 4.

$$G_{total} = 10\log_{10}(N_{tx} \times N_{rx}) + G_{elemento} \quad (4)$$

Donde:

- G_{total} es la ganancia total del arreglo de antenas.
- $G_{elemento}$ es la ganancia de un solo radiador (en dBi).
- N_{tx} y N_{rx} son el número de los elementos de transmisión y recepción respectivamente.

En el caso de Sub-6 GHz (3.5GHz), tiene arreglos de 4x4 y dipolos de 8 dBi por lo que la ganancia resultante representa la cobertura moderadamente directiva y omnidireccional en azimut.

Para mmWave (28 GHz), se consideró una configuración de 8x8 con parches 5dBi, resultando en una ganancia significativamente mayor lo que la hace ideal para los escenarios con alta pérdida por trayectoria.

ix. Beamforming en entornos mmWave (según TR 38.901)

Para mejorar la eficiencia del enlace en bandas milimétricas, donde su propagación presenta mayores pérdidas y sensibilidad a obstáculos, se implementó el beamforming digital. La ganancia por beamforming se aproxima teóricamente como la fórmula 5.

$$G_{beamforming} = 10\log_{10}(N_{tx}) \quad (5)$$

Donde:

- $G_{beamforming}$ es la ganancia por beamforming.
- N_{tx} es el número de los elementos de transmisión.

Esta ganancia se suma a la del arreglo, mejorando así la señal ruido, mitigando las posibles interferencias y aumentando su eficiencia espectral.

x. **Cálculo de la relación señal-ruido efectiva (SNR)**

En el trabajo se consideró una SNR efectiva, que incluye la potencia de transmisión base, ganancias del sistema de antenas, las pérdidas de propagación y el nivel del ruido térmico.

Para el caso de la banda de Sub-6 GHz, la ganancia total se limita a la suma de arreglo de antenas, como se ve en la fórmula 6, por otro en mmWave, se adiciona una ganancia por beamforming, fórmula 7, lo que permite compensar pérdidas inherentes a frecuencias altas.

Sub-6 GHz:

$$SNR_{efectiva,sub6} = SNR_{base} + G_{arraysub6} - PL_{sub6} - 10\log_{10}(N_0) \quad (6)$$

Donde:

- $SNR_{efectiva,sub6}$ es la relación señal-ruido efectivo.
- SNR_{base} es la relación señal-ruido.
- $G_{arraysub6}$ es la ganancia del arreglo MIMO en sub-6 GHz.
- PL_{sub6} es la pérdida de propagación del transmisor al receptor.
- N_0 representa la densidad espectral de potencia del ruido.

mmWave:

$$SNR_{efectiva,mmWave} = SNR_{base} + G_{arraymmwave} + G_{beamforming} - PL_{mmwave} - 10\log_{10}(N_0) \quad (7)$$

Donde:

- SNR es la relación señal-ruido.
- $G_{arraymmwave}$ es la ganancia del arreglo MIMO en mmWave.
- $G_{beamforming}$ es la ganancia del beamforming.
- PL_{mmwave} es la pérdida de propagación del transmisor al receptor.
- N_0 representa la densidad espectral de potencia del ruido.

La fórmula 8 explica N_0 :

$$N_0 = k * T \quad (8)$$

- N_0 representa la densidad espectral de potencia del ruido.
- $k = 1.38 * 10^{-23} jK$ es la constante de Boltzmann.
- T es la temperatura en kelvin (usualmente se asumen 290K para la temperatura ambiente).

Esto sirve como base para estimar el BER y el throughput entre otras métricas de rendimiento en el análisis comparativo de ambas bandas aportando una estimación del canal en un entorno urbano poblado.

xi. **Cálculo de BER en función del SNR efectivo**

La tasa de error de bit es una métrica que se utiliza para evaluar la calidad de un sistema de comunicación. En esta simulación se la consideró para tener un cálculo teórico para dos esquemas distintos:

En sub-6 GHz con modulación QPSK

Se empleó una modulación QPSK (Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura) ya que esta tiene una fuerte robustez frente al ruido y se calcula según la función estándar con la fórmula 9:

$$BER_{QPSK} = Q \sqrt{2 \times SNR_{eff}} \quad (9)$$

Donde:

- BER_{QPSK} es el bit de error para la modulación QPSK
- $Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$ es la función Q.
- SNR_{eff} es la relación señal ruido efectiva, que se expresa en valor lineal (no en decibelios), que se calcula previamente con la fórmula 10:

$$SNR_{eff} = 10 \left(\frac{SNR_{effdB}}{10} \right) \quad (10)$$

mmWave con modulación 256-QAM

Para mmWave se utilizó 256-QAM, una modulación de alta eficiencia espectral, aunque más sensible al ruido. La fórmula 11 desarrolla esta modulación:

$$BER_{QAM} = \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \times SNR_{eff}}{M - 1}} \right) \quad (11)$$

Donde:

- BER_{QAM} es el bit de error para la modulación 256QAM.
- $M = 256$ (Trabaja en la modulación 256QAM).
- $\log_2 M = 8$ (Arreglo MIMO de antenas con configuración 8x8).

Estas fórmulas corresponden a un caso teórico, bajo un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise).

xii. Cálculo de la Latencia

En esta simulación la latencia se modeló como una función empírica y estocástica del SNR efectivo, representando así la variabilidad del canal con las fórmulas 12 y 13:

Latencia en la banda de Sub-6 GHz

$$Latencia_{Sub6} = \max(5, 10 - 0.2 \times SNR_{eff} + 0.8 \times Ruido\ Gausiano) \quad (12)$$

Donde:

- $Latencia_{Sub6}$ es la latencia para Sub-6 GHz.
- SNR_{eff} : está basada para la banda de Sub-6 GHz en dB.
- El valor mínimo se lo fija en 5ms como latencia mínima realista para Sub-6 GHz, similar a lo propuesto en TR 38.802 para eMBB de la 3GPP.

Latencia en mmWave

$$Latencia_{mmWave} = 2,5 - 0.3 \times SNR_{eff} + 0.5 \times \text{Ruido Gausiano} \quad (13)$$

Donde:

- $Latencia_{mmWave}$ es la latencia para mmWave.
- Se toma en consideración que los sistemas mmWave ofrecen menores latencias gracias a su mayor ancho de banda.
- También se establece una latencia mínima de 2 ms, que es coherente con escenarios URLLC en las bandas milimétricas.

xiii. Throughput en función del SNR efectivo

En base con la especificación TS 38.306 de la 3GPP el cálculo de throughput (capacidad efectiva de la transmisión de datos) se la realizó tomando en cuenta la eficiencia espectral que depende directamente de la relación de la señal con el ruido (SNR).

En esta simulación, se aplicó la fórmula 14 basada en la capacidad del canal de Shannon modificada por el factor de la eficiencia que ayuda a reflejar las pérdidas por codificación y características físicas de cada banda de operación.

$$Throughput = B \times \log_2(1 + SNR) \times N \quad (14)$$

Donde:

- *Throughput* es la capacidad efectiva de transmisión de datos.
- *B*: Es el ancho de banda del canal.
- $\log_2(1 + SNR)$: Es la capacidad del canal de Shannon en bits/s.
- *N*: es la eficiencia espectral del sistema (normalmente se la relaciona con el overhead de MAC, PHY, HARQ, codificación, control, etc) en este caso será multiplicado para la eficiencia característica de la banda de Sub-6 GHz y mmWave. Que son 0.6 y 0.55 respectivamente para cada banda.

Los valores usados para el parámetro *B* en la simulación son los anchos de banda correspondientes a Sub-6 GHz y mmWave, mientras que el SNR que se toma en cuenta es el SNR efectivo de los mismos, así también, como una eficiencia característica para cada una de las bandas.

xiv. Tráfico de la red

Para el modelado del comportamiento dinámico del tráfico de usuarios en entornos urbanos, se implementó la aleatoriedad que permite simular la variabilidad de la demanda de datos móviles dependiendo de la cantidad de usuarios. Este modelo toma como referencia los lineamientos del estándar de la 3GPP TS 23.501.

Para la red Sub-6 GHz FR1, el tráfico generado por el usuario se modeló utilizando la siguiente fórmula 15.

$$\text{Tráfico}_{\text{sub-6}}(u) = 100 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{U(u)}{20} \right) \quad (15)$$

Donde:

- $\text{Tráfico}_{\text{sub-6}}(u)$ es el tráfico que se genera en la banda sub-6 GHz.
- $U(u)$ Número de usuarios activos en el instante o índice *u*.
- $\log_{10} \left(1 + \frac{U}{k} \right)$ Modelo de crecimiento logarítmico del tráfico (saturación progresiva).

p. Resultados

Tabla y Gráfico de BER VS SNR para sub-6 GHz y mmWave

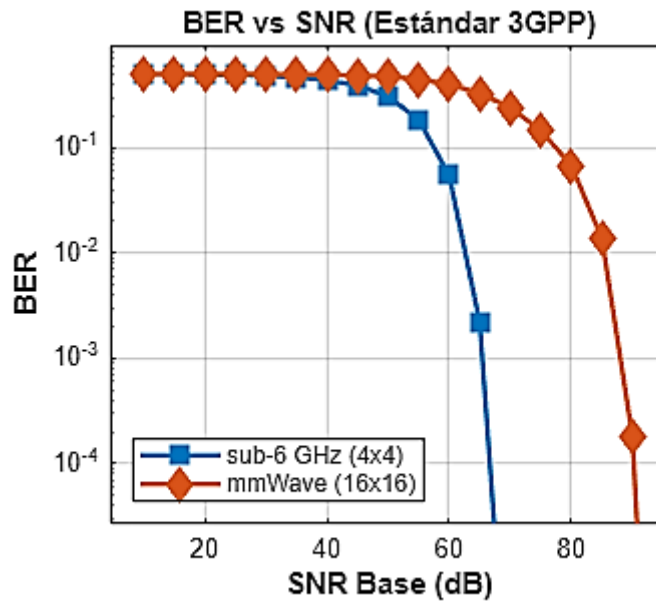


Figura 7 Gráfico de BER VS SNR Fuente: Simulación de Matlab

Tabla 3 Comparación del BER en mmWave VS Sub6 -GHz

SNR (dB)	BER sub-6 GHz	BER mmWave GHz
10	4.9798 × 10 ⁻¹	4.9973 × 10 ⁻¹
15	4.9641 × 10 ⁻¹	4.9952 × 10 ⁻¹
20	4.9361 × 10 ⁻¹	4.9915 × 10 ⁻¹
25	4.8866 × 10 ⁻¹	4.9849 × 10 ⁻¹
30	4.7980 × 10 ⁻¹	4.9731 × 10 ⁻¹
35	4.6412 × 10 ⁻¹	4.9522 × 10 ⁻¹
40	4.3637 × 10 ⁻¹	4.9145 × 10 ⁻¹
45	3.8789 × 10 ⁻¹	4.8458 × 10 ⁻¹
50	3.0625 × 10 ⁻¹	4.7152 × 10 ⁻¹
55	1.8387 × 10 ⁻¹	4.4551 × 10 ⁻¹
60	5.4608 × 10 ⁻²	3.9748 × 10 ⁻¹
65	2.1976 × 10 ⁻³	3.2660 × 10 ⁻¹
70	2.0409 × 10 ⁻⁷	2.3982 × 10 ⁻¹
75	0	1.4469 × 10 ⁻¹
80	0	6.7666 × 10 ⁻²
85	0	1.3713 × 10 ⁻²
90	0	1.7989 × 10 ⁻⁴
95	0	5.1481 × 10 ⁻¹⁰
100	0	0

En la figura 7 y la tabla 3 se aprecia que la Banda mmWave presenta una BER significativamente más alta que sub-6 GHz en todos los niveles de SNR hasta aproximadamente 70 dB.

