

**Estudio técnico de los indicadores de desempeño para simular una red 5G NR en tres localidades de la ciudad de Bogotá, en las bandas de radiofrecuencia C (3.5 GHz) y K (26 GHz)**

Jairo Velásquez Bustos

Asesor

Dra. Mónica Andrea Rico Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI  
Ingeniería Electrónica

2023

## **Agradecimientos**

A la Doctora Mónica Andrea Rico Martínez, por su magistral asesoría y orientación que me brindó en todas las fases del desarrollo de este proyecto de investigación.

A todos los Profesores y Tutores de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, por sus sabias enseñanzas y nuevos conocimientos adquiridos tanto en las aulas presenciales como en las excelentes web conferencias de este magnífico modelo de educación virtual.

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de investigación a mi esposa Martha Nubia, a mis hijos Luisa Fernanda y Juan Pablo, quienes también son apasionados por el estudio en aras de cada día alcanzar nuevas metas y triunfos.

## Resumen

El crecimiento acelerado del sector de las telecomunicaciones obliga a ir dejando de lado el estándar 4G, migrar al estándar 5G y en un corto tiempo llegar al 6G. Así mismo, el uso progresivo de nuevos estándares de redes de nueva generación (NGN, New Generation Networks), como son las Redes Heterogéneas (HetNets, Heterogeneous Networks) y Redes Convergentes (CN, Converging Networks), las cuales tienen la capacidad de soportar la alta demanda de servicios inalámbricos y móviles por parte de los usuarios de una determinada área geográfica. Para el funcionamiento óptimo de servicios móviles, se requiere de la implementación de un sistema integrado de infraestructura, gestión, administración y funcionamiento, que esté regulado por indicadores de desempeño, con el fin de garantizar los estándares mínimos de satisfacción de las necesidades actuales de comunicación y conectividad.

De esta manera, el presente trabajo de grado tiene como objetivo desarrollar un estudio técnico para la implementación de una red 5G NR en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá de la ciudad de Bogotá, que permita el despliegue de las redes en las bandas C (3.5 GHz) y K (26GHz). Inicialmente, se llevará a cabo un levantamiento de información de las tres (3) localidades para caracterizar indicadores KPI de conformidad con estándares internacionales; luego, se diseñarán escenarios de prueba para efectuar simulaciones de cobertura utilizando la herramienta Xirio Online.

Una vez, efectuados los estudios y simulaciones para las tres (3) localidades y obtenidos los resultados de cobertura multitransmisor, cálculos de capacidad radioeléctrica y cálculos de interferencia se efectuará un comparativo para identificar y relacionar las diferencias que se puedan presentar en los tres (3) escenarios. Para esto, se analizarán los niveles de referencia de las señales RSRP, RSSI, RSRQ, DL-SINR y UL-SINR, las cuales son señales que informan

sobre el estado de calidad y cobertura de las señales que circulan entre las antenas de las estaciones (BS) y terminales de usuario (UE). Así mismo, se hará un comparativo y se analizarán los datos de usuarios totales, porcentaje de carga estimada, señales de ancho de banda máximo DL y UL, ancho de ancho de banda garantizado DL y UL, y throughput máximo DL y UL con el fin, de establecer diferencias de desempeño y rendimiento de la capacidad entre las bandas C y K.

***Palabras clave:*** Redes celulares, latencia, conectividad, escenarios de prueba.

## Abstract

The accelerated growth of the telecommunications sector forces us to leave aside the 4G standard, migrate to the 5G standard and in a short time reach 6G. Likewise, the progressive use of new standards for new generation networks (NGN, New Generation Networks), such as Heterogeneous Networks (HetNets, Heterogeneous Networks) and Convergent Networks (CN, Converging Networks), which have the capacity to support the high demand for wireless and mobile services by users in a certain geographic area. For the optimal functioning of mobile services, the implementation of an integrated infrastructure, management, administration and operation system is required, which is regulated by performance indicators, in order to guarantee minimum standards of satisfaction of current communication needs. and connectivity.

In this way, the objective of this degree work is to develop a technical study for the implementation of a 5G NR network in the towns of Suba, Usaquen and Engativa in the city of Bogotá, which allows the deployment of networks in the C bands. (3.5 GHz) and K (26GHz). Initially, a collection of information from the three (3) locations will be carried out to characterize KPI indicators in accordance with international standards; Then, test scenarios will be designed to carry out coverage simulations using the Xirio Online tool.

Once the studies and simulations have been carried out for the three (3) locations and the results of multi-transmitter coverage, radioelectric capacity calculations and interference calculations have been obtained, a comparison will be made to identify and relate the differences that may occur in the three (3) scenarios. For this, the reference levels of the RSRP, RSSI, RSRQ, DL-SINR and UL-SINR signals will be analyzed, which are signals that inform about the quality and coverage status of the signals that circulate between the station antennas. (BS) and user terminals (UE). Likewise, a comparison will be made and the data of total users, percentage

of estimated load, maximum bandwidth signals DL and UL, guaranteed bandwidth DL and UL, and maximum throughput DL and UL will be analyzed in order to, to establish performance and capacity performance differences between C and K bandas.

***Keywords:*** Cellular networks, latency, connectivity, test scenarios.

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	21
Generalidades de la Investigación .....	23
Planteamiento del Problema .....	23
Objetivos.....	30
Objetivo General.....	30
Objetivos Específicos.....	30
Justificación .....	31
Viabilidad Técnica .....	32
Viabilidad Económica .....	34
Viabilidad Social.....	34
Viabilidad Ambiental .....	34
Marco Teórico.....	36
Redes 5G .....	36
Ancho de Banda.....	36
Internet de las Cosas (IoT) .....	36
Sistema de Telefonía Móvil Celular .....	37
Infraestructura de una Red de Acceso Radio RAN .....	39
Componentes de una Unidad RAN.....	40
Evolución de la RAN (Radio Access Network) .....	41
Arquitectura C-RAN .....	42
Arquitectura OPen-RAN .....	43

	9
Antenas .....	45
Descripción del Conjunto Antena – Equipo de Radio .....	46
Núcleo (Core) de una red 5G-NR .....	47
Virtualización de Funciones de Red (NFV) .....	49
Estado del Arte.....	51
Proyectos Similares de Tecnología 5G Realizados en Colombia .....	51
Proyectos Similares Realizados en otros Países .....	55
Marco Metodológico .....	57
Etapa de Planificar .....	57
Etapa de Hacer .....	57
Etapa de Verificar .....	58
Etapa de Actuar.....	58
Indicadores de Desempeño de una Red 5G-NR .....	59
Indicadores de Desempeño KPI.....	59
Categorías de Indicadores KPI .....	60
Indicadores de Rendimiento KPI.....	61
Usos de los indicadores KPI.....	62
Indicadores KPI en Redes 5G.....	62
Diseño de los Escenarios de Prueba para la Simulación de una Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá.....	68
Áreas Geográficas de Simulación .....	68
Bandas de Frecuencias Milimétricas para red 5G NR .....	71

	10
Equipos Radio RAN (Radio Acces Network) y Terminales de Usuario UE para la Banda C (3.5 GHZ) .....	75
Equipos Radio RAN (Radio Access Network) y Terminales de Usuario (UE) para la Banda K (26 GHZ) .....	88
Simulación de la Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá .....	97
Diseño de la Simulación.....	97
Comparativo de Equipos de Radio para la Banda C (3.5 GHz) .....	97
Comparativo de Equipos de Radio para la Banda K (26 GHz) .....	102
Simulación en Xirio Online .....	106
Resultados y Discusión de la Simulación de la Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá.....	118
Resultados de la Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) .....	118
Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) de la Localidad de Suba .....	118
Creación de Estudio de la Cobertura Multitransmisor.....	118
Análisis de Simulación de la red 5G NR en la Banda de 3.5 GHz de la Localidad de Suba .....	120
Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) de la Localidad de Engativá .....	142
Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 3.5 GHz de la Localidad de Engativá... ..	142
Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) de la Localidad de Usaquén.....	160
Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 3.5 GHz de la Localidad de Usaquén... ..	161
Resultados de la Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz).....	177
Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz) de la Localidad de Suba .....	178
Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 26 GHz de la Localidad de Suba .....	178

	11
Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz) de la Localidad de Engativá .....	193
Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 26 GHz de la Localidad de Engativá ...	193
Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz) de la Localidad de Usaquén .....	210
Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 26 GHz de la Localidad de Usaquén....	210
Análisis Comparativo de las Simulaciones de la Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá .....	225
Comparativo de Resultados de Cobertura e Interferencia en las Tres (3) Localidades para la Banda 3.5 GHz) .....	226
Comparativo de Resultados de Cobertura e Interferencia en las Tres (3) Localidades para la Banda 26 GHz) .....	238
Comparativo de Resultados de Capacidad entre las Bandas C (3.5 GHz) y K (26 GHz).....	247
Conclusiones.....	253
Referencias Bibliográficas.....	256

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Topología General de un Sistema Celular</i> .....	38
<b>Figura 2</b> <i>Arquitectura de RAN Tradicional</i> .....	41
<b>Figura 3</b> <i>Arquitectura C-RAN</i> .....	42
<b>Figura 4</b> <i>Open RAN con Separación de la Unidad BBU en Unidades DUs y CUs</i> .....	44
<b>Figura 5</b> <i>Antena de Trasmisión y Recepción</i> .....	45
<b>Figura 6</b> <i>Configuración de Sistema de Telefonía Móvil</i> .....	47
<b>Figura 7</b> <i>Core 5G New Radio</i> .....	48
<b>Figura 8</b> <i>Ejemplos de Servicios 5G</i> .....	63
<b>Figura 9</b> <i>Indicadores KPI Generales del 5G Establecidos por el IMT-2020</i> .....	64
<b>Figura 10</b> <i>Principales Características del IMT-2020</i> .....	65
<b>Figura 11</b> <i>Mapa de la Localidad de Engativá</i> .....	69
<b>Figura 12</b> <i>Mapa de la Localidad de Suba</i> .....	70
<b>Figura 13</b> <i>Mapa de la Localidad de Usaquén</i> .....	71
<b>Figura 14</b> <i>Atribución Banda 3500 MHz en Colombia.</i> .....	73
<b>Figura 15</b> <i>Atribución Banda 26 GHz en Colombia</i> .....	74
<b>Figura 16</b> <i>Station Remote Radio Unit (RRH)</i> .....	75
<b>Figura 17</b> <i>Remote Radio Units Outdoor (RRU) Malin NR-2520</i> .....	77
<b>Figura 18</b> <i>Remote Radio Units Indoor (RRU) Malin NR-2320</i> .....	79
<b>Figura 19</b> <i>Unidad de Radio Remota RRH Exterior</i> .....	81
<b>Figura 20</b> <i>Unidad de Radio r}Remota RRH Interior Indoor 5G RRU ANKTION TECH</i> .....	83
<b>Figura 21</b> <i>Placa Lógica Principal de un Teléfono Inteligente 5G</i> .....	85
<b>Figura 22</b> <i>Móvil Poco X4 Pro 5G. Xiaomi</i> .....	86