Mientras que Sub-6 GHz comienza a alcanzar BER prácticamente nula desde los 65 dB, mmWave aún mantiene errores considerables incluso en 75 y 80 dB, lo cual indica una degradación más lenta de errores frente al aumento de SNR.

A partir de 90 dB, mmWave se acerca al rendimiento de sub-6 GHz, logrando BER inferiores a 10^{-4} , hasta llegar a BER nula en 100 dB.

q. Latencia vs SNR para sub-6 GHz y mmWave

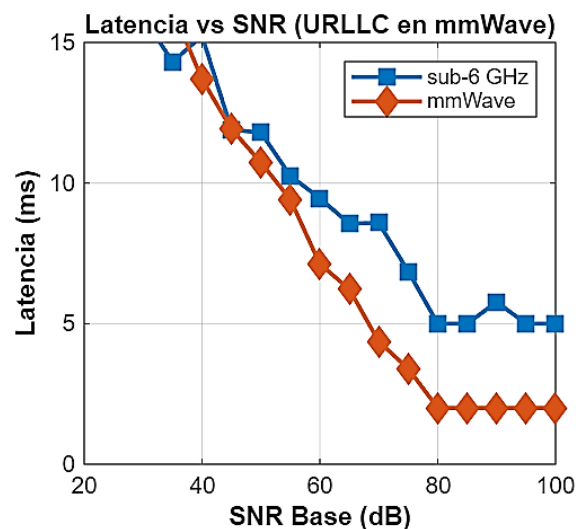


Figura 8. Gráfica de latencias con respecto al SNR Fuente: Simulación de Matlab

Tabla 4. Tabla de Comparación de la latencia de Sub-6GHz VS mmWave

SNR (dB)	Latencia sub-6 GHz (ms)	Latencia mmWave (ms)
10	19.35	23.19
15	19.56	21.43
20	16.99	19.50
25	15.75	18.72
30	15.92	17.14
35	14.31	16.18
40	15.24	13.70
45	11.90	11.92
50	11.80	10.73
55	10.25	9.41
60	9.46	7.12
65	8.56	6.23
70	8.58	4.36
75	6.86	3.40
80	5.00	2.00

85	5.00	2.00
90	5.77	2.00
95	5.00	2.00
100	5.00	2.00

En la tabla 4 se evalúa la latencia promedio en función del SNR:

- Ambas tecnologías muestran una tendencia decreciente de latencia con el aumento del SNR, resultado esperado y se puede visualizar en la figura 8.
- Debajo de SNR (10–30 dB), mmWave tiene mayores retardos que sub-6 GHz, lo que puede deberse a la mayor pérdida de propagación y necesidad de retransmisiones.
- A partir de 45 dB, mmWave supera a sub-6 GHz, logrando latencias más bajas, estabilizándose en 2 ms desde 80 dB en adelante.
- En contraste, sub-6 GHz se estabiliza en torno a los 5 ms, lo que sigue siendo aceptable para servicios de voz y video en tiempo real.

r. Throughput (Mbps) vs SNR para sub-6 GHz y mmWave

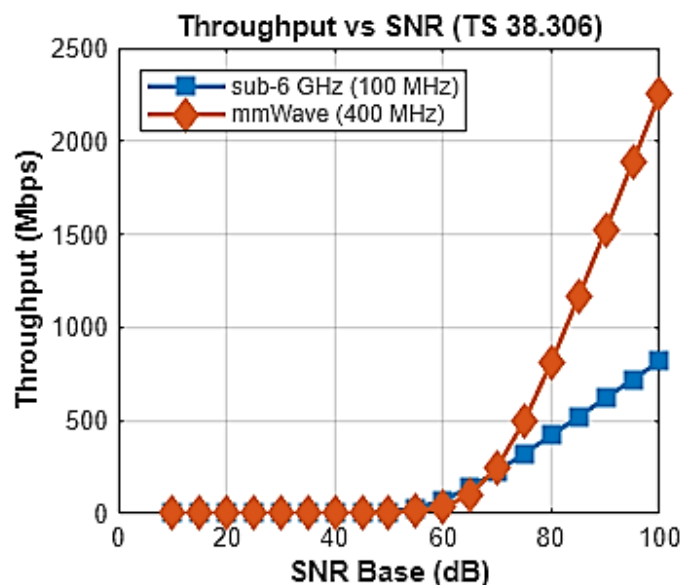


Figura 9 Gráfico de Throughput Mbps vs SNR Fuente: Simulación de Matlab

Tabla 5 Tabla comparativa Throughput VS SNR Fuente: Autores

SNR (dB)	Throughput sub-6 GHz (Mbps)	Throughput mmWave (Mbps)
10	0.00	0.00
15	0.00	0.00
20	0.01	0.00
25	0.04	0.01
30	0.11	0.04
35	0.35	0.12
40	1.10	0.38
45	3.44	1.20
50	10.45	3.79
55	29.47	11.85
60	71.45	36.04
65	140.29	102.29
70	227.37	250.62
75	322.64	498.05
80	420.86	814.72
85	520.06	1163.02
90	619.57	1522.82
95	719.18	1886.44
100	818.82	2251.28

En la tabla 5 se analiza el rendimiento (throughput) según el SNR:

- A SNR menores de 30 dB, ambas tecnologías tienen un throughput prácticamente nulo, lo que refleja un canal inutilizable, se puede visualizar en la figura 9.
- Desde 40 dB, comienza una crecida exponencial, con mmWave mostrando un aumento más agresivo y elevado, alcanzando más de 2.2 Gbps a 100 dB.
- Sub-6 GHz crece más lentamente, alcanzando cerca de 820 Mbps al mismo punto.

s. Capacidad de tráfico por número de usuarios para sub-6 GHz y mmWave

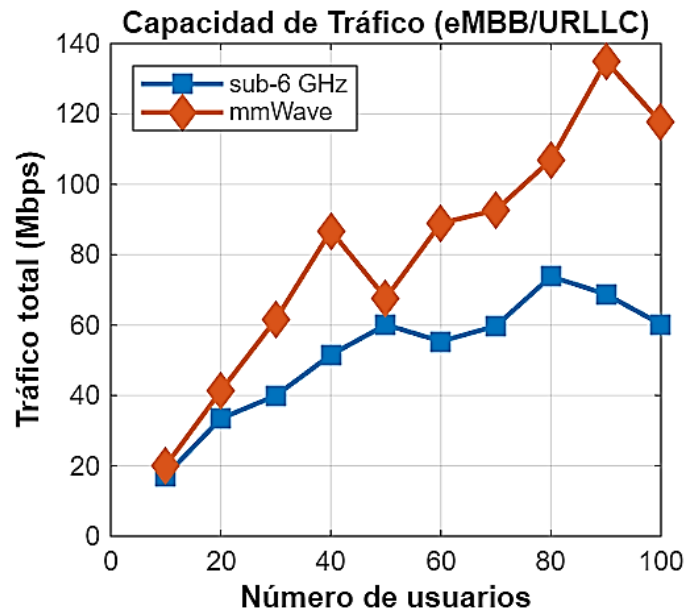


Figura 10 Capacidad de tráfico Mbps vs número de usuarios Fuente: Matlab

Tabla 6 Tabla comparativa de tráfico en Mbps

Usuarios	Tráfico sub-6 GHz (Mbps)	Tráfico mmWave (Mbps)
10	17.21	20.06
20	33.44	41.28
30	39.96	61.61
40	51.53	86.80
50	60.09	67.66
60	55.37	88.97
70	59.75	92.67
80	73.82	106.97
90	68.76	134.95
100	60.21	117.55

Tabla 7 Tabla comparativa de tráfico en Mbps

En la tabla 6 se analiza el tráfico total soportado por cada tecnología a medida que crece el número de usuarios.

Ambas tecnologías muestran un incremento de tráfico conforme aumentan los usuarios, aunque no de manera estrictamente lineal.

mmWave supera ampliamente a sub-6 GHz en la mayoría de los puntos, alcanzando hasta 134.95 Mbps con 90 usuarios, en comparación con 68.76 Mbps para sub-6 GHz. Sin embargo, también se observa en la figura 10 una variabilidad en el tráfico, especialmente en sub-6 GHz, posiblemente por congestión o asignación dinámica de recursos.

t. Handover para sub-6 GHz y mmWave

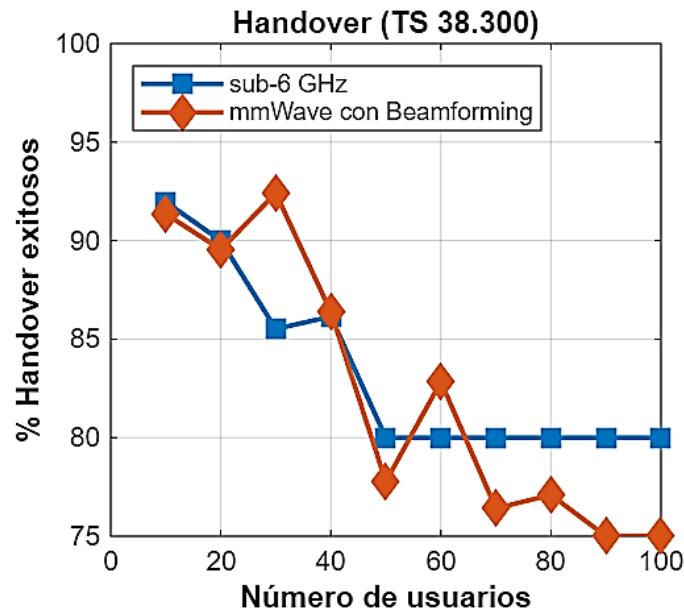


Figura 11 Gráfico de Handover exitosos vs número de usuarios Fuente: Simulación de Matlab

Tabla 8 Tabla comparativa del Handover de Usuarios Fuente: Autores

Usuarios	Handover sub-6 GHz (%)	Handover mmWave (%)
10	91.97	91.35
20	90.00	89.55
30	85.52	92.40
40	86.15	86.39
50	80.00	77.77
60	80.00	82.84
70	80.00	76.41
80	80.00	77.09
90	80.00	75.00
100	80.00	75.00

La tabla 7 presenta el porcentaje de handovers exitosos (HO) en ambas bandas:

Sub-6 GHz mantiene una tasa estable del 80% para 50 o más usuarios, lo que refleja robustez y confiabilidad en entornos densos.

mmWave, en cambio, muestra una tendencia descendente desde 30 usuarios en adelante, bajando hasta 75% en condiciones de alta carga.

Este comportamiento, que se aprecia en la figura 11, en mmWave se atribuye a su menor cobertura y alta direccionalidad, lo que dificulta mantener la conexión durante la transición entre celdas.

u. Tabla y datos reales AWS

La recolección de datos se dio a cabo en la ciudad de Guayaquil, en un entorno urbano donde el análisis y la evaluación referencial de costos ayudará a determinar que tecnología de New Radio es más viable a implementar, las bandas de frecuencia sub-6 GHz o mmWave, en el sector urbano del Barrio Centenario.

Como parte del enfoque cuantitativo, las velocidades reales de UpLink y DownLink se realizaron con mediciones exactas arrojadas por la aplicación G-NetTrack, en diferentes puntos cuya latitud y longitud también se detalla dentro del barrio Centenario, bajo la red LTE. Los datos obtenidos ayudan a dar un enfoque real del rendimiento actual de la red móvil Claro, existente en Ecuador. Posteriormente se tiene datos teóricos esperados a obtener en una red 5G en ambas bandas de frecuencias, de tal forma que se permita proyectar unas mejoras significativas en desempeño y calidad que ofrece New Radio para los usuarios. La información obtenida será presentada de forma organizada con ayuda de tablas comparativas y cuadros dinámicos desde una hoja de Excel. La tabla 8 a continuación es la Base de Datos obtenida con el software descrito.

Tabla 9. base de datos obtenidos con el software G-NetTrack. Fuente: Autores

HORA	Longitud	Latitud	EVENTO	eNB	CID	ARCFN	PCI	TA	DL (MHz)	UL (MHz)	RSRP	SNR	Bajada Mbps	Subida Mbps
16:13	-79.89049	-2.21612	-	200307	12	2250	207	0	2140.0	1740,0	-93	1.0	2,79	25,10
16:16	-79.89059	-2.216656	-	200307	12	2250	207	1	2140.0	1740,0	-95	1.0	1,43	15,50
16:20	-79.89004	-2.217196	-	200307	12	2250	207	1	2140.0	1740,0	-95	1.0	2,62	13,30
16:22	-79.88919	-2.217607	-	200307	12	2250	207	2	2140.0	1740,0	-93	1.0	1,35	16,40
16:24	-79.89006	-2.218356	-	200307	12	2250	207	2	2140.0	1740,0	-108	0.0	1,36	3,68
16:26	-79.89025	-2.219650	HD4G4G	200310	13	2250	47	1	2140.0	1740,0	-100	-1.0	37,20	22,60
16:29	-79.89054	-2.220898	-	200310	13	2250	47	1	2140.0	1740,0	-81	2.0	149,00	37,60
16:31	-79.89069	-2.222038	-	200310	13	2250	47	1	2140.0	1740,0	-103	0.0	57,00	25,30
16:33	-79.89089	-2.223505	-	200310	13	2250	47	1	2140.0	1740,0	-103	0.0	38,60	12,30
16:39	-79.89143	-2.216701	CR4G4G	200307	12	2250	207	1	2140.0	1740,0	-86	0.0	4,89	16,10
16:42	-79.89174	-2.218317		200307	12	2250	207	2	2140.0	1740,0	-103	0.0	0,86	16,30
16:44	-79.89211	-2.220538	HD4G4G	200310	13	2250	47	2	2140.0	1740,0	-106	-1.0	12,70	18,70
16:46	-79.89236	-2.222392	HD4G4G	200307	12	2250	207	5	2140.0	1740,0	-99	0.0	0,30	9,45
16:48	-79.89254	-2.224000	CR4G4G	200455	13	2250	56	2	2140.0	1740,0	-100	-1.0	14,50	5,34
16:51	-79.89429	-2.222966	CR4G4G	201661	11	2250	227	2	2140.0	1740,0	-85	0.0	38,30	38,50
16:53	-79.89412	-2.222053	HD4G4G	200311	12	2250	39	0	2140.0	1740,0	-66	1.0	104	38,20
16:55	-79.89384	-2.220676	CR4G4G	200311	11	2250	40	0	2140.0	1740,0	-69	1.0	175	38,70
16:57	-79.89338	-2.218518	CR4G4G	200311	11	2250	40	1	2140.0	1740,0	-81	1.0	90,20	38,30
16:59	-79.89402	-2.215276	HD4G4G	200307	14	2250	253	2	2140.0	1740,0	-100	0.0	52,70	25,50
17:03	-79.89650	-2.216737	HD4G4G	200506	11	2250	113	1	2140.0	1740,0	-81	1.0	89,60	40,50
17:05	-79.89812	-2.218847	HD4G4G	200313	11	2250	42	3	2140.0	1740,0	-98	-1.0	6,69	25,00
17:06	-79.89754	-2.216436	HD4G4G	200506	11	2250	113	0	2140.0	1740,0	-81	0.0	49,30	38,20
17:09	-79.89546	-2.210031	HD4G4G	201649	13	2250	365	1	2140.0	1740,0	-88	0.0	53,60	38,80
17:11	-79.89302	-2.209729	HD4G4G	201649	11	2250	363	0	2140.0	1740,0	-90	0.0	64,70	31,30
17:14	-79.89151	-2.211210	HD4G4G	201649	32	975	364	0	1967.5	1887.5	-80	0.0	60,60	34,90
17:16	-79.89236	-2.213923	HD4G4G	200307	33	975	209	0	1967.5	1887.5	-81	0.0	25,70	19,60
17:17	-79.89179	-2.214364	HD4G4G	200307	34	975	253	0	1967.5	1887.5	-71	0.0	48,00	38,30
17:19	-79.89048	-2.214798	HD4G4G	200307	12	2250	207	0	2140.0	1740,0	-83	-1.0	4,33	30,90
17:21	-79.88888	-2.212449	HD4G4G	201649	12	2250	364	2	2140.0	1740,0	-97	0.0	35,90	28,50
17:25	-79.88594	-2.210982	HD4G4G	200308	31	975	229	2	1967.5	1887.5	-116	-1.0	7,68	0,56
17:28	-79.88644	-2.213648	HD4G4G	200308	31	975	229	0	1967.5	1887.5	-64	0.0	54,50	38,90
17:31	-79.88847	-2.215631	CR4G4G	200307	12	2250	207	2	2140.0	1740,0	-97	0.0	0,76	16,90
17:32	-79.88923	-2.219123	HD4G4G	200310	13	2250	47	2	2140.0	1740,0	-103	-1.0	23,40	22,10

Se procede a sacar un promedio a las velocidades de Bajada y Subida dadas en Mbps obtenidas de la tabla 8, en los dos ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) obtenidos en los datos, estos son 2250 y 975.

Tabla 10 cuadro dinámico de promedio. Fuente Autores

ARFCN	Promed Bajada Mbps	Promedio Subida Mbps
975	39,296	26,45
2250	32,08	24,61
Total general	33,24387097	24,89

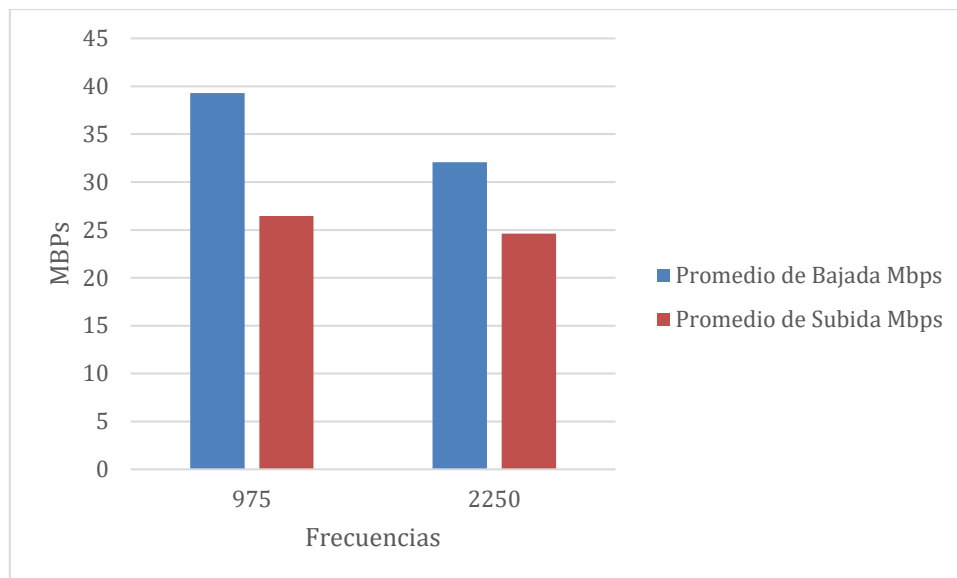


Figura 12. Promedio de velocidades por ARFCN. Fuente: Autores.