	13
<b>Figura 23</b> <i>Motorola Edge 30 5G</i> .....	87
<b>Figura 24</b> <i>Terminal Inalámbrica MAXCOMM 5G OUTDOOR CPE OWR-203</i> .....	89
<b>Figura 25</b> <i>Unidad de Radio WiBAS™ G5 Connect+</i> .....	91
<b>Figura 26</b> <i>Huawei 5G CPE Pro</i> .....	93
<b>Figura 27</b> <i>Apple Iphone 13 A2482</i> .....	95
<b>Figura 28</b> <i>Ventana Principal de Xirio Online.</i> .....	107
<b>Figura 29</b> <i>Parámetros de Banda de Frecuencia C (3.5 GHz)</i> .....	109
<b>Figura 30</b> <i>Rango de Colores 5G</i> .....	111
<b>Figura 31</b> <i>Configuración de Propiedades del Sector</i> .....	112
<b>Figura 32</b> <i>Configuración de Parámetros de Antena del Radio y Potencia de Transmisión</i> .....	113
<b>Figura 33</b> <i>Configuración de parámetros 5G</i> .....	114
<b>Figura 34</b> <i>Configuración de Parámetros Downlink y Uplink</i> .....	115
<b>Figura 35</b> <i>Método de Cálculo y Parámetros Básicos</i> .....	116
<b>Figura 36</b> <i>Parámetros del Equipo Terminal de Usuario</i> .....	117
<b>Figura 37</b> <i>Parámetros 5G del del Equipo Terminal de Usuario</i> .....	117
<b>Figura 38</b> <i>Asignación de Usuarios para Estudio Multitransmisor</i> .....	119
<b>Figura 39</b> <i>Niveles de Intensidad de la Señal RSRP de Cobertura Radioeléctrica</i> .....	126
<b>Figura 40</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	130
<b>Figura 41</b> <i>Nivel de Calidad de Señal “Buena” SS-RSRQ</i> .....	133
<b>Figura 42</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink DL-SINR</i> .....	136
<b>Figura 43</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Ascendente UL-SINR</i> .....	138
<b>Figura 44</b> <i>Gráfica de Ancho de Banda BW</i> .....	141
<b>Figura 45</b> <i>Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica</i> .....	148

	14
<b>Figura 46</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	151
<b>Figura 47</b> <i>Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	153
<b>Figura 48</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Downlink DL-SINR</i> .....	156
<b>Figura 49</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Ascendente</i> .....	158
<b>Figura 50</b> <i>Gráfica de Ancho de Banda BW</i> .....	160
<b>Figura 51</b> <i>Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica</i> .....	166
<b>Figura 52</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	169
<b>Figura 53</b> <i>Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	171
<b>Figura 54</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Downlink DL-SINR</i> .....	173
<b>Figura 55</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink</i> .....	175
<b>Figura 56</b> <i>Gráfica de Ancho de Banda BW</i> .....	177
<b>Figura 57</b> <i>Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica</i> .....	183
<b>Figura 58</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	185
<b>Figura 59</b> <i>Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	187
<b>Figura 60</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Descendente DL-SINR</i> .....	189
<b>Figura 61</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink</i> .....	191
<b>Figura 62</b> <i>Gráfica de Ancho de Banda BW</i> .....	193
<b>Figura 63</b> <i>Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica</i> .....	199
<b>Figura 64</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	201
<b>Figura 65</b> <i>Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	203
<b>Figura 66</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink DL-SINR</i> .....	205
<b>Figura 67</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink</i> .....	207
<b>Figura 68</b> <i>Gráfica de Ancho de Banda BW</i> .....	209

	15
<b>Figura 69</b> <i>Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica</i> .....	214
<b>Figura 70</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	216
<b>Figura 71</b> <i>Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	218
<b>Figura 72</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Downlink DL-SINR</i> .....	220
<b>Figura 73</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Ascendente</i> .....	222
<b>Figura 74</b> <i>Gráfica de Ancho de Banda BW</i> .....	224
<b>Figura 75</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente</i> .....	227
<b>Figura 76</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Buena</i> .....	228
<b>Figura 77</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Regular</i> .....	230
<b>Figura 78</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Nula</i> .....	231
<b>Figura 79</b> <i>Comparativo de Señales RSSI Excelente</i> .....	233
<b>Figura 80</b> <i>Comparativo de Señales RSSI Buena</i> .....	234
<b>Figura 81</b> <i>Comparativo de Señales RSRQ Buena</i> .....	236
<b>Figura 82</b> <i>Comparativo de Señales downlink DL-SINR</i> .....	237
<b>Figura 83</b> <i>Comparativo de Señales uplink UL-SINR</i> .....	238
<b>Figura 84</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente</i> .....	239
<b>Figura 85</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Buena</i> .....	241
<b>Figura 86</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Regular</i> .....	242
<b>Figura 87</b> <i>Comparativo de Señales RSSI Excelente</i> .....	244
<b>Figura 88</b> <i>Comparativo de Señales RSRQ Buena</i> .....	245
<b>Figura 89</b> <i>Comparativo de Señales downlink DL-SINR</i> .....	246
<b>Figura 90</b> <i>Comparativo de Señales Uplink UL-SINR</i> .....	247
<b>Figura 91</b> <i>Porcentaje de Carga de Tráfico</i> .....	249

	16
<b>Figura 92</b> <i>Ancho de Banda Downlink y Uplink Garantizado</i> .....	250
<b>Figura 93</b> <i>Ancho de Banda Máximo y Throughput del Enlace Downlink</i> .....	251
<b>Figura 94</b> <i>Ancho de Banda Máximo del Enlace Uplink</i> .....	252

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b>	<i>Pruebas Piloto de Implementación de Redes 5G en Colombia</i> .....	28
<b>Tabla 2</b>	<i>Indicadores de Rendimiento KPI</i> .....	66
<b>Tabla 3</b>	<i>Características Técnicas de Station Remote Radio Unit (RRH)</i> .....	76
<b>Tabla 4</b>	<i>Especificaciones Técnicas de Unidad de Estación Remota Exterior Malin NR-2520</i> ...78	
<b>Tabla 5</b>	<i>Especificaciones Técnicas de la Unidad de Estación Remota Interior Malin NR-232080</i>	
<b>Tabla 6</b>	<i>Especificaciones Técnicas de la Unidad de Radio Remota RRH Exterior</i> .....	82
<b>Tabla 7</b>	<i>Especificaciones de una Unidad de Radio Remota 5G RRU ANKTION TECH</i> .....	84
<b>Tabla 8</b>	<i>Especificaciones Técnicas del Móvil Marca Poco X4 Pro 5G</i> .....	87
<b>Tabla 9</b>	<i>Especificaciones Técnicas del Móvil Motorola Edge 30 5G</i> .....	88
<b>Tabla 10</b>	<i>Especificaciones Técnicas de la Terminal CPE OWR-203</i> .....	90
<b>Tabla 11</b>	<i>Especificaciones de la Unidad de Radio WiBAS™ G5 Connect+</i> .....	92
<b>Tabla 12</b>	<i>Especificaciones del Móvil Huawei 5G CPE Pro</i> .....	94
<b>Tabla 13</b>	<i>Especificaciones del Móvil Apple Iphone 13 A2482</i> .....	96
<b>Tabla 14</b>	<i>Especificaciones Técnicas de Equipos de Radio para la Banda C (3.5 GHz)</i> .....	98
<b>Tabla 15</b>	<i>Especificaciones Técnicas de Equipos de Terminal de Usuario UE</i> .....	101
<b>Tabla 16</b>	<i>Especificaciones Técnicas de Equipos de Radio para la Banda K (26 GHz)</i> .....	103
<b>Tabla 17</b>	<i>Especificaciones Técnicas de Equipos de Terminal de Usuario UE</i> .....	105
<b>Tabla 18</b>	<i>Parámetros de Medición de Rendimiento de la Red 5G</i> .....	110
<b>Tabla 19</b>	<i>Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Excelente” de señal RSRP</i> .....	121
<b>Tabla 20</b>	<i>Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Buena” de señal RSRP</i> .....	122
<b>Tabla 21</b>	<i>Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Regular” de señal RSRP</i> .....	123
<b>Tabla 22</b>	<i>Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Nula” de señal RSRP</i> .....	124

	18
<b>Tabla 23</b> <i>Puntos de Coordenadas con Nivel “Excelente” de Señal RSSI</i> .....	128
<b>Tabla 24</b> <i>Puntos de Coordenadas con Nivel “Buena” de Señal RSSI</i> .....	129
<b>Tabla 25</b> <i>Puntos de Coordenadas con Nivel “Buena” de Señal SS-RSRQ</i> .....	132
<b>Tabla 26</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR</i> .....	135
<b>Tabla 27</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Uplink UL-SINR</i> .....	137
<b>Tabla 28</b> <i>Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Suba 5G NR (3.5 GHz)</i> .....	140
<b>Tabla 29</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP</i> .....	143
<b>Tabla 30</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP</i> .....	144
<b>Tabla 31</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP</i> .....	145
<b>Tabla 32</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP</i> .....	146
<b>Tabla 33</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia/Interferencia de señal RSSI</i> .....	149
<b>Tabla 34</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia/Interferencia de señal RSSI</i> .....	150
<b>Tabla 35</b> <i>Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	152
<b>Tabla 36</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR</i> .....	154
<b>Tabla 37</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Uplink UL-SINR</i> .....	157
<b>Tabla 38</b> <i>Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Engativá 5G NR (3.5 GHz)</i> ....	159
<b>Tabla 39</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP</i> .....	161
<b>Tabla 40</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP</i> .....	162
<b>Tabla 41</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP</i> .....	163
<b>Tabla 42</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP</i> .....	164
<b>Tabla 43</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	167
<b>Tabla 44</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	168
<b>Tabla 45</b> <i>Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	170