La tabla 9 muestra un rendimiento promedio de la velocidad de DownLink y UpLink en las dos frecuencias establecidas por su ARFCN, también se puede evidenciar esto en la figura 12. En el caso del canal ARFCN 975 presenta un mejor desempeño comparado al canal ARFCN 2250. El promedio total de las velocidades obtenidas en los puntos medidos es de 33,24 Mbps de bajada y 24,89 Mbps de subida, lo cual está acorde al desempeño esperado de una red 4G LTE en una zona urbana de Guayaquil.

v. Tabla esquematizada para comparación (LTE vs New Radio)

Para establecer los PRBs (Physical Resource Blocks) de cada red se procede hacer un cálculo matemático. Se parte que en AWS el espectro arrendado por el estado es de 20 MHz según la RESOLUCIÓN 12-09-ARCOTEL-2019.

Entonces se conoce que un PRBs es la unidad mínima de asignación de recursos en una interfaz LTE y New Radio, se conoce que tiene 12 subportadoras, cada una tiene 15 kHz, por ende, un PRBs tiene 180 kHz. Para conseguir cuantos PRBs tiene AWS con un espectro de 20 MHz se realiza una conversión y el cálculo matemático:

$$\text{Conversión de MHz a KHz} = 20\text{MHz} \times \frac{1000 \text{ kHz}}{1\text{MHz}} = 20000 \text{ kHz}$$

La banda de guarda es el porcentaje del espectro de frecuencia que se deja libre para evitar las interferencias entre la comunicación de dos canales. La banda de guarda para LTE es del 10%, entonces se calcula los PRBs en la red LTE AWS con la conversión:

$$\text{EL } 10\% \text{ de } 20000 \text{ kHz es } 2000 \text{ kHz}$$

Se resta el porcentaje de la banda de guarda a los 20 MHz convertidos:

$$20000 \text{ kHz} - 2000 \text{ kHz} = 18000 \text{ kHz}$$

$$\text{PRBs usados} = 18000 \text{ kHz} \times \frac{1 \text{ PRBs}}{180 \text{ kHz}} = 100 \text{ PRBs}$$

Para efecto del estudio se puede hacer el mismo cálculo para obtener los PRBs usados en Sub-6 GHz y mmWave, los cuales arrojan los siguientes valores en la tabla 10:

Tabla 11 PRBs usados en 5G

Rango de Frecuencia	SCS (kHz)	20 MHz	50 MHz	100 MHz	400 MHz
PRBs Sub-6	15	106	270	-	-
PRBs mmWave	120	-	32	66	264

Tabla 12 Comparación de velocidades Reales con Teóricas de 5G

Tipo de Red	Operator Network	Banda	ARFCN (Ejemplo)	Frecuencia UL (MHz)	MODE	Espectro Asignado (MHz)	PRBs	Velocidad de DL (Mbps)	Velocidad de UL (Mbps)
LTE AWS	Claro	4	2140	1740	FDD	20	100	32,08	24,61
LTE PCS	Claro	2	975	1967,5	FDD	15	75	39,3	26,45
5G Sub-6 GHz	Claro	n78	620 000	3300 – 3800	TDD	100	273	~1 000 (teórico)	100–300 (teórico)
5G mmWave	Claro (futuro)	n258	2 016 667	24 250 – 27 500	TDD	400	1320	5 000–10 000 (teórico)	1 000–3 000 (teórico)

Conocer la cantidad de PRBs que se muestra en la tabla 10, permite saber de cuánta es la capacidad de transmisión se puede asignar a los usuarios. Mientras más ancho de banda esté disponible, mayor será la asignación de PRBs, y como se aprecia en la tabla 10, mmWave tiene mayor capacidad de alcanzar velocidades superiores en la red que sub-6GHz.

Las tecnologías de LTE emplean el modo FDD (Frequency Division Duplex), como muestra la tabla 11, lo que permite una transmisión y recepción de datos de manera separada, pues trabajan en frecuencias distintas con anchos de banda de 20 MHz y 15MHz según el espectro asignado para las bandas AWS y PCS respectivamente. La estabilidad de las redes está limitada por la modulación 64QAM, y una cantidad de bloques restringidos indispensables como recursos físicos (PRBs), prueba de esto es el alcance en las velocidades reales de hasta 40 Mbps de bajada y 26Mbps de subida.

La red Sub-6 GHz emplea el TDD, así que se alterna el tiempo de bajada y subida compartiendo la Frecuencia, de esta forma se aprovecha un ancho de banda en el canal de hasta 100 MHz acompañadas de la tecnología Massive MIMO. Esto permite que la red 5G alcance velocidades teóricas de hasta 1 Gbps de bajada y 300 Mbps de subida, un aumento del 3017,21% en DL y un aumento de 1119,02% en UL, lo que demuestra que en condiciones reales tiene una cobertura más amplia que mmWave, adecuada para zonas urbanas como el sector Centenario de Guayaquil.

Finalmente, New Radio con mmWave trabaja en frecuencias superiores a 24 GHz, y ofrece bloques de hasta 400 MHz dando la capacidad de utilizar hasta 1320 PRBs respetando la banda de guarda, lo que permite en teoría alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps de bajada y 3 Gbps de subida. El alcance en la velocidad es extremadamente alejado al que se conoce actualmente en

LTE, pero hay que tener en cuenta que para lograr estos valores requerirá de una mayor densidad de antenas o estaciones base, pues la penetración en interiores es baja, lo que para efecto de este estudio está siendo considerado. La tabla 12 muestra el porcentaje de aumento en la velocidad de la tecnología

Tabla 13 Porcentaje de comparación de aumento en velocidades

Tecnología	Aumento DL (%)	Aumento UL (%)
PCS	22,51	7,48
5G Sub-6	3017,21	1119,02
5G mmWave	31 072,07	12090,17

w. Costo estimado de despliegue de una red New Radio (5G)

A continuación, se presenta la tabla 13 con los costos estimados de implementación de una red 5G con tecnología para la banda sub-6 GHz.

Tabla 14 Costos estimado Sub-6 GHz

Componente	Modelo / Tipo	Parámetros Técnicos	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Subtotal (USD)	Notas Técnicas
gNodeB Macro SA	Huawei AAU5613 o Nokia AirScale	64T64R Massive MIMO, TDD, 3.5 GHz, 200 MHz BW	3	55,000	165,000	Soporta 5G SA con conexión directa a 5GC vía NG interface
Antenas externas (si AAU no incluye)	Commscope 8T8R	8x8 MIMO, 3.4–3.8 GHz	5	3,000	15,000	Opcionales si se usan AAU (integradas)

Unidad de Banda Base (BBU)	Huawei BBU5900	Compatible con SA, F1-C/U, sincronización PTP	3	8,000	24,000	Puede colocarse en gabinete outdoor o indoor
Switch de Agregación	Cisco Catalyst 9500 o Huawei CloudEngine	10GE, PTP 1588v2, QoS 5G, redundancia	2	4,500	9,000	Soporta sincronización de red para TDD 5G
Servidor MEC	Dell PowerEdge XR4000	16 vCPU, 64 GB RAM, 1TB SSD, 2x10GE, edge AI opcional	1	18,000	18,000	Ideal para tráfico URLLC y aplicaciones locales
5G Core Compacto	Amarisoft 5GC, Open5GS con servidor	AMF, SMF, UPF, NRF, NSSF, PCF	1	109,000	109,000	Puede ser físico o virtualizado; Open Source opcional
Backhaul de fibra óptica	Cables, cajas NAP, splitters, conectores	2 km, 10 Gbps, redundancia básica	-	-	10,000	Incluye instalación urbana (zanja, postes)
Servicios de Integración	Ingeniería, instalación, pruebas	Despliegue de red SA	-	-	15,000	Típico para proyectos urbanos medianos
TOTAL, SUB-6 GHz	-	-	-	-	365,000	Costo base para zona urbana densamente poblada

La tabla 13 de presupuesto muestra una arquitectura de red diseñada en base a Sub-6 GHz para una zona urbana amplia, se utiliza gNodeBs macro con tecnología Massive MIMO. La eficiencia espectral que ofrecen estos equipos permite una gran capacidad sin requerir línea de vista.

La solución incluye implementar servidores MEC para una baja latencia, un core 5G compacto y sostenible, además de un transporte por fibra óptica. El costo total de la implementación sería aproximadamente de 281,000 dólares.

A continuación, se presenta la tabla 14 con los costos estimados de implementación de una red 5G con tecnología para la banda mmWave.

Tabla 15 costo estimado mmWave

Componente	Modelo / Tipo	Parámetros Técnicos	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Subtotal (USD)	Notas Técnicas
gNodeB mmWave Macro	Ericsson AIR 5322 mmWave	128T128R, Beamforming activo, 28 GHz, 400 MHz BW	10	25,000	250,000	Ideal para nodos hotspot en exteriores urbanos
Small Cells mmWave	Airspan RU 28 GHz	2x2 MIMO, PoE, beam-steering	10	6,000	60,000	Montaje en postes, farolas, interiores comerciales
Gabinetes climáticos	Outdoor/IP65 o indoor con PSU	Refrigeración, energía, control remoto	5	2,500	12,500	Imprescindibles por consumo térmico del mmWave
Switch de Agregación	Juniper EX4650	25GE, PTP, QoS 5G	2	6,500	13,000	Preparado para altas tasas del mmWave

Servidor MEC (Edge AI)	Dell XR11	GPU integrada, 64 vCPU, 256 GB RAM	1	22,000	22,000	Puede correr inferencia IA, slicing local
5G Core SA	Amarisoft 5GC o AWS Wavelength	Mismo que en sub-6 GHz	1	25,000	25,000	En entornos densos se puede virtualizar
Transporte óptico	Fibra 10G/25G, switches, zanja urbana	Soporte de baja latencia y alta capacidad	-	-	15,000	Puede incluir anillos o enlaces redundantes
Instalación e Integración	Site survey, pruebas RF, sincronía	Despliegue total de red	-	-	20,000	Más caro por densidad de nodos y precisión LOS
TOTAL, mmWave	-	-	-	-	417,500	Costo alto por alta densidad y sensibilidad LOS

El presupuesto mostrado en la tabla 14 está enfocado a implementar mmWave y maximizar el rendimiento extremo en términos de velocidad, también se toma en cuenta una baja latencia, pero se debe aclarar que esto implica una baja cobertura. Los gNodeBs de mmWave tienen una densidad de 128T128R y a diferencia de Sub-6 GHz sí requieren una línea de vista directa, por lo que se complementan con small cells para interiores. De esta forma se estima un costo de implementación aproximado de 417,500 dólares, pues se requiere una infraestructura más especializada.

XII. Discusión

Los valores obtenidos con la aplicación G-NetTrack en el Barrio Centenario reflejan el desempeño actual de la red que se usa en Guayaquil, LTE (AWS), en términos de DL y UL.

Las velocidades se registraron y se obtuvo un promedio aproximado de 33,24 Mbps de descarga y 24,89 Mbps de subida, donde se presenta una variación entre los canales ARFCN que se utilizaron. Para un mejor rendimiento alcanzando, el canal ARFCN 975 alcanzó un promedio de 39,30 Mbps de bajada y 26,45 Mbps de subida, mientras que el canal 2250 mostró un promedio de rendimiento más bajos.

Al contrastar los valores obtenidos con los valores teóricos esperados en New Radio, se puede evidenciar una diferencia significativa. En condiciones urbanas, como las del Barrio Centenario, una red 5G en la banda sub-6 GHz puede ofrecer velocidades promedio entre 100 y 200 Mbps de bajada, y para la velocidad de subida ofrece entre 30 y 50 Mbps. En mmWave, cuando las condiciones son favorables para su propagación, las velocidades pueden superar los 700 Mbps de bajada y 200 Mbps de subida. Esta comparación indica que la red LTE que se usa actualmente en el Barrio Centenario entrega velocidades que representan menos del 30% de rendimiento que las velocidades teóricas de una red New Radio, esto tomando en cuenta el mejor de los escenarios actuales. La diferencia encontrada es realmente un salto tecnológico de generaciones, además es un impacto alto a la experiencia del usuario final y la capacidad de red en una migración hacia la red 5G. Al ser un entorno urbano denso en el que aplicaría la tecnología de New Radio, la banda sub-6 GHz ofrece un recuento óptimo en UpLink entre cobertura y throughput, pero el UpLink tiene más limitaciones, ya que en condiciones ideales puede llegar a 132 Mbps, y se agrava si se quiere llegar a interiores sin ventanas ya que se observaría una caída de entre el 80% y 95% [32].

Esto coincide con estudios en Milán donde la configuración TDD 4:1 y el uso de MIMO con capacidades asimétricas limitan el rendimiento de UpLink. Por ejemplo, la telemedicina que demanda un UpLink robusto, mmWave puede complementar la red en zonas como la especificada en el caso, aunque su cobertura no es suficiente para un despliegue macro [32].

Las bandas Sub-6 GHz y mmWave presentan diferencias en su comportamiento radioeléctrico, esto influye en las aplicaciones que se les quiera dar en el entorno. En la zona del Barrio Centenario predominan edificaciones de altura media, calles angostas, vegetación y una considerable afluencia vehicular y peatonal, así que se debe tomar en cuenta el impacto de la

propagación de la señal. Sub-6-GHz tiene un mayor alcance por celda, lo que significa una mayor penetración en interiores y menor atenuación en obstáculos. Así pues, permite cubrir áreas amplias con una menor cantidad de estaciones base.

Una estación Sub-6 GHz puede cubrir entre 300m y 1000m en áreas urbanas. Una estación de mmWave permite alcanzar velocidades altas y por su ancho de banda permite conexiones simultáneas, pero presenta una cobertura limitada, llegando a alcances de 100m y 200m en entornos urbanos, a esto hay que sumarle la atenuación afectada por muros, árboles, lluvia e incluso el cuerpo humano. Esto implica instalar muchas antenas con una distancia corta entre si [30].

Un estudio de despliegues reales de 5g en bandas como sub-6 GHz y mmWave en ciudades como Chicago y Miami, cuyas zonas urbanas son densas y con un alto rendimiento de red, evalúa la cobertura efectiva y el desempeño de estos sectores urbanos, llegando a la conclusión que las bandas sub-6 GHz ofrece una mejor cobertura y penetración, mientras que la banda mmWave tiene una cobertura reducida por su sensibilidad a los obstáculos físicos, aunque entrega velocidades significativamente mayores [33].

XIII. Conclusiones

El análisis actual con los datos que se recopilamos de la red LTE en el Barrio Centenario presentan un rendimiento funcional, pero limitado. Las mediciones realizadas con la aplicación G-NetTrack evidencian las velocidades promedio de 33,24 Mbps en DL y 24, 89 Mbps en UL, valores que para la calidad que experimenta un ciudadano promedio de la ciudad pueden llegar a ser aceptables, más no suficientes, para responder con el auge de la tecnología y la optimización de futuros servicios que lleguen al país, como lo son: realidad aumentada y automatización urbana.

Las proyecciones teóricas obtenidas muestran que la banda Sub-6 GHz puede superar los 100 Mbps en velocidad, mientras que la banda mmWave puede alcanzar más de 700 Mbps, lo que representa un salto significativo frente a LTE.

La banda Sub-6 GHz es técnicamente la más viable para Guayaquil en una etapa inicial de implementación de 5G. Según los resultados de los análisis de Matlab se demostró que esta banda ofrece un mayor alcance en cada estación de base, una mejor penetración de la señal ante objetos físicos y una infraestructura menos densa, apta para una implementación viable en el Barrio Centenario.

Desde el punto de vista económico, Sub-6 GHz resulta más favorable frente a mmWave. En un entorno urbano según la información recopilada se presentó que el número de antenas necesaria para implementar mmWave puede ser hasta 5 veces mayor que en Sub-6 GHz para lograr tener la misma cobertura. Por ende, implica un menor costo para ejecutar su desarrollo dentro de una zona urbana.

XIV. Recomendaciones.

Se recomienda a los operadores móviles interesados en implementar 5G en la ciudad de Guayaquil, que se enfoquen la banda sub-6 GHz para las primeras fases, pues requiere menor costo y mayor cobertura en sectores urbanos densos.

Basados en la simulación de MATLAB y el punto de vista económico se recomienda la aplicación de la banda Sub-6GHz para sectores urbanos densos con múltiples obstáculos porque esta banda tiene menor atenuación y cobertura o para aplicaciones que requieren una mayor estabilidad de conexión como la industria IoT y la movilidad vehicular ya que esta tiene un mejor Handover que mmWave.

Mientras que para la Banda mmWave se recomienda para escenarios en donde la alta capacidad y latencia sean sumamente necesarias como lo pueden ser los estadios, centros comerciales o ambientes indoor con línea de vistas (LOS) donde su propagación no se vea afectada.

XV. Bibliografía

- [1] «A short review on the complete history of mobile phones network», *Open Access J. Sci.*, vol. Volume 7, n.º Issue 1, feb. 2024, doi: 10.15406/oajs.2024.07.00210.
- [2] N. Thi Mai Lan, «Evolution of Wireless Technology: From 1G to 5G», *Asian J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 07, n.º 04, pp. 68-73, 2023, doi: 10.38177/ajast.2023.7408.
- [3] Fernando Arias, Alfredo Salado, Carlos Medina, y Mayteé Zambrano, «5G technology deployment in Latin America: An analysis of public policy and regulation environment», *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 11, n.º 3, pp. 258-271, sep. 2021, doi: 10.30574/wjarr.2021.11.3.0457.
- [4] R. Kumar, I. Singh, A. Alkhayyat, A. Joshi, A. Badhouthiya, y S. Singh, «5G: Radio Technology Crafted for Wireless Cellular Connectivity», en *2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, feb. 2024, pp. 721-726. doi: 10.23919/INDIACom61295.2024.10499113.
- [5] A. F. M. Shahen Shah, «A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies», en *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, ene. 2022, pp. 1117-1123. doi: 10.1109/CCWC54503.2022.9720781.
- [6] S. Mondal, A. Sinha, y J. Routh, «A Survey on Evolution of Wireless Generations 0G to 7G», vol. 1.
- [7] Y. Zhou, L. Liu, H. Du, L. Tian, X. Wang, y J. Shi, «An overview on intercell interference management in mobile cellular networks: From 2G to 5G», en *2014 IEEE International Conference on Communication Systems*, nov. 2014, pp. 217-221. doi: 10.1109/ICCS.2014.7024797.
- [8] «Second-Generation (2G) Cellular Communications», en *Wireless Networking*, John Wiley & Sons, Ltd, 2013, pp. 250-365. doi: 10.1002/9781118590775.ch6.
- [9] L.-N. Degambur, A. Mungur, S. Armoogum, y S. Pudaruth, «Resource Allocation in 4G and 5G Networks: A Review», *Int. J. Commun. Netw. Inf. Secur. IJCNIS*, vol. 13, n.º 3, dic. 2021, doi: 10.54039/ijenis.v13i3.5116.
- [10] R. Badeel, M. Abdal, R. A. Ahmed, y H. H. Mohamed, «From 1G to 6G: Review of history of Wireless Technology Development, Architecture, Applications, and Challenges», *Appl. Data Sci. Anal.*, vol. 2024, pp. 189-198, dic. 2024, doi: 10.58496/ADSA/2024/015.
- [11] D. Cama-Pinto *et al.*, «5G Mobile Phone Network Introduction in Colombia», *Electronics*, vol. 10, n.º 8, Art. n.º 8, ene. 2021, doi: 10.3390/electronics10080922.
- [12] S. Hannig, *Technology Transfer to Latin American Countries: Drifting Away from the United States and China?* 2025. doi: 10.4324/9781003489450.
- [13] S. Hannig Núñez, *Technology Transfer to Latin American Countries: Drifting Away from the United States and China?*, 1.ª ed. London: Routledge, 2025. doi: 10.4324/9781003489450.
- [14] «Ericsson Mobility Report November 2024».
- [15] F. Shokoor, W. Shafik, y s. M. Matinkhah, «Overview of 5G & Beyond Security», *EAI Endorsed Trans. Internet Things*, jun. 2022, doi: 10.4108/eetiot.v8i30.1624.
- [16] J. Martyna, «Reliability Enhancement of URLLC Traffic in 5G Cellular Networks», 2020, pp. 77-88. doi: 10.1007/978-3-030-50719-0_7.
- [17] Feng L., Xie K., Zhu L., Qiu X., y Guo S., «5G Ultra-Reliable and Low Latency Communication Resource Scheduling for Power Business Quality Assurance», *Revista de Electrónica y Tecnología de la Información*, vol. 43, n.º 12, pp. 3418-3426, dic. 2021, doi: 10.11999/JEIT210509.
- [18] M. A. Siddiqi, H. Yu, y J. Joung, «5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices», *Electronics*, vol. 8, n.º 9, Art. n.º 9, sep. 2019, doi: 10.3390/electronics8090981.
- [19] I. Ahmad *et al.*, «A Pentaband Compound Reconfigurable Antenna for 5G and Multi-