	19
<b>Tabla 46</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia DL-SINR</i> .....	172
<b>Tabla 47</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink UL-SINR</i> .....	174
<b>Tabla 48</b> <i>Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Usaquén 5G NR (3.5 GHz)</i> .....	176
<b>Tabla 49</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP</i> .....	179
<b>Tabla 50</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP</i> .....	180
<b>Tabla 51</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP</i> .....	181
<b>Tabla 52</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP</i> .....	182
<b>Tabla 53</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	184
<b>Tabla 54</b> <i>Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	186
<b>Tabla 55</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR</i> .....	188
<b>Tabla 56</b> <i>Interferencia de Enlace Uplink UL-SINR</i> .....	190
<b>Tabla 57</b> <i>Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Suba 5G NR (26 GHz)</i> .....	192
<b>Tabla 58</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP</i> .....	195
<b>Tabla 59</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP</i> .....	196
<b>Tabla 60</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP</i> .....	197
<b>Tabla 61</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP</i> .....	198
<b>Tabla 62</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	200
<b>Tabla 63</b> <i>Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	202
<b>Tabla 64</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR</i> .....	204
<b>Tabla 65</b> <i>Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink UL-SINR</i> .....	206
<b>Tabla 66</b> <i>Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Engativá 5G NR (26 GHz)</i> .....	208
<b>Tabla 67</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la señal RSRP</i> .....	211
<b>Tabla 68</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP</i> .....	212

	20
<b>Tabla 69</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP</i> .....	213
<b>Tabla 70</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP</i> .....	213
<b>Tabla 71</b> <i>Niveles de Potencia de la Señal RSSI</i> .....	215
<b>Tabla 72</b> <i>Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ</i> .....	217
<b>Tabla 73</b> <i>Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR</i> .....	219
<b>Tabla 74</b> <i>Interferencia de Enlace Uplink</i> .....	221
<b>Tabla 75</b> <i>Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Usaquén 5G NR (26 GHz)</i> .....	223
<b>Tabla 76</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente</i> .....	226
<b>Tabla 77</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Buena</i> .....	227
<b>Tabla 78</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Regular</i> .....	229
<b>Tabla 79</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Nula</i> .....	230
<b>Tabla 80</b> <i>Comparativo de Señales RSSI Excelente</i> .....	232
<b>Tabla 81</b> <i>Comparativo de Señales RSSI Buena</i> .....	233
<b>Tabla 82</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRQ Buena</i> .....	235
<b>Tabla 83</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente</i> .....	239
<b>Tabla 84</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Buena</i> .....	240
<b>Tabla 85</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRP Regular</i> .....	241
<b>Tabla 86</b> <i>Comparativo de Señales RSSI Excelente</i> .....	243
<b>Tabla 87</b> <i>Comparativo de Señales SS-RSRQ Buena</i> .....	245
<b>Tabla 88</b> <i>Resultados de Capacidad Obtenidos en la Banda C (3.5 GHz)</i> .....	248
<b>Tabla 89</b> <i>Resultados de Capacidad Obtenidos en la Banda K (26 GHz)</i> .....	248

## Introducción

La tecnología 5G, considerada en el nuevo paradigma móvil de las telecomunicaciones, inició en Colombia, una verdadera revolución, cambiando las formas y costumbres de comunicación de personas, empresas y otros usuarios, quienes serán beneficiarios exclusivos del potencial de servicios y soluciones, soportados con altas velocidades, amplias autopistas y redes heterogéneas, permitiendo con mayor versatilidad la conexión dinámica en tiempo real de todo tipo de objetos acondicionados con dispositivos inteligentes para tener conectividad de múltiples dispositivos y desarrollar así, infinidad de tareas beneficiosas para la sociedad, que van desde incrementar la productividad de las empresas, hasta ayudar a combatir fenómenos de inseguridad y delincuencia que generalmente afectan a la mayoría de los centros urbanos del país.

Se justifica la implementación de la tecnología de red 5G en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta el acelerado crecimiento de la población, desarrollo de la industria 4.0, incremento de negocios y un sinnúmero de actividades dinamizadoras en áreas de educación, deportes, turismo, asistencia médica, entre otras; las cuales demandan gran cantidad de servicios y recursos de sistemas de comunicaciones inalámbricas; motivo por el cual, es imperativo la migración de estos sistemas para que sean soportados por nuevas tecnologías avanzadas de comunicaciones, que satisfagan las necesidades técnicas y de expansión, que difícilmente pueden ser atendidas en estos momentos con la tecnología actual de red 4G.

En consecuencia, es prioritario evolucionar a la tecnología de red 5G, que promete mayores bondades y beneficios con la fusión de la industria 4.0, que además de las comunicaciones móviles, propiciará novedosos desarrollos tecnológicos en áreas de Internet de las Cosas (IoT), Big Data, ciudades inteligentes (Smart City), comunicación máquina a máquina (M2M), entre otras modalidades inteligentes.

De esta manera, se busca un cambio tecnológico avanzado en las comunicaciones móviles y automatización de procesos industriales, lo cual inducirá a nuevas ideas de negocios, valores agregados, creación de nuevos empleos dignos y por supuesto, un mayor desarrollo económico beneficioso para empresas, población y comunidad en general.

Para satisfacer esta demanda creciente de servicios móviles y conectividad inteligente, es prioritario utilizar las frecuencias de la banda C (3,3 a 4,2 GHz) (n48, n77, n78) (FCC, 2020) de manera compartida, aprovechando la ventaja de esta porción del espectro electromagnético, por contener más ancho de banda para las comunicaciones de red 5G y presentar muy baja susceptibilidad a la atenuación por lluvias. De otro lado, esta banda es la primera concertada internacionalmente para el despliegue de la red 5G en el mundo.

Así mismo, el uso de banda K (18-27 GHz) (n258) (CableFree, 2020), cuyas frecuencias del espectro electromagnético ofrecen altas velocidades de banda ancha de forma compartida y brinda excelentes servicios a las empresas operadoras de internet satelital y comunicaciones móviles. Esta banda milimétrica, ofrecen un buen rendimiento al soportar altas velocidades y bajas latencias muy apropiadas para satisfacer la demanda creciente de servicios móviles en áreas de alta densidad de tráfico. Es de resaltar, que las frecuencias de la banda K son usadas ampliamente en China y otros países con excelentes resultados.

En síntesis, la tecnología 5G, ofrece excelentes ventajas, especialmente en procesos de transmisión de diferentes tipos de archivos (Voz, datos, video, etc.), como lo menciona la fuente de MinTIC "Por ejemplo, descargar un archivo de 800 MB bajo la tecnología 3G puede tomar 26 minutos y 40 segundos, a una tasa promedio de 4 kbps, y alrededor de 4 minutos y 16 segundos bajo la velocidad típica de 4G de 25 Mbps. Con 5G puede tomar 0,3 segundos debido a su tasa de transmisión de 20 Gbps (Abu-Rgheff, 2020)" (Rojas Valderrama, Ligia, 2022)

## **Generalidades de la Investigación**

En este capítulo se define el planteamiento del problema, el problema de investigación, los objetivos la justificación, el marco de referencia y el marco metodológico del proyecto aplicado.

### **Planteamiento del Problema**

El advenimiento de las redes móviles de quinta generación 5G en el país, caracterizadas por alta velocidad, baja latencia y disminución de costos, entre otros beneficios, trae mejoras en la optimización de recursos y portafolio de servicios de los operadores de redes de telefonía móvil, con lo cual se garantizará conexiones eficientes de banda ancha, ofreciendo al usuario final un plus de opciones referentes a acceso ilimitado y la posibilidad de compartir la información en tiempo real con otros usuarios, en cualquier sitio y hora.

Analizando el déficit del país en materia comunicaciones, específicamente en conexiones de internet, el Departamento Administrativo de Estadística DANE, menciona en sus reportes estadísticos que "la proporción de hogares con conexión a internet en Colombia es de 56,5 %, lo que quiere decir que uno de cada dos hogares no tiene Internet fijo y la penetración de internet móvil es apenas la mitad de la observada en los países desarrollados (La República, 2021); es decir, más de 26 millones de compatriotas no poseen una conexión a internet con telefonía móviles. De otro lado, la situación de la pandemia obligó a las personas a realizar actividades de estudio, trabajo, trámites de salud, entre otras, en los propios hogares; lo cual demostró que se requieren como mínimo 50 Mbytes de velocidad para garantizar el desarrollo de actividades digitales simultáneas en los hogares colombianos. (De la Hoz, 2021).

Otras estadísticas de la situación digital de Colombia en el período 2020-2021, se mencionan a continuación. (Branch, 2021).

Con respecto a las conexiones móviles, el número de dispositivos móviles conectados en el país es de 60.83 millones. Eso quiere decir que la cantidad de conexiones a través de celulares, Tablets y portátiles superan a la población total (119%).

Los usuarios de Internet activos en el país representan el 68% de la población total. De ese 68%, 76.4% es activo en diversas redes sociales, entre ellas Facebook, TikTok, Instagram, y YouTube.

Con respecto al 2020, la población en Colombia creció en un 0.9%, representando unas 463 mil nuevas personas.

Desde el año pasado las conexiones telefónicas móviles también, aumentaron específicamente en un 1.9%. Por tanto, existen 1.1 millones de nuevos dispositivos móviles conectados.

El porcentaje de usuarios de Internet aumentó en un 4.0%, a lo largo de un año, sumando a 1.3 millones de nuevos internautas.

Al mismo tiempo, el número de usuarios conectados a redes sociales tuvo un aumento significativo de un 11.4%, lo que representa un total de 4.0 millones de perfiles nuevos.

Los períodos de cuarentena y aislamiento, por motivos del COVID-19, elevaron nuestra necesidad de estar conectados a Internet y a las redes sociales, para conversar con amigos y familiares, entretenernos desde casa y cumplir con nuestras responsabilidades laborales y académicas. (Branch, 2021).

Con referencia a la situación en Bogotá, la cobertura y calidad del servicio de telefonía móvil es deficiente (MinTic, 2021), continuamente se presenta fallas, debido a insuficiencia en la infraestructura (Estaciones base, antenas, etc.) y en menores casos por hurto de equipos y dispositivos, principalmente en los sectores periféricos de la ciudad. Estas fallas corresponden

entre otras, a deficiencia de las señales, caídas en llamadas, según informe del Alto consejero Distrital de TIC Sergio Martínez Medina (Cortés, 2019).

Ante esto, la Alta Consejería Distrital TIC, ha venido desarrollando acciones conjuntas con el Ministerio de Tecnologías de Información y la Agencia Nacional del Espectro (ANE), entregando información y brindando asesoría técnica a los operadores de telefonía celular en el despliegue óptimo de la infraestructura móvil de la ciudad. La anterior iniciativa fue motivada por el uso masivo de la tecnología que manejan los bogotanos. Según un estudio de economía digital realizado por la Alta Consejería Distrital, se estableció que el 87% (ENTER.CO, 2017) de la población capitalina poseen un dispositivo Smartphone.