- 2021, doi: 10.3390/electronics10202526.
- [20] M. Farasat, D. N. Thalakituna, Z. Hu, y Y. Yang, «A Review on 5G Sub-6 GHz Base Station Antenna Design Challenges», *Electronics*, vol. 10, n.º 16, Art. n.º 16, ene. 2021, doi: 10.3390/electronics10162000.
- [21] «Data Loss Study in Zonal Systems and Servers in a Shopping Center Parking Lot | INGENIO». Accedido: 7 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/7301>
- [22] T. S. Rappaport *et al.*, «Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522.
- [23] M. Xiao *et al.*, «Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks», 17 de mayo de 2017, *arXiv*: arXiv:1705.06072. doi: 10.48550/arXiv.1705.06072.
- [24] C. Baquero Barneto *et al.*, «Millimeter-Wave Mobile Sensing and Environment Mapping: Models, Algorithms and Validation», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, n.º 4, pp. 3900-3916, abr. 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3146003.
- [25] «Performance analysis of mmWave radio propagations in an indoor environment for 5G networks», ResearchGate. Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/359122161_Performance_analysis_of_mmWave_radio_propagations_in_an_indoor_environment_for_5G_networks
- [26] C. Volosencu, *MATLAB Applications in Engineering*. 2022. doi: 10.5772/intechopen.91588.
- [27] «The MathWorks Logo is an Eigenfunction of the Wave Equation». Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/company/technical-articles/the-mathworks-logo-is-an-eigenfunction-of-the-wave-equation.html>
- [28] F. Eka Putra, U. Ubaidi, M. Mahendra, M. Surur, y A. Rizki, «4G LTE Network Performance Analysis Provider 3 In Pamekasan Using The G-Nettrack Application», *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, pp. 427-433, ago. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4376.
- [29] F. Pasic *et al.*, «Comparison of Sub 6 GHz and mmWave Wireless Channel Measurements at High Speeds», en *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, mar. 2022, pp. 1-5. doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769375.
- [30] K. Shah, «A Comparative Study of mmWave vs. Sub-6 GHz 5G Networks for Urban Environments», *J. Artif. Intell. Cloud Comput.*, pp. 1-10, mar. 2022, doi: 10.47363/JAICC/2022(1)E222.
- [31] «Analysis of spatial scheduling in downlink vehicular communications: Sub-6 GHz vs mmWave», ITU. Accedido: 6 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int:443/en/publications/gs/Pages/publications.aspx>
- [32] J. Desai y S. Markande, «An Evaluation of the Signal to Noise Ratio (SNR) of Next Generation Wireless Communication Systems using Large Intelligent Surfaces: Deep Learning Approach», *Int. J. Electr. Electron. Res.*, vol. 11, n.º 4, pp. 949-955, oct. 2023, doi: 10.37391/ijeer.110411.
- [33] M. I. Rochman *et al.*, «A comprehensive analysis of the coverage and performance of 4G and 5G deployments», *Comput. Netw.*, vol. 237, p. 110060, dic. 2023, doi: 10.1016/j.comnet.2023.110060.

XVI. Anexos

Anexo 1

En el anexo 1 se muestra el código que se desarrolló en MATLAB, el que permitió realizar la simulación para obtener las tablas y gráficos para realizar el análisis comparativo entre las Bandas Sub-6GHz y mmWave.

```

42
43 %% 2. PARÁMETROS BASADOS EN ESTÁNDARES 3GPP
44 % =====
45
46 % 2.1. Bandas de frecuencia (TS 38.101)
47 freq_sub6 = 3.5e9; % FR1: 3.5 GHz (Band n78)
48 freq_mmWave = 28e9; % FR2: 28 GHz (Band n257)
49
50 % 2.2. Ancho de banda (TS 38.101)
51 BW_sub6 = 100e6; % 100 MHz (sub-6 GHz típico)
52 BW_mmWave = 400e6; % 400 MHz (mmWave típico)
53
54 % 2.3. Configuraciones MIMO (TR 38.901 Table 7.7-1)
55 Ntx_sub6 = 4; % Antenas transmisión (configuración común en FR1)
56 Nrx_sub6 = 4; % Antenas recepción
57 Ntx_mmWave = 16; % Massive MIMO típico en FR2 para compensar pérdidas
58 Nrx_mmWave = 16;

```

Figura 13 Principales parámetros de la simulación

```

Editor - C:\Users\Lab. Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m x comparativacontoolboxantenas.m x +
59
60 % 2.4. Modelos de canal (TR 38.901 Section 7.4)
61 channel_model_sub6 = 'TDL-C'; % Perfil de retardo TDL-C (urbano macro)
62 channel_model_mmWave = 'CDL-D'; % Perfil de retardo CDL-D (URLLC)
63
64 % 2.5. Parámetros de propagación (TR 38.901 Table 7.4.1-1)
65 distancia = 50; % Distancia UE-gNB (metros)
66 hBS = 25; % Altura gNB (metros)
67 hUE = 1.5; % Altura UE (metros)
68
69 % 2.6. Cálculo de pérdidas por propagación (TR 38.901 Section 7.4)
70 % Modelo UMi (Urban Micro) para sub-6 GHz
71 PL_sub6 = 32.4 + 21*log10(distancia) + 20*log10(freq_sub6/1e9);
72
73 % Modelo UMi Street Canyon para mmWave (incluye pérdidas adicionales)
74 PL_mmWave = 32.4 + 20*log10(distancia) + 20*log10(freq_mmWave/1e9) + 0.3*distancia;
75
76

```

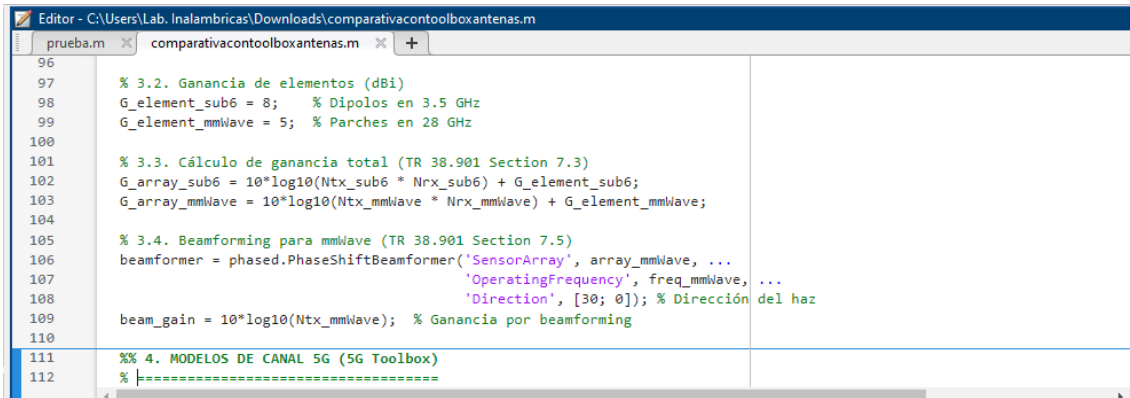
Figura 14 Canales que se utilizaron en la simulación y cálculo de pérdidas de propagación

```

75
76 % 2.7. Potencia de ruido (k*T*B)
77 k = 1.38e-23; % Constante de Boltzmann
78 T = 290; % Temperatura ambiente (Kelvin)
79 N0_sub6 = k*T*BW_sub6;
80 N0_mmWave = k*T*BW_mmWave;
81

```

Figura 15 Cálculo de perdidas por la temperatura

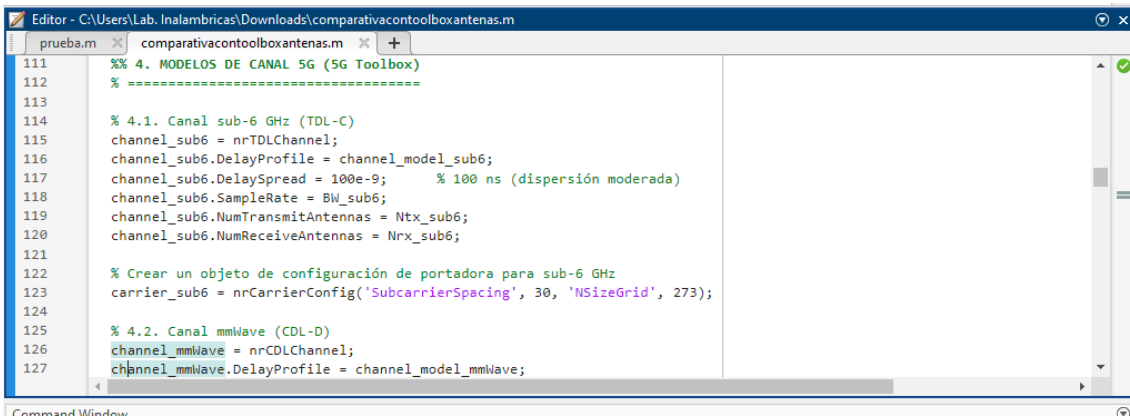


```

Editor - C:\Users\Lab.Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
96
97 % 3.2. Ganancia de elementos (dBi)
98 G_element_sub6 = 8; % Dipolos en 3.5 GHz
99 G_element_mmWave = 5; % Parches en 28 GHz
100
101 % 3.3. Cálculo de ganancia total (TR 38.901 Section 7.3)
102 G_array_sub6 = 10*log10(Ntx_sub6 * Nrx_sub6) + G_element_sub6;
103 G_array_mmWave = 10*log10(Ntx_mmWave * Nrx_mmWave) + G_element_mmWave;
104
105 % 3.4. Beamforming para mmWave (TR 38.901 Section 7.5)
106 beamformer = phased.PhaseShiftBeamformer('SensorArray', array_mmWave, ...
107     'OperatingFrequency', freq_mmWave, ...
108     'Direction', [30; 0]); % Dirección del haz
109 beam_gain = 10*log10(Ntx_mmWave); % Ganancia por beamforming
110
111 %% 4. MODELOS DE CANAL 5G (5G Toolbox)
112 % =====