Paralelamente, un diagnóstico realizado por el Observatorio de Desarrollo Económico de Bogotá ODE, sobre la incidencia del teléfono móvil en la expansión de las actividades económicas en Bogotá, estableció que las localidades con mayor porcentaje de tenencia de celular son: Teusaquillo (93,4%) y Chapinero (92,6%), seguidas de Usaquén y Engativá, con 91,5% y 90,5%, respectivamente. Así mismo, las localidades con menor tenencia de celular son San Cristóbal (79,7%), Santa Fe (80%), Ciudad Bolívar (81,2%) y Usme (81,3%) (Secretaría de Desarrollo Económico Bogotá, 2015).

Otro factor determinante, es el continuo crecimiento de la población en la ciudad de Bogotá, a tasas de 1,7% anual (El Tiempo, 2018) que incide en mayor demanda del servicio de comunicaciones y por supuesto un aumento de fallas y saturación de los sistemas de los servicios de comunicación telefónica fijo y móvil, lo cual se traduce en perturbaciones continuas, inseguridad, molestias, pérdida de tiempo y dinero de los usuarios. Sin embargo, los operadores en su afán expansionista han venido instalando antenas a lo largo y ancho de la ciudad de forma desordenada, y muchas de estas estructuras no cuentan con el respectivo permiso de la Secretaría

de Planeación. De acuerdo, con el inventario realizado en el año de 2015, se hallaron 4.179 antenas ilegales (Alcaldía de Bogotá, 2019), las cuales no cumplían con los componentes técnicos, urbanísticos y arquitectónicos exigidos en la normatividad vigente. Esta situación se ha venido mejorando con la expedición del Decreto 397 de 2017 que fijó un plazo de tres años, contados a partir de febrero de 2018, para legalizar las instalaciones por parte de los operadores de telefonía celular.

Como resultado de aplicar estas medidas, en el año de 2019 fueron legalizadas 1.076 estaciones radioeléctricas (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019) y según afirmación del secretario Distrital de Planeación Andrés Ortiz Gómez, las localidades que registraron un mayor número de antenas aprobadas fueron Suba, Teusaquillo, Usaquén y Chapinero (Buitrago, 2018).

Con referencia a planes de crecimiento y expansión de comunicaciones móviles en Colombia, se describe a continuación datos de los cuatro operadores más importantes del mercado de telefonía móvil en Colombia:

La empresa CLARO, es la preferida en materia de telecomunicaciones y de mayor cobertura en el país. Con esfuerzo financiero y tecnológico desplegó una "cobertura de internet móvil 4G al 99% de Colombia, es decir, a 1.098 municipios en los 32 departamentos del territorio nacional", con la implementación de 9.209 estaciones base en todos los departamentos, dando a sus clientes con mayor capacidad y alta velocidad de navegación en sus dispositivos móviles. Dentro de los planes de expansión, desarrolló estrategias para asegurar que más abonados, con preferencia a las clases más vulnerables, accedan a los beneficios que traen las nuevas tecnologías de la comunicación. (Revista Semana, 2022b). Otro de los más recientes operadores, es WOM (Word Of Meath), quien "firmó una alianza con Apex América, una empresa multinacional de BOP con más de 17 años de experiencia en el mercado; así, buscó

elevant el crecimiento a tasas de 30%, con base en un presupuesto de 10 millones de dólares" (Observatorio TIC, 2021). Siguiendo la misma línea de avance en la cobertura fija y móvil, la empresa TIGO, en el período de abril a octubre de 2020, instaló más de 1.000 antenas en la banda de 700 MHz que representó un objetivo de 2.365 kilómetros cuadrados adicionales de cobertura LTE (Long Term Evolution) y con la expectativa de activar más de 2.000 antenas al finalizar el año de 2020 en distintos puntos del Colombia. Con este despliegue de instalación de antenas, se logró que un millón de personas tuvieran acceso a internet.(Revista Semana, 2022a). En similares circunstancias, el operador "Telefónica Movistar fortaleció su despliegue de fibra óptica a 32 ciudades del país, lo que le implicó 1.300.000 hogares que lograron tener fibra óptica en medio de la pandemia". Esta expansión representó una inversión \$ 700.000 millones, lo cual logró la conectividad de demás de 320.000 nuevos clientes. (Valora Analitik, 2021). Otro aspecto importante y a favor de la implementación de redes 5G, fue la realización de pruebas piloto para "identificar las barreras y desafíos que puedan desincentivar el despliegue y masificación de la tecnología 5G" en Colombia. Debido a esto, el Gobierno Nacional en el mes de julio de 2020, otorgó permisos a varios operadores del uso del espectro electromagnético para realizar pruebas piloto de comunicaciones móviles (Comercio, 2022) (Ver tabla 1). En contraste con los planes de expansión y crecimiento de las comunicaciones móviles en Colombia, es "indudable que en Colombia hay un nivel de retraso importante", (El Tiempo, 2022) debido al rezago del desarrollo, implementación y subasta de la red 5G, que probablemente el Gobierno Nacional estaría pensando en subastar en el período de 2023 a 2024.

Igualmente, existe "dificultad en el mercado local de comunicaciones, porque muchas empresas que buscan competir no lo pueden hacer por tener una estructura pública que limita su poder de inversión" (Valora Analitik, 2022).

**Tabla 1***Pruebas Piloto de Implementación de Redes 5G en Colombia*

PRST	# Siti os	Ciudad	Banda Frec. (MHz)	Ancho Banda (MHz)	Fecha Inicio	Fecha Final	Caso de Uso
Colombia Telecomuni caciones	1	Bogotá	3500 - 3600	100	11-05-2020	11-11-2020	Control de temperatura en la Secretaría de Salud Bogotá.
Comcel	30	B/bermeja (2) Bogotá (10) Cali (8) Medellín (10)	3400 - 3600	100	24-06-2020	24-12-2020	Personas eMMB Hogares FWA o acceso fijo inalámbrico red privada.
Colombia Telecomuni caciones	3	Bogotá	3500 - 3600	100	09-07-2020	09-01-2021	Hacer control de temperatura a través de cámara térmica, Telemedicina, Monitoreo médico remoto y Teleeducación.
Empresa de Telecomuni caciones de Bogotá ETB	1	Bogotá	3400	100	01-08-2020	01-02-2021	Implementación y puesta en funcionamiento del caso de uso escogido por ETB que sería Seguridad Pública.
ITIC SAS	1	Bogotá	3300 - 3700	20	02-10-2020	02-12-2020	Probar diferentes tipos de sensores (medio ambiente, movilidad, energía).
Xiro Investment Group S.A. SP	1	Tolú	3550 - 3700	100	01-07-2020	01-12-2020	Validación de la tecnología 5G New Radio para crear redes privadas y aplicaciones IoT.

*Nota.* Estudio de Infraestructura de Telecomunicaciones móviles en Colombia. Tomado de

(Superintendencia\_Industria \_ Comercio, 2020).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se considera necesario y justificable realizar la presente investigación para determinar la viabilidad de implementar en las localidades de Suba, Usaquén, Engativá, de la ciudad de Bogotá, una red 5G-NR de telefonía móvil, que dé solución a toda la problemática de comunicaciones que afecta este sector del norte de la ciudad y de esa manera obtener un estudio documentado que sirva a operadores en la implementación de éstas redes y con ello lograr mayor acceso de usuarios al sistema, incrementar la velocidad, disminuir la latencia de llamadas y el beneficio de reducción de costos en el mediano plazo, lo cual conllevará en un futuro cercano a tener usuarios plenamente satisfechos en materia de comunicaciones móviles celulares.

Se plantea entonces, desarrollar en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá de la ciudad de Bogotá, un estudio para implementar una red 5G-NR de telefonía móvil. Con base en lo analizado anteriormente, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo identificar las características técnicas para la implementación de una red estándar 5G-NR en las bandas C (3,5 GHz) y K (26 GHz) de las localidades de Suba, Usaquén, Engativá de la ciudad de Bogotá?

## Objetivos

### Objetivo General

Realizar un estudio técnico para la implementación de una red de telefonía móvil estándar 5G NR en las localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la ciudad de Bogotá, en las bandas C (3.5 GHz) y K (26 GHz), mediante la aplicación de indicadores de desempeño KPI.

### Objetivos Específicos

Caracterizar los indicadores de desempeño en una red 5G NR, de conformidad con los estándares internacionales establecidos.

Diseñar los escenarios de prueba, teniendo en cuenta los indicadores de desempeño y especificaciones técnicas de la red 5G NR.

Realizar las simulaciones de la red 5G NR en las bandas C (3.5GHz) y K (26GHz), con la herramienta Xirio online de las tres (3) localidades de la ciudad de Bogotá.

Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Documentar el estudio técnico y sus componentes, de acuerdo con la revisión del estado del arte, referentes teóricos y simulaciones de la cobertura radioeléctrica.

## Justificación

El mercado actual de las comunicaciones móviles en nuestro país se caracteriza por una alta concentración en manos de pocos operadores. Según estudio de la Universidad de los Andes, "Colombia ocupó en el año de 2017 la posición 16 entre 59 países de la muestra empleada" en el análisis del grado de concentración, lo cual representa una baja competitividad, que se traduce en altos precios de los servicios de telecomunicaciones, atraso en la expansión digital y por supuesto, mayor afectación en el desarrollo económico del país.

Este grado de concentración se sustenta en estadísticas del Ministerio de la Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones (MinTIC) del cuarto trimestre del año 2021, donde se ubica la empresa Claro como operador dominante, con una participación del 47,99%, seguido por Movistar con 25,7%, Tigo con 19,87%, Avantel con 0,59 % y ETB con un 0,32 %.

Con la entrada en el primer semestre del presente año del operador WOM (WON, 2022), se dinamizó la competencia del mercado de telefonía móvil, ofreciendo diversos planes de cargos básico a precios más bajos y obligando a los demás operadores a ofertar planes más económicos.

Es de anotar, que Colombia presenta actualmente un "rezago enorme en el despliegue de 4G" y, por tanto, el Gobierno Nacional y los operadores deben realizar esfuerzos y apropiar inversiones para cerrar la brecha digital que todavía tiene el país, prioritariamente en las zonas rurales. Esta afirmación del presidente de Tigo Marcelo Cataldo, se sustenta en las siguientes cifras del Ministerio de las TIC, donde alrededor de "10 millones de colombianos todavía se conectan a internet móvil vía 2G y 3G". De otra parte, la red 4G presenta una penetración del 43%, que es una cifra baja si se compara con otros países de la región como Chile con un 91% y Brasil que llega al 73% de penetración en el mercado.

Igualmente, es importante resaltar que Colombia, en la actualidad no cuenta con la infraestructura, avance tecnológico, disponibilidad del espectro, marco normativo suficiente y desarrollo del sector de comunicaciones móviles para implementar una red 5G, según declaración de Carlos Archila, presidente de América Móvil Colombia, casa matriz de la empresa Claro, "Colombia se está quedando por fuera de la foto, ya que en el país no se llevó a cabo la subasta de espectro de la banda de 3.500 MHz que se tenía planeada y lo que está pasando es que nos vamos a retrasar. Ya estamos retrasados con 4G, en el sentido que esa tecnología de cuarta generación no le está llegando a todos los rincones del país".

Sin embargo, la presencia de la tecnología de redes 5G en Colombia, ya es una realidad con la implementación de varios pilotos, entre ellos el proyecto para monitorear la temperatura corporal con redes 5G de los trabajadores de la Secretaría de Salud de Bogotá con el auspicio de los operadores de Huawei y Movistar. "Se trata de un caso en el que se usan cámaras termográficas para ayudar a monitorear la temperatura de las personas que trabajan y transitan en la Secretaría y el laboratorio de salud pública"(El Tiempo, 2022).

De acuerdo con las cifras, aspectos y consideraciones analizados anteriormente, se justifica el desarrollo de este proyecto, sustentado en los siguientes factores:

### **Viabilidad Técnica**

La tecnología de red 5G caracterizada por alta velocidad y reducida latencia, requiere nuevas bandas de frecuencias para su óptimo funcionamiento, razón por la cual fueron seleccionadas las bandas C y K que ofrecen las siguientes ventajas:

“La banda C es clave porque ofrece un balance óptimo entre cobertura y capacidad, la cual será vital para proporcionar una experiencia de servicio adecuada” en zonas urbanas y

suburbanas, afirmó José Ayala, presidente del grupo de Espectro de GSA para la región en la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (Citel) (García, 2020).

Por parte de las autoridades nacionales, en Colombia y Canadá no pierden de vista el potencial de la banda C para el despliegue de redes de quinta generación. (García, 2020).

"La banda C es ideal para los servicios de telecomunicaciones y de radiodifusión en áreas rurales y marítimas, donde apenas se dispone de infraestructura terrestre o es inexistente. Otra de las ventajas de la banda C es su baja susceptibilidad a la atenuación por lluvia, que la hace especialmente estable para enlaces en zonas tropicales. Asimismo, los servicios en la banda C son esenciales para emergencias y recuperación de desastres". (Schwarz, 2022).

"La mayoría de la gente sabe que 5G, se supone que brindará Internet móvil más rápido a los usuarios de teléfonos inteligentes, pero ahora se está implementando una nueva variedad conocida como C-Band. Este tipo de 5G es diferente a lo que ha estado disponible en los últimos años y tiene algunos beneficios significativos. Por tanto, la principal preocupación con Internet móvil es mantener una conexión confiable, seguida de cerca por el deseo de descargas y cargas más rápidas, que es donde C-Band puede ayudar" (LaNetaNeta, 2022).

"Las comunicaciones satelitales en banda K presentan la ventaja de poder transmitir datos con mayores velocidades, por lo que es una opción ideal para aplicaciones interactivas. Otra de las principales ventajas es que el tamaño de las antenas para transmitir y recibir estas altas frecuencias es menor, lo que abarata significativamente el costo de cualquier proyecto (Artiles Brito, 2018).

El proyecto es totalmente realizable desde el punto de vista de los procedimientos aplicables de tecnología electrónica, sistemas de información, telecomunicaciones, y la facilidad de recopilación de datos e información especializada y verídica en la Web.

Es importante realizar el presente estudio técnico para la implementación o despliegue de una red 5G, el cual es una herramienta facilitadora que permite indagar la situación actual y obtener información veraz referente a:

Estimaciones de población que se va a beneficiar.

Establecer las velocidades de conexión a internet en medidas de Gbps.

Expansión de números de conexiones soportadas y dispositivos de terminales 5G por kilómetro cuadrado.

Fiabilidad de las comunicaciones.

### **Viabilidad Económica**

El costo que demanda el proyecto es bastante económico, ya que no es necesario adquirir ninguna clase dispositivos electrónicos ni elementos similares, solamente se requiere el uso de internet, Word, Excel y el software online Xirio Online con licencia de la UNAD, para efectuar las simulaciones de la cobertura radioeléctrica en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá.

### **Viabilidad Social**

La propuesta de solución del proyecto va encaminada a la implementación de la tecnología 5G en la población residente de las localidades de Suba, Usaquén y Engativá de la ciudad de Bogotá, considerando que actualmente son polos activos de desarrollo comercial, empresarial, educativo, deportivo, entre otras actividades y, además, por contar con una alta población residente y flotante, que a diario demandan un amplio volumen de comunicaciones móviles y servicios de conectividad empresarial.

### **Viabilidad Ambiental**

Igualmente, este proyecto cuyo objetivo va encaminado a realizar un estudio de implementación de una red 5G-NR de telefonía celular, para mejorar el servicio de

comunicaciones de la población de las tres (3) localidades, no representa ningún riesgo que afecte las condiciones ambientales de estas localidades de Bogotá.

## **Marco Teórico**

### **Redes 5G**

El concepto de redes 5G, tema relevante de la actual investigación, hace referencia a las redes celulares de quinta generación, que ofrece tecnologías innovadoras para la difusión del internet de las cosas (IoT), mediante la implementación de superautopistas de información, con alta velocidad de transmisión de datos, que van desde los 5 a 10 Gbps y disminución del tiempo de concretar la llamada (baja latencia), entre otras bondades tecnológicas.

Esta novedosa tecnología ya funciona ampliamente en países como China, Estados Unidos y Japón; mientras que, en Colombia hasta ahora el Gobierno Nacional y operadores de telefonía celular están llegando a acuerdos para implementar escasos pilotos de prueba (RedHat, 2021). Igualmente, conlleva muchos beneficios a los usuarios que "se verán favorecidos con rapidez, ya que el espectro alcanzará velocidades de entre 10 y 250 veces las actuales. En el caso de velocidades de 20 Gbits por segundo, la tecnología permitirá bajar una película en alta definición en segundos, ver televisión 8K, así como ver hologramas o a aplicaciones de realidad virtual" (Arreola-Rosales, 2019).

### **Ancho de Banda**

El término banda ancha, hace referencia a una red de transmisión con elevada capacidad para transmitir o transportar información a altas velocidades utilizando diferentes medios como cableado de cobre, fibra óptica, ondas de radio, comunicación satelital y cable submarino. (Medina, 2022).

### **Internet de las Cosas (IoT)**

El Internet de las cosas (IoT), muy de moda en la implementación de proyectos con redes 5G, se refiere al proceso de poder conectar dispositivos físicos o elementos cotidianos a la red de

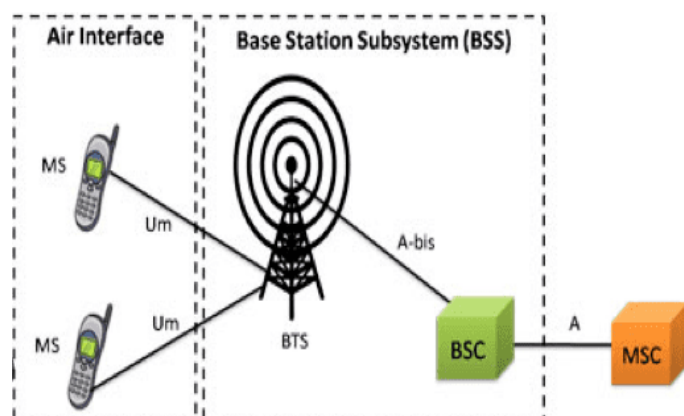
internet, los cuales van desde los electrodomésticos comunes en los hogares como la nevera, el horno microondas, el televisor, el teléfono celular, cámara web, entre otros dispositivos de la electrónica de consumo.

Así mismo, apunta a diversos ambientes de empresas, oficinas, hospitales, aeropuertos, fábricas y múltiples instituciones, en lo concerniente a robots, máquinas automatizadas, monitores inteligentes, cámaras de reconocimiento facial y demás infraestructura inteligente ubicada en espacios internos, capaces de desarrollar tareas muy especializadas que requieren acciones y tiempos precisos como realizar a una cirugía a control remoto, dirigir la trayectoria de un cohete, etc.

Así mismo en sectores externos con presencia de vehículos, semáforos, pasos peatonales y otros elementos de calle, en los cuales se puede establecer una integración de comunicaciones inteligentes entre objetos, de manera que puedan interactuar entre sí, realizando operaciones automáticas, como lograr que un automóvil circule por una autopista inteligente sin presencia del conductor, control de tráfico vehicular, protección a peatones en cruces de semáforos, etc. (RedHat, 2022).

### **Sistema de Telefonía Móvil Celular**

Una red de telefonía móvil está constituida por celdas o células que se solapan entre sí para cubrir áreas geográficas demarcadas, generalmente de acuerdo con la densidad de población y otros factores (Equipos, configuración, topografía del terreno, etc.), las cuales en ciudades puede ser de 2 kilómetros y en zonas rurales de pocos o muchos kilómetros, por decir una extensión de 200 kilómetros aproximadamente (Ver figura 1).

**Figura 1***Topología General de un Sistema Celular*

*Nota.* La figura muestra la configuración de un sistema de telefonía móvil. Tomado de (Román, 2015).

Se puede afirmar que este esquema de funcionamiento ha venido operando desde la primera generación y que persiste actualmente en la cuarta y quinta generación, lógicamente ciento por ciento mejorado con innovaciones e implementación de robustas plataformas tecnológicas que han redundado en una amplia oferta de servicios de comunicación ágiles y versátiles en beneficio de los usuarios.

Teniendo presente el continuo crecimiento de las redes de acceso móvil y la mayor demanda de servicios de comunicación por parte de los usuarios, surgió la necesidad de diseñar e implementar una nueva red capaz de satisfacer los requerimientos actuales de los clientes y afrontar la demanda creciente de comunicaciones móviles de los años venideros.

En respuesta a lo anterior, nace la nueva red 5G New Radio diseñada para lograr un mayor ancho de banda, disminuir los tiempos de latencia y maximizar la cantidad de dispositivos de comunicación posibles de conectar al mismo tiempo. Es por esto, que el presente trabajo tiene

como propósito realizar un estudio pormenorizado de la nueva red 5G New Radio con base en indicadores de desempeño KPI, definir una arquitectura exclusivamente enfocada al componente de la RAN (Radio Access Network), seleccionar los equipos de radiotransmisión requeridos y efectuar una simulación con el software Xirio Online para establecer la cobertura radioeléctrica en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá de la ciudad de Bogotá. Básicamente, un sistema de telefonía celular está compuesto por los siguientes 2 elementos:

Red de radio acceso (RAN).

Core (Núcleo).