```

Figura 16 Cálculo de la ganancia de los elementos y beamforming

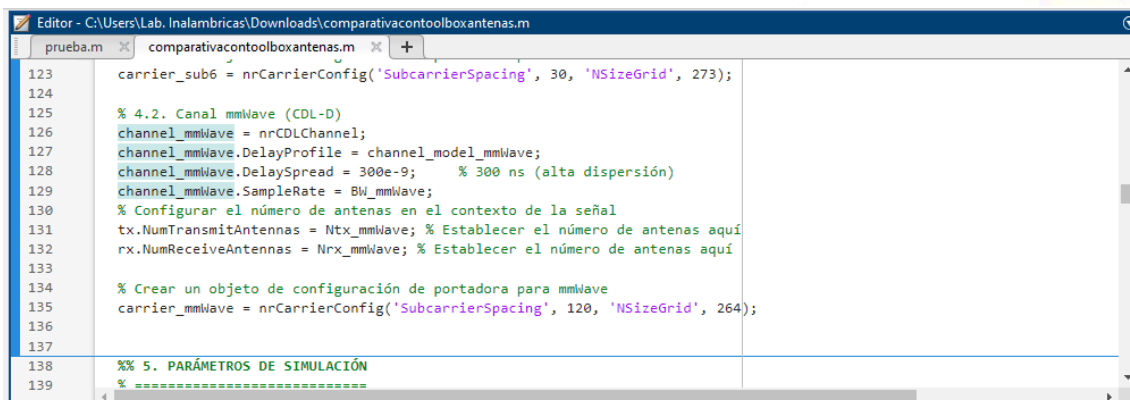


```

Editor - C:\Users\Lab.Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
111 %% 4. MODELOS DE CANAL 5G (5G Toolbox)
112 % =====
113
114 % 4.1. Canal sub-6 GHz (TDL-C)
115 channel_sub6 = nrTDLChannel;
116 channel_sub6.DelayProfile = channel_model_sub6;
117 channel_sub6.DelaySpread = 100e-9; % 100 ns (dispersión moderada)
118 channel_sub6.SampleRate = BW_sub6;
119 channel_sub6.NumTransmitAntennas = Ntx_sub6;
120 channel_sub6.NumReceiveAntennas = Nrx_sub6;
121
122 % Crear un objeto de configuración de portadora para sub-6 GHz
123 carrier_sub6 = nrCarrierConfig('SubcarrierSpacing', 30, 'NSizeGrid', 273);
124
125 % 4.2. Canal mmWave (CDL-D)
126 channel_mmWave = nrCDLChannel;
127 channel_mmWave.DelayProfile = channel_model_mmWave;

```

Figura 17 Modelado del canal de Sub-6GHz a canal TDL-C



```

Editor - C:\Users\Lab.Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
123 carrier_sub6 = nrCarrierConfig('SubcarrierSpacing', 30, 'NSizeGrid', 273);
124
125 % 4.2. Canal mmWave (CDL-D)
126 channel_mmWave = nrCDLChannel;
127 channel_mmWave.DelayProfile = channel_model_mmWave;
128 channel_mmWave.DelaySpread = 300e-9; % 300 ns (alta dispersión)
129 channel_mmWave.SampleRate = BW_mmWave;
130 % Configurar el número de antenas en el contexto de la señal
131 tx.NumTransmitAntennas = Ntx_mmWave; % Establecer el número de antenas aquí
132 rx.NumReceiveAntennas = Nrx_mmWave; % Establecer el número de antenas aquí
133
134 % Crear un objeto de configuración de portadora para mmWave
135 carrier_mmWave = nrCarrierConfig('SubcarrierSpacing', 120, 'NSizeGrid', 264);
136
137
138 %% 5. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN
139 % =====

```

Figura 18 Modelado del canal mmWave CDL-C

```

138 %% 5. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN
139 % =====
140 snr_dB_base = 10:5:100; % Rango de SNR (dB)
141 N = length(snr_dB_base);
142 usuarios = 10:10:100; % Número de usuarios
143 U = length(usuarios);
144
145 % Prealocación de variables
146 ber_sub6 = zeros(1,N); ber_mmwave = zeros(1,N);
147 latency_sub6 = zeros(1,N); latency_mmwave = zeros(1,N);
148 throughput_sub6 = zeros(1,N); throughput_mmwave = zeros(1,N);
149 trafico_sub6 = zeros(1,U); trafico_mmwave = zeros(1,U);
150 handover_sub6 = zeros(1,U); handover_mmwave = zeros(1,U);
151

```

Figura 19 Parámetros para la simulación del Throughput y capacidad de número de usuarios

```

152 %% 6. CÁLCULO DE MÉTRICAS
153 % =====
154
155 % 6.1. Loop para diferentes valores de SNR
156 for i = 1:N
157     % SNR efectiva considerando antenas y propagación
158     snr_eff_sub6 = snr_dB_base(i) + G_array_sub6 - PL_sub6;
159     snr_eff_mmwave = snr_dB_base(i) + G_array_mmwave + beam_gain - PL_mmwave ;
160
161     % Cálculo BER (Communications Toolbox)
162     ber_sub6(i) = berawgn(snr_eff_sub6, 'psk', 4, 'nondiff'); % QPSK para sub-6 GHz
163     ber_mmwave(i) = berawgn(snr_eff_mmwave, 'qam', 256); % 256-QAM para mmwave
164
165     % Latencia (TR 38.802 Section 8.2)
166     latency_sub6(i) = max(5, 10 - 0.2*snr_eff_sub6 + 0.8*randn);
167     latency_mmwave(i) = max(2, 5 - 0.3*snr_eff_mmwave + 0.5*randn);
168

```

Figura 20 Cálculo del SNR efectivo y BER para ambas bandas

```

164
165     % Latencia (TR 38.802 Section 8.2)
166     latency_sub6(i) = max(5, 10 - 0.2*snr_eff_sub6 + 0.8*randn);
167     latency_mmwave(i) = max(2, 5 - 0.3*snr_eff_mmwave + 0.5*randn);
168
169     % Throughput (TS 38.306)
170     eficiencia_sub6 = 0.6; % Eficiencia típica FR1
171     eficiencia_mmwave = 0.55; % Eficiencia FR2
172     throughput_sub6(i) = BW_sub6 * log2(1 + 10^(snr_eff_sub6/10)) * eficiencia_sub6 / 1e6;
173     throughput_mmwave(i) = BW_mmwave * log2(1 + 10^(snr_eff_mmwave/10)) * eficiencia_mmwave / 1e6;
174
175 end

```

Figura 21 Cálculo de latencia y throughput

```

176 % 6.2. Loop para diferentes números de usuarios
177 for u = 1:U
178     % Modelo de tráfico (TS 23.501)
179     trafico_sub6(u) = 100 * log10(1 + usuarios(u)/20) * (1 + 0.1*randn);
180     trafico_mmwave(u) = 200 * log10(1 + usuarios(u)/30) * (1 + 0.15*randn);
181
182     % Handover (TS 38.300 Section 9.2.3)
183     beam_gain_ho = 3*log10(Ntx_mmwave); % Mejora por beamforming
184
185     handover_sub6(u) = 95 - 0.3*usuarios(u) + 1.5*randn;
186     handover_mmwave(u) = 92 + beam_gain_ho - 0.25*usuarios(u) + 2*randn;
187
188     % Asegurar valores dentro de rango razonable
189     handover_sub6(u) = min(max(handover_sub6(u), 80), 98);
190     handover_mmwave(u) = min(max(handover_mmwave(u), 75), 97);
191

```

Figura 22 Cálculo del modelo de tráfico, Handover y parametrización de rango del Handover

```

Editor - C:\Users\Lab. Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
193 %% 7. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS
194 % =====
195 mainFig = figure('Name','Comparativa 5G SA con Estándares 3GPP','NumberTitle','off', ...
196     'Position',[100 100 1400 900], 'Color','w');
197 col_sub6 = [0, 0.4470, 0.7410]; % Azul
198 col_mmw = [0.8500, 0.3250, 0.0980]; % Naranja
199
200 % 7.1. BER vs SNR
201 subplot(2,3,1);
202 semilogy(snr_dB_base, ber_sub6, 's-', 'Color', col_sub6, 'LineWidth', 1.8, ...
203     'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_sub6);
204 hold on;
205 semilogy(snr_dB_base, ber_mmwave, 'd-', 'Color', col_mmw, 'LineWidth', 1.8, ...
206     'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_mmw);
207 grid on;
208 set(gca, 'YMinorGrid', 'off');
209 xlabel('SNR Base (dB)', 'FontWeight', 'bold');

```

Figura 23 Código para la gráfica del SNR con respecto al BER

```

Editor - C:\Users\Lab. Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
216 ylim([1e-5 1]);
217
218 % 7.2. Latencia vs SNR
219 subplot(2,3,2);
220 plot(snr_dB_base, latency_sub6, 's-', 'Color', col_sub6, 'LineWidth', 1.8, ...
221     'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_sub6); hold on;
222 plot(snr_dB_base, latency_mmwave, 'd-', 'Color', col_mmw, 'LineWidth', 1.8, ...
223     'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_mmw);
224 grid on;
225 xlabel('SNR Base (dB)', 'FontWeight', 'bold');
226 ylabel('Latencia (ms)', 'FontWeight', 'bold');
227 title('Latencia vs SNR (URLLC en mmWave)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
228 set(gca, 'FontSize', 10);
229 ylim([0 15]);
230
231 % 7.3. Throughput vs SNR
232 subplot(2,3,3);

```

Figura 24 Código del gráfico de la latencia vs SNR

```

Editor - C:\Users\Lab. Inalambricas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
230
231 % 7.3. Throughput vs SNR
232 subplot(2,3,3);
233 plot(snr_dB_base, throughput_sub6, 's-', 'Color', col_sub6, 'LineWidth', 1.8, ...
234     'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_sub6); hold on;
235 plot(snr_dB_base, throughput_mmwave, 'd-', 'Color', col_mmw, 'LineWidth', 1.8, ...
236     'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_mmw);
237 grid on;
238 xlabel('SNR Base (dB)', 'FontWeight', 'bold');
239 ylabel('Throughput (Mbps)', 'FontWeight', 'bold');
240 title('Throughput vs SNR (TS 38.306)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
241 legend(['sub-6 GHz (' num2str(BW_sub6/1e6) ' MHz)', ...
242     'mmWave (' num2str(BW_mmwave/1e6) ' MHz)'], ...
243     'Location', 'northwest');
244 set(gca, 'FontSize', 10);
245
246 % 7.4. Tráfico por número de usuarios