### **Infraestructura de una Red de Acceso Radio RAN**

La RAN (Radio Access Network), es un componente de un sistema de telecomunicaciones conformado por hardware y software que se encarga de conectar dispositivos individuales a otros subsistemas de la red principal de comunicaciones a través enlaces vía radio.

Es usual encontrar este componente en todos los dispositivos de comunicaciones utilizados diariamente como: El teléfono móvil, un laptop y demás dispositivos inteligentes empleados en comunicaciones remotas.

En el caso de esta investigación concerniente a redes móviles 5G, la RAN suministra acceso y gestiona la asignación de recursos en los diferentes sitios de radio y la red central e igualmente, se encarga del envío de señales inalámbricas a varios puntos terminales de la red con el fin de garantizar el tráfico eficiente de la información.

Una unidad RAN implementada en las generaciones de telefonía móvil anteriores, básicamente está compuesta por una estación base y un sistema de antenas que abarcan un área determinada, dependiendo de su capacidad tecnológica de operación. (Rouse, 2020).

## Componentes de una Unidad RAN

La infraestructura RAN, está conformada por una estación base BS (Base station) en la cual convergen para el procesamiento de la información, las unidades de banda base BBU (Baseband Unit) conectada troncalmente (backhaul) a la red core y las cabeceras de radio remotas RRH (Remote Radio Head). (Ver figura 2). (Cuba Zúñiga, 2018).

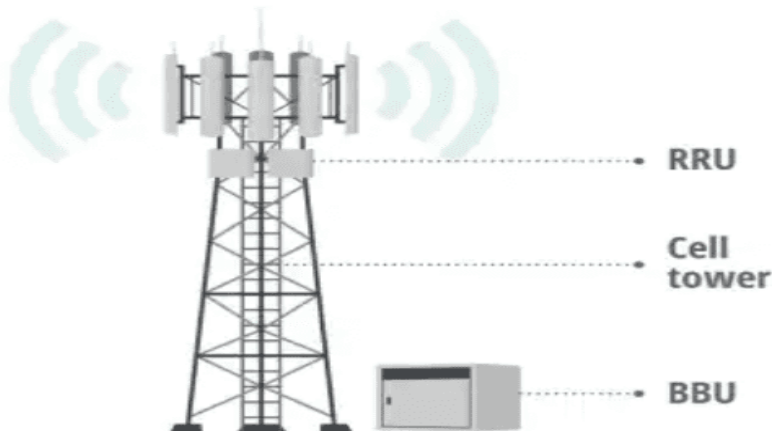
Los componentes de RAN incluyen estaciones base y antenas que cubren una región específica. Una RAN se compone de los siguientes tres elementos esenciales:

Las antenas, ubicadas en la Remote Radio Unit (RRU), que convierten las señales eléctricas en ondas de radio.

Las radios, que transforman la información digital en señales que se pueden enviar de forma inalámbrica y garantizan que las transmisiones se realicen en las bandas de frecuencia correctas con los niveles de potencia correctos.

Las unidades de banda base (BBU), que proporcionan un conjunto de funciones de procesamiento de señales que hacen posible la comunicación inalámbrica (Fitzgibbons, 2023).

La estación base 5G NR (New Radio) se denomina gNodeB (gNb). Las radios gNodeB cuentan con radio definida por software (SDR) con varias opciones de arreglos MIMO, incluidos puntos de acceso inalámbrico de  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$  (Número de antenas) y opciones Massive MIMO para capacidades en frecuencias más altas.

**Figura 2***Arquitectura de RAN Tradicional*

*Nota.* En esta gráfica se representa la infraestructura de un sistema de Radio Access Network RAN. Tomado de (Deloitte, 2020).

**Evolución de la RAN (Radio Access Network)**

La arquitectura RAN definida por la organización 3GPP en lanzamientos anteriores, ha quedado obsoleta, debido a la acelerada evolución de las tecnologías de comunicaciones, nuevas necesidades de comunicación de los usuarios y al incremento del tráfico de datos que ofrece el mercado de dispositivos inteligentes. Esta panorama, obligó a fabricantes y operadores a considerar estrategias de mejoras en aspectos de eficiencia, escalabilidad y flexibilidad de las redes de acceso vía radio, y por consiguiente a replantear la infraestructura de la RAN tradicional, en donde los procesos realizados en las unidades de banda base BBU (Baseband Unit) y los cabezales de radio remotas RRH (Remote Radio Head) son replicados en cada estación base BS (Base station), ocasionando doble trabajo y un gasto excesivo de energía. Para solucionar este problema de redundancia, surgió la arquitectura C-RAN (Centralized Radio

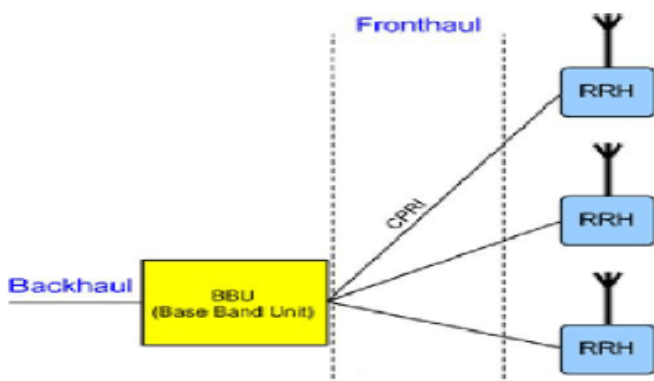
Access Network, or Cloud Radio Access Network), la cual permitió gestionar el aumento de datos de las redes a menores costos.

### Arquitectura C-RAN

Esta nueva arquitectura C-RAN, separó totalmente las unidades de banda base BBU (Baseband Unit) y los cabezales de radio remotas RRH (Remote Radio Head), ubicando el RRH (Remote Radio Head) al lado de la antena en las torres celulares para que siga cumpliendo con las funciones de radio frecuencia. Igualmente, la unidad BBU (Baseband Unit), fue colocada en los centros de la Red, a diferencia de la RAN tradicional que estaba ubicada en las torres celulares. Este nuevo sistema de centralización de las BBUs facilitó la conexión de varios módulos cabeza remota (RRH) a una misma unidad Banda base (BBU), mediante el protocolo CPRI (Common Public Radio Interface) y a través de un segmento dedicado de gran ancho de banda denominado "Fronthaul", el cual fue construido con fibra óptica para garantizar un óptimo rendimiento de la red (Ver figura 3) (Castro Sánchez, 2021).

### Figura 3

#### Arquitectura C-RAN



*Nota.* La gráfica muestra el sistema de una Unidad de Banda Base BBU. Tomado de (Cuba Zúñiga, 2018).

La principal diferencia con la arquitectura RAN tradicional, radica en la ventaja de poder conectar varios módulos cabeza remota (RRH) a una única unidad Banda base (BBU) centralizado, favoreciendo notablemente la eficiencia y capacidad de tráfico de datos y por tanto disminuyendo los costos de implementación de la red.

### **Arquitectura OPen-RAN**

Los sistemas de redes de acceso por radio anteriores al estándar 5G, tradicionalmente han sido implementados por un solo proveedor propietario. Esta situación llevó a que un operador únicamente podía usar tecnologías de un solo proveedor, impidiendo acceder a recursos de otros operadores por incompatibilidad de tecnologías.

Esta situación de carácter cerrada favorecía exclusivamente a los proveedores, ya que un operador quedaba atado a un único proveedor en lo pertinente a instalación, actualización y mantenimiento de la red de acceso.

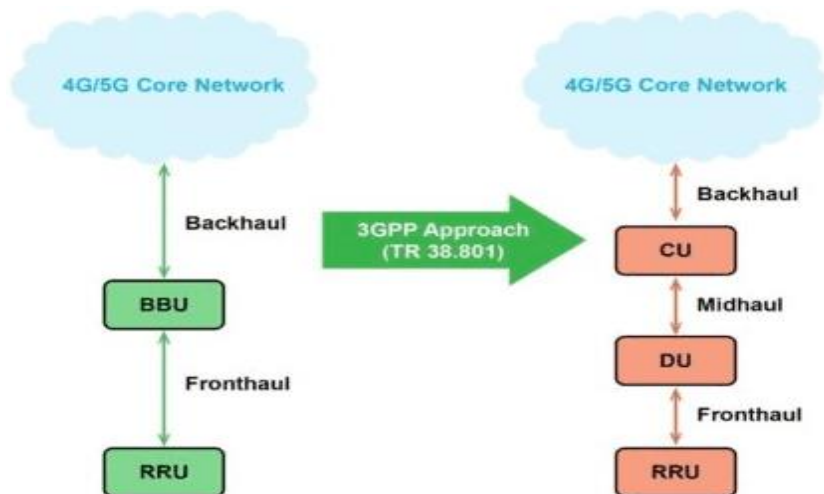
Este aspecto, fue uno de los motivos fundamentales que dio origen al concepto de redes abiertas, haciendo que un operador pudiera adquirir productos de diferentes operadores en la implementación de redes.

Desde las primeras arquitecturas abiertas del New Radio (NR) de 5G, ha habido un interés común de operadores y fabricantes de desagregar la unidad Banda base (BBU), separando las funciones de la Unidad de Radio (RU) en Unidades Distribuidas (DUs y Unidades Centralizadas (Cus).

La desagregación de funciones da mayor flexibilidad permite a los operadores de la red adaptar la configuración de la RAN, combinando piezas de hardware y software de diferentes proveedores maximizando el rendimiento y reduciendo tiempos y costos de implementación (Ver figura 4) (Jordán, 2021).

**Figura 4**

*Open RAN con Separación de la Unidad BBU en Unidades DUs y CUs*



*Nota.* En la figura se observa la desagregación de los componentes de una la unidad Banda base (BBU). Tomado de (Jordán, 2021).

La arquitectura Open-RAN, se caracteriza en función de los siguientes 5 principios:

1. Interfaces Abiertas.
2. COTS como hardware (utilizarse sin cambios después de la compra).
3. Virtualización y funciones definidas por software.
4. Interoperabilidad.
5. Múltiples proveedores.

La infraestructura Open-RAN, basada en un nuevo enfoque ágil y versátil, pretende desagregar el hardware del software, implementar servidores genéricos e instalar las funciones requeridas de forma virtualizada para el funcionamiento eficiente de la red.

El nacimiento de la arquitectura Open-RAN, da origen en el año 2018 a la Entidad O RAN ALLIANCE, que es una alianza conformada por operadores chinos, americanos y

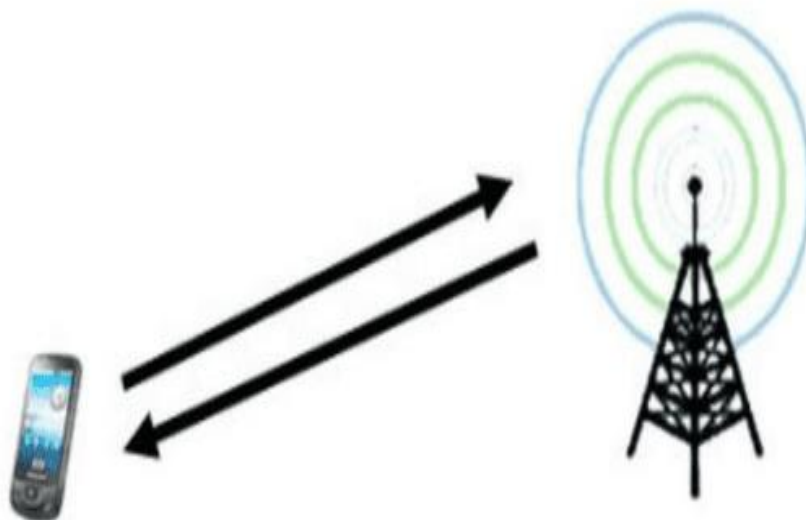
japoneses. Sus objetivos están encaminados a dotar a las redes de acceso vía radio de un alto grado de inteligencia y apertura con el propósito de desarrollar productos de hardware y software innovadores fundamentados en procesos en tiempo real de AI (inteligencia artificial) (Castro Sánchez, 2021).

### **Antenas**

La antena es un dispositivo que permite convertir la energía electromagnética que circula por un conductor, a una onda electromagnética que viaja hacia el espacio libre y se utiliza como interfase entre el transmisor, el espacio libre y el receptor de un sistema de comunicaciones. Las antenas son elementos metálicos, resonantes y recíprocos, que permiten transmitir y recibir datos a través del mismo dispositivo, como se ilustra en figura 5 (Molina, 2021).

### **Figura 5**

#### *Antena de Trasmisión y Recepción*



*Nota.* La gráfica muestra la comunicación en doble vía entre una antena y terminal de usuario UE. Tomado de (Molina, 2021).

## **Descripción del Conjunto Antena – Equipo de Radio**

En los sistemas de telefonía celular hasta la generación 4G, se venían utilizando las antenas pasivas o antena legacy. Con la llegada de la generación 5G, la estación Base que es el módulo que canaliza las señales de radio captadas por la antena y las transfiere a la red de comunicaciones en 2 vías (transmisión - recepción), es cada vez más compleja, debido a la mayor gestión de señales a distintas frecuencias. Para solucionar este cuello de botella, se comienza a implementar las antenas activas para el estándar 5G New Radio (NR), con el propósito de aplicar las tecnologías de Beamforming y Massive MIMO (Múltiple-Input Múltiple-Output).

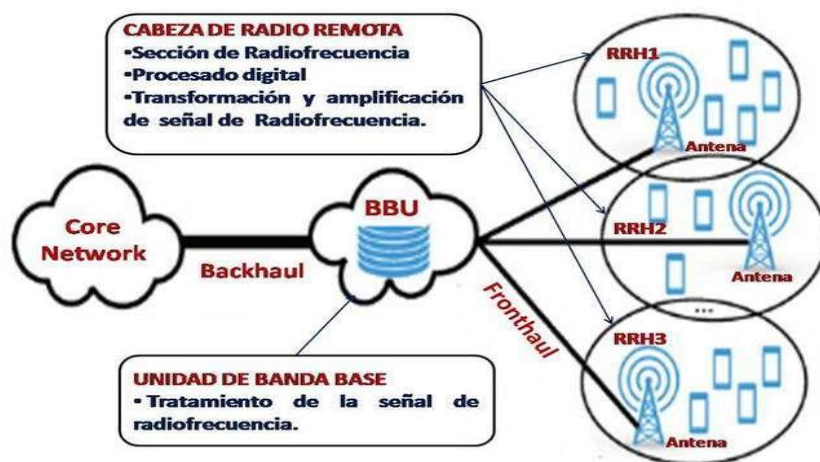
Para la transmisión de datos en la red con el estándar 5G New Radio, son necesarios enlaces de 10 GB en la red, con el fin de lograr una buena compatibilidad con los equipos de radio encargados de transmitir y recibir las señales. Estos equipos constan de varios elementos como son la unidad de Banda Base (BBU), sitio donde se efectúa el tratamiento de la señal, el módulo de Cabeza de Radio Remota (RRH) que integra la sección de radiofrecuencia y el desarrollo del procesado digital, que en otras palabras corresponde a la transformación y amplificación de la señal de radiofrecuencia que conecta con la Terminal Móvil de Usuario. Como complemento final está el sistema radiante, el cual está constituido por la antena que conecta con la unidad de Radio, mediante cables de fibra óptica o coaxial de radiofrecuencia (RF) (Ver figura 6).

En los sistemas móviles de generaciones anteriores al 5G New Radio (NR), la Unidad de Radio y el sistema radiante de antena son vistos técnicamente como 2 elementos totalmente independientes y diferenciados. Por tal razón, los operadores tuvieron que acudir a fabricantes y proveedores diferentes para adquirir los equipos específicos, lo cual les implicó realizar más

trabajo y mayores costos. A manera de ejemplo, se mencionan los fabricantes de módulos de radio tradicionales como Huawei, Ericsson o Nokia y para los sistemas de antenas a Katrein, Commscope, entre otros.

### Figura 6

#### Configuración de Sistema de Telefonía Móvil



*Nota.* La gráfica ilustra la configuración de un sistema amplio de telefonía móvil. Elaboración propia.

Esta situación se hizo más expedita con la llegada del estándar 5G New Radio (NR), teniendo en cuenta que el Módulo de Cabeza de Radio Remota (RRH) y el sistema radiante de antenas están ensamblados dentro de una misma unidad logrando que el conjunto funcione perfectamente. Por tal razón, la adquisición de equipos Radio Banda Base (BBU) y antenas se hacen a un mismo fabricante y proveedor (Gómez Liberal, 2021).

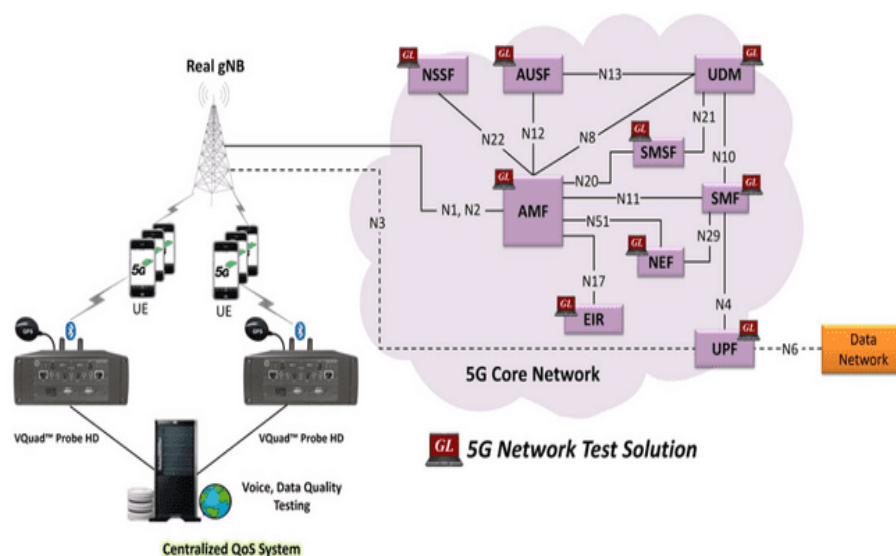
### Núcleo (Core) de una red 5G-NR

El core de una red de telefonía móvil 5G New Radio (5G NR), es el componente central de la red, encargado de administrar y controlar la comunicación entre los dispositivos móviles y

la infraestructura de la red. El Core 5G, es una evolución de los Core utilizados en generaciones anteriores de redes móviles, como el 3G y el 4G, sin embargo, para la nueva red 5G-NR está diseñado para admitir nuevas características y capacidades (Ver figura 7) (Navarro, 2019). El núcleo de la red 5G NR está conformado por los siguientes elementos y funciones: Como se muestra en la arquitectura de red anterior, la red 5G de extremo a extremo se compone de la red de acceso 5G (gNB), la función de gestión de acceso y movilidad (AMF), la función de servidor de autenticación (AUSF), la función de selección de segmento de red (NSSF), Gestión de datos (UDM), función de gestión de sesión (SMF), función de servicio de mensajes cortos (SMSF), registro de identidad de equipo (EIR) y función de plano de usuario (UPF) conectadas al servidor de datos o funciones de aplicación y al núcleo EPC/IMS para la interoperabilidad del sistema (GL Communications, 2022).

**Figura 7**

*Core 5G New Radio*



*Nota.* En la gráfica se muestra El core de una red de telefonía móvil 5G New Radio. Tomado de (GL Communications, 2022).

A continuación, se definen algunas de las funciones del Core 5G.

**Funciones de movilidad (AMF):** Gestionan el movimiento de los dispositivos móviles entre las diferentes celdas y redes de la red 5G NR, garantizando una conexión continua y sin interrupciones.

**Funciones de servidor de autenticación (AUSF):** Son acciones que se encargan de autenticar y autorizar a los usuarios para acceder a la red, garantizando la seguridad y la privacidad de los datos.

**Funciones de Gestión de Sesión (SMF):** Son funciones que se encargan de establecer y gestionar las conexiones de datos entre los dispositivos móviles y la red, y garantizar la calidad y seguridad de la conexión.

**Funciones de administración de política:** Definen y aplican políticas de uso de red, como la asignación de recursos y la gestión de la calidad del servicio.

En síntesis, el núcleo core de la red 5G NR es el componente central de la red de telefonía celular, que se encarga de gestionar y controlar la comunicación entre los dispositivos móviles y la infraestructura de la red, garantizando una conexión de alta calidad, segura y sin interrupciones.

### **Virtualización de Funciones de Red (NFV)**

La virtualización de funciones de red (NFV), reemplaza dispositivos de hardware que realizan diversas funciones de red, como los firewall, enrutadores y equilibradores de carga entre otros, por instancias virtualizadas ejecutadas con software. Con este procedimiento, se elimina la necesidad de invertir en equipos de hardware que generalmente son costosos y demandan procesos previos de alistamiento para su implementación. La NFV, ofrece diversas ventajas en el despliegue de la infraestructura de tecnología 5G, entre ellas, la segmentación de redes que

permite el funcionamiento de varias redes virtuales a la vez y otros desafíos tecnológicos relacionados con recursos de red, informática virtualizada y almacenamiento de datos, los cuales se configuran según los segmentos de clientes y aplicaciones.