```

Figura 25 Código para graficar el Throughput vs SNR

```

Editor - C:\Users\Lab. Inalamblicas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
242     ['mmWave (' num2str(BW_mmWave/1e6) ' MHz)], ...
243     'Location','northwest');
244     set(gca,'FontSize',10);
245
246     % 7.4. Tráfico por número de usuarios
247     subplot(2,3,4);
248     plot(usuarios, trafico_sub6, 's-', 'Color', col_sub6, 'LineWidth', 1.8, ...
249          'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_sub6); hold on;
250     plot(usuarios, trafico_mmwave, 'd-', 'Color', col_mmw, 'LineWidth', 1.8, ...
251          'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_mmw);
252     grid on;
253     xlabel('Número de usuarios', 'FontWeight', 'bold');
254     ylabel('Tráfico total (Mbps)', 'FontWeight', 'bold');
255     title('Capacidad de Tráfico (eMBB/URLLC)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
256     set(gca, 'FontSize', 10);
257
258     % 7.5. Handover exitoso

```

Figura 26 Código para la Gráfica de tráfico por número de usuarios

```

Editor - C:\Users\Lab. Inalamblicas\Downloads\comparativacontoolboxantenas.m
prueba.m comparativacontoolboxantenas.m
255     title('Capacidad de Tráfico (eMBB/URLLC)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
256     set(gca, 'FontSize', 10);
257
258     % 7.5. Handover exitoso
259     subplot(2,3,5);
260     plot(usuarios, handover_sub6, 's-', 'Color', col_sub6, 'LineWidth', 1.8, ...
261          'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_sub6); hold on;
262     plot(usuarios, handover_mmwave, 'd-', 'Color', col_mmw, 'LineWidth', 1.8, ...
263          'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', col_mmw);
264     grid on;
265     xlabel('Número de usuarios', 'FontWeight', 'bold');
266     ylabel('% Handover exitosos', 'FontWeight', 'bold');
267     title('Handover (TS 38.300)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
268     legend('sub-6 GHz', 'mmWave con Beamforming', 'Location', 'southwest');
269     set(gca, 'FontSize', 10);
270     ylim([75 100]);
271

```

Figura 27 Código para generar la gráfica del Handover Exitoso

Anexo 2

En este anexo se pondrán imágenes de los equipos que se sugiere para una futura implementación de la red 5G SA en bandas Sub-6GHz y mmWave.



Figura 28 gNodeB Macro SA Huawei AAU5613.

La Figura 28 es de una Antena Activa que tiene las siguientes especificaciones:

Soporta la banda n78 (3.4 – 3.6 GHz) con configuración massive MIMO, su potencia total es 200W utiliza una interfaz 2xCPRI, su alimentación es de 48V DC, sus dimensiones son 495x395x195 mm, su peso es de 38kg, tiene protección IP65.



Figura 29 Commscope 8T8R

La Figura 29 muestra el dispositivo Commscope 8T8R que es una antena sectorial, la cual tiene soporte multibanda FDD (6498 - 869, 1695 - 2360 MHz, 3400 – 4000 MHz), con una apertura de 65-90°. El Commscope 8T8R optimiza la cobertura y capacidad en diferentes bandas de frecuencia para las comunicaciones celulares.



Figura 30 Unidad de Banda Base Huawei BBU5900

En la figura 30 se aprecia una Unidad de Banda Base Huawei BBU5900, la cual posee un factor 19 2U, soporta las bandas GSM, UMTS y LTE si se utiliza FDD/ TDD, también soporta NB-IoT, y 5G NR hasta los 50 Gbps, posee puertos CPRI/eCPRI, su alimentación es de 48 V. Este equipo permite gestionar las señales de radio y controla las AAU lo que ayuda con la coordinación de las celdas.



Figura 31 Switch de Agregación Cisco Catalyst 9500

El dispositivo de la figura 31 es un Swicht de Agregacion Cisco Catalyst 9500 que se lo utiliza para el enrutamiento de tráfico desde múltiples celdas hacia el núcleo de red. Entre sus especificaciones se pueden encontrar que posee 4 puertos de 400 GbE, también tiene 24 puertos que pueden trabajar desde 1 a 25 GbE. Utiliza protocolos L2, L3, MPLS y VXLAN, soporta

arquitectura UADP y ASIC.



Figura 32 Servidor MEC DeLL PowerEdge XR4000

Lo que se ve en la figura 32 es un servidor MEC Rugged que posee un chasis modular 2U, utiliza un procesador Intel Xeon-D y posee una memoria ram de 512 GB, también posee interfaces de conexión NVMe y SATA para el almacenamiento de datos.



Figura 33 5G Core Compacto Amarisoft 5GC

En la figura 33 tenemos un 5G Core Compacto que utiliza funciones como AMF, SMF, UPF, entre otros módulos, este Core se basa en las normativas de la 3GPP Release 15 y 16, este equipo soporta arquitectura SA (Standalone) y NSA (Non-Standalone).



- FOTOS EXTERNAS -

- Ericsson - Modelo: AIR 5322 B258 -

(O modelo AIR 5322 B258 possui 2 versões que se diferenciam pela alimentação, onde a versão DC é identificada como KRD 901 200/1 e a versão AC é identificada como KRD 901 200/4)



Av. Orosimbo Maia, 360, Centro, Campinas/SP - CEP: 13010-211
Tel.: +55 (19) 2517 9600 - Contato: ncc@ncc.org.br / www.ncc.org.br

Figura 34 Ericsson AIR 5322 mmWave

La antena Ericsson AIR 5322 se aprecia en la figura 34 utiliza la banda n261 (27.5 -27.9 GHz) que puede soportar en MIMO masivo hasta 256 elementos, se le puede aplicar el beamforming y utiliza protección IP 65.

Anexo 3

En este anexo se muestra cómo se tomaron los datos con la Aplicación G-NetTrack y se puede apreciar los datos que se tomaron para realizar las tablas en la metodología.



5:35 **G-NetTrack Lite** v19.2

Operador: CLARO

MCC: 740 MNC: 01 TAC: 60116 Tipo: LTE
 eNB: 200310 CID: 13 PCI: 47 TA: 1
 ARFCN: 2250 BAND: L4 BW: 20
 F DL: 2140.0 MHz F UL: 1740.0 MHz
 RSRP: -104 RSRQ: -16 SNR: 0.0 CQI: - RSSI: -65

Longitud: -79.88922 Latitud: -2.219128
 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N GPS Exactitud: 3m
 Alto: 25m Altitud: 25m Nivel del suelo: 0m

CARGA: 0 kbps DESCARGA: 0 kbps

Datos: **CLARO-LTE** IDLE

Hora de publicación: 168s

HORA	EVENTO	AC	CELLID	CI	ARFCN	NIVEL	CALIDAD	TIPO	SERV
16:13:13		60116	200307-12	207	2250	-78	-13	4G	784
16:26:17	HD4G4G	60116	200310-13	47	2250	-105	-16	4G	587
16:36:04	CR4G4G	60114	201661-11	227	2250	-100	-14	4G	53
16:36:57	HD4G4G	60116	200310-13	47	2250	-105	-12	4G	109
16:38:46	CR4G4G	60116	200307-12	207	2250	-103	-16	4G	329
16:44:16	HD4G4G	60116	200310-13	47	2250	-106	-14	4G	87
16:45:43	CR4G4G	60116	200307-12	207	2250	-103	-17	4G	8
16:45:51	CR4G4G	60116	200310-13	47	2250	-99	-14	4G	7
16:45:58	HD4G4G	60116	200307-12	207	2250	-100	-18	4G	5
16:46:03	CR4G4G	60116	200310-13	47	2250	-101	-13	4G	2
16:46:05	CR4G4G	60116	200311-12	39	2250	-89	-11	4G	2
16:46:07	CR4G4G	60116	200310-13	47	2250	-100	-14	4G	5
16:46:12	HD4G4G	60116	200307-12	207	2250	-101	-16	4G	70
16:47:22	HD4G4G	60116	200311-12	39	2250	-103	-15	4G	3
16:47:25	HD4G4G	60116	200307-12	207	2250	-105	-16	4G	27
16:47:52	CR4G4G	60114	201661-11	227	2250	-107	-18	4G	1
16:47:53	CR4G4G	60116	200455-13	56	2250	-104	-15	4G	53
16:48:46	HD4G4G	60116	200307-12	207	2250	-101	-17	4G	29
16:49:15	CR4G4G	60114	201661-11	227	2250	-105	-19	4G	13
16:49:28	HD4G4G	60116	200307-12	207	2250	-105	-16	4G	9
16:49:37	HD4G4G	60116	200455-13	56	2250	-104	-16	4G	4
16:49:41	HD4G4G	60116	200455-13	227	2250	-105	-15	4G	1
16:49:42	HD4G4G	60114	201661-11	227	2250	-108	-17	4G	58
16:50:40	CR4G4G	60116	200311-13	41	2250	-99	-11	4G	7
16:50:47	CR4G4G	60114	201661-11	227	2250	-84	-15	4G	98
16:52:25	HD4G4G	60116	200311-12	39	2250	-71	-9	4G	126
16:54:31	CR4G4G	60116	200311-11	40	2250	-83	-11	4G	291
16:59:22	HD4G4G	60116	200307-14	253	2250	-90	-11	4G	141
17:01:43	HD4G4G	60116	200506-11	113	2250	-102	-12	4G	178
17:04:41	CR4G4G	60116	200506-12	112	2250	-104	-14	4G	29
17:05:10	HD4G4G	60116	200313-11	42	2250	-102	-15	4G	37
17:05:47	HD4G4G	60116	200506-12	112	2250	-92	-16	4G	54
17:06:41	CR4G4G	60116	200506-11	113	2250	-73	-9	4G	107
17:08:29	HD4G4G	60116	200505-11	294	2250	-89	-10	4G	7
17:08:35	HD4G4G	60116	201649-13	365	2250	-90	-11	4G	12
17:08:48	CR4G4G	60116	200506-11	113	2250	-97	-12	4G	10

Gyakov Solutions MENU

CELULA VECINAS MAPA INFO COCHE

Figura 35 Datos tomados con el Programa G-NetTrack