## Estado del Arte

### Proyectos Similares de Tecnología 5G Realizados en Colombia

En esta parte se describen siete (7) proyectos desarrollados en universidades de Colombia referente a investigaciones referente al estándar 5G y aplicación del software Xirio.

#### *Estudio de Cobertura de la Tecnología 5G para las Zonas Metropolitanas de la Ciudad de Bogotá*

Trabajo realizado por el estudiante Oswaldo Pérez Jaramillo en el año 2021, para obtener el título de maestría de ingeniería de telecomunicaciones en la Universidad Nacional, el cual consistió en una investigación sobre la cobertura de la tecnología 5G en las localidades de Teusaquillo y Chapinero, haciendo uso de frecuencias de 3 GHz a 100GHz, a fin de analizar el comportamiento de las ondas milimétricas en escenarios claves de las dos (2) localidades con caracterizaciones diferentes, como el caso de la Localidad de Teusaquillo cuyo escenario A ubicado en la Universidad Nacional de Colombia, no contaba con línea de vista directa con la estación base para efectuar las simulaciones y presentar interferencias debido a la presencia de edificios de 4 a 10 pisos a su alrededor, lo cual evidenció mayor pérdida de señal de las comunicaciones, en comparación con el escenario B de la localidad de Chapinero, caracterizado por tener línea de vista directa con la estación base y edificios con altura mayor a 10 pisos; sin embargo, se evidenció una menor pérdida de señal.

En las simulaciones con el software Xirio se tuvieron en cuenta fenómenos de clima como lluvia y niebla que afectaron el comportamiento de las señales, MIMO Masivo y software de simulación Red Mobile, ICS Telecom y MATLAB (Pérez Murillo, 2021).

## ***Software Xirio. Herramienta para la Planeación de Redes de Comunicaciones Móviles***

### ***Celulares***

Investigación realizada en el año 2019 por los estudiantes Juan David Rodríguez, Juan Carlos Bautista y Lorena Sotomonte de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, la cual consistió en emplear el software Xirio para la estimar la cobertura radioeléctrica de una red móvil celular 4G, analizar los resultados obtenidos y aplicar mejoras en la configuración y procedimientos de la herramienta Xirio, con el fin de establecer ventajas comparativas con otros tipos de herramientas de planificación de coberturas de redes de comunicaciones. El desarrollo del proyecto incluyó la implementación de los modelos de propagación Okumura-Hata y WalfischBertoni, para la optimización de una red celular 4G en la frecuencia de 2.600 MHz, enfocada a analizar la viabilidad económica y factibilidad de aplicación en otros tipos de redes de futuros proyectos similares. El proyecto se ejecutó en una primera etapa, simulando el montaje de tres (3) estaciones: San Marcos, María del Lago y Minuto de la ciudad de Bogotá.

La segunda etapa se realizó en la Comuna 5 de la ciudad de Ibagué con el diseño y simulación de una red móvil 2G.

Como conclusión del proyecto se estableció la gran utilidad del software Xirio, en la simulación del comportamiento real de una red de telecomunicaciones, la planeación de la cobertura radioeléctrica, la estimación y configuración de quipos y antenas de las estaciones base (David Rodríguez et al, 2019).

### ***Términos de Referencia para la Migración de LTE a 5G en Colombia***

Trabajo realizado en el año 2020 por el estudiante, Oscar Leonardo Quilaguy Beltrán de la Universidad Distrital, el cual consistió en una revisión documental referente a alcances y limitaciones del proceso de migración tecnológica de telecomunicaciones móviles actuales en

Colombia al nuevo estándar 5G, teniendo en cuenta migraciones de tecnologías anteriores en el país, migraciones 5G en otros países y el marco legal de Colombia.

También, la realización de una revisión sobre manejo y distribución del espectro electromagnético de las bandas de frecuencias usadas en telefonía móvil. La conclusión del trabajo fue establecer criterios y nuevos conceptos para la toma de decisiones en aspectos técnicos y normativos que deben tener en cuenta los operadores para los procesos de implementación de la tecnología 5G (Quilaguy Beltrán, 2020).

### ***Comparativo Entre la Tecnología de Redes 4G y 5G y los Beneficios de su Implementación en Colombia.***

Investigación realizada en el año 2018 por el estudiante Fabián Andrés Guevara Córdoba, de la Universidad Santiago de Cali, en la cual hace una descripción y análisis de las diferentes tecnologías de telefonía móvil desde la red 1G hasta 5G.

También, se realizó un análisis de la problemática susceptible de presentar con la implementación de esta tecnología y referente a legislación, inversión, manejo del espectro, entre otros aspectos, y los grandes beneficios sociales y económicos que traería consigo la implantación de la red 5G en Colombia (Guevara Córdoba, 2019).

### ***Estudio de Prospectiva en el Uso de la Tecnología 5G en Colombia al Año 2025***

Trabajo realizado en el año 2018 por la estudiante, Lorena Lucía Puerto Suárez, de la Universidad Santo Tomás, en la cual resalta el enorme potencial que ofrece la tecnología 5G, para los consumidores e industrias nacionales y la perspectiva de mayor velocidad, siendo 30 veces mayor en comparación con las tecnologías 2G, 3G y 4G. Así mismo, las ventajas sociales y económicas que promete la implementación de la tecnología 5G en el contexto de una sociedad hiperconectada. El objetivo principal de la investigación consistió en desarrollar un estudio de la

tecnología 5G en Colombia proyectada al año 2025, sobre la capacidad de operación, el uso de la infraestructura actual y acceso a comunicaciones, aplicando metodología de prospectiva tecnológica y formulando recomendaciones asertivas y anticipadas para seleccionar el escenario más apropiado en el proceso de implementación de la tecnología 5G en Colombia (Puerto Suárez, 2017).

### ***Análisis de la Tecnología Massive Mimo para las Redes Móviles 5G en Colombia***

Investigación realizada en el año 2019 por el estudiante Juan Camilo Hurtado Cortés, de la Universidad Santo Tomás, la cual comprendió desarrollar pruebas de campo para la implementación de antenas Massive MIMO en la empresa de telefonía móvil Huawei Colombia, con el fin de analizar el rendimiento en downlink y uplink.

Así mismo, el estudio profundizó acerca del sistema MIMO masivo y su uso a nivel internacional. Como conclusión del trabajo de investigación, se evidenció el estado de rendimiento en el enlace descendente y las deficiencias presentadas en el enlace de ascendente mediante la aplicación de metodologías de carrier aggregation y 256QAM, las cuales, no cumplen con las expectativas de rendimiento en este aspecto (Hurtado Cortés, 2019).

### ***Uso del Espectro Radioeléctrico en Redes Móviles 5G***

Investigación realizada en el año 2017 por los estudiantes Nilson Álvarez Madera y Jesús Alberto Loaiza Torres de la Universidad de Sucre, en la cual realizaron una revisión de las diversas propuestas del sector de las telecomunicaciones en Colombia, con el fin de garantizar el uso eficiente del espectro radioeléctrico en la implementación de soluciones de prestación de servicios con redes móviles 5G en bandas de ondas milimétricas. Para el desarrollo de la investigación, consultaron diversas fuentes y artículos científicos referentes a temas de comunicaciones móviles. En el estudio contemplaron la identificación de nuevas frecuencias

adecuadas para el funcionamiento eficiente de las redes celulares, e igualmente la selección y configuración de equipos y dispositivos terminales como teléfonos, tabletas y otros dispositivos inalámbricos específicos que brinden un buen desempeño de trabajos a los usuarios en términos de alta velocidad y baja latencia (Álvarez Madera & Loaiza Torres, 2017).

### **Proyectos Similares Realizados en otros Países**

En este apartado se describen tres (3) proyectos desarrollados en universidades extranjeras referente a investigaciones sobre el estándar 5G y aplicación del software Xirio.

#### ***Planificación Radioeléctrica de una Red de Comunicaciones Móviles LTE en Sevilla con Xirio Online***

Investigación realizada en el año 2015 por el estudiante Ignacio Jesús Pertíñez López de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla (España), para obtener el título de Ingeniero de telecomunicaciones y correspondió al dimensionamiento y planificación radioeléctrica de un sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación, denominado LTE (Long TermEvolution). El proyecto fue desarrollado en la zona central de Sevilla, la Cartuja y un sector del distrito de la Macarena y comprendió el diseño de un conjunto de estaciones y estimación de la cobertura, probabilidad de congestión y volumen de tráfico mediante la utilización del software Xirio Online, obteniendo cálculos de cobertura, análisis de interferencia y carga de las células móviles (Pertíñez López, 2015).

#### ***Planificación de Sistemas de Radiocomunicación en la Banda de 3,5 GHz para su Utilización en Comunicaciones Móviles 5G***

Trabajo de grado realizado en el año 2018 por el estudiante Ricardo Alonso Martínez de la Escuela Técnica superior de ingeniería y sistemas de telecomunicación, para obtener el título de Sistemas de Telecomunicación.

El proyecto de investigación consistió en realizar un diseño de cobertura radioeléctrica en la banda de frecuencias de 3,5 GHz (rango 3,4-3,8 GHz) en la zona urbana de la ciudad de Madrid (España). En la primera parte se hizo un estudio de los modelos de propagación. En la segunda parte, se efectuaron simulaciones del diseño con la herramienta Xirio Online, comprobando su correcto funcionamiento en el rango propuesto de frecuencias de comunicaciones móviles. Finalmente, se contrastaron los resultados obtenidos en Matlab con los datos obtenidos con el software Xirio Online (Alonso Martínez, 2018).

***Planificación Doble Simulación de Exposición Radioeléctrica y Simulación de Cobertura 5G Mediate Software XIRIO Online en Puerto del Rosario***

Trabajo realizado en el año 2015 por el estudiante Rubén J. Fernández Santana de la Universitat Oberta de Catalunya (España), para obtener el título de Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicaciones. El proyecto de investigación consistió en efectuar el cálculo, representación y simulación de una red de telefonía móvil 5G en la banda de 3.6 a 3.8 GHz, mediante el uso de antenas MIMO. Para la estimación de la exposición radioeléctrica se aplicó la norma ITU-T K.52 (Fernández Santana, 2020).

## Marco Metodológico

El desarrollo del proyecto comprende la ejecución de cuatro (4) etapas aplicando la metodología analítica PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) (Martins, 2022), basada en indagar y buscar la verdad de los elementos, datos e información allegadas a la investigación.

### **Etapas de Planificar**

En esta etapa, se identificó la problemática referente a comunicaciones móviles en las localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la ciudad de Bogotá y se planificaron las actividades pertinentes para el logro de los resultados del proyecto.

Problema en general.

Objetivos de la investigación.

Cronograma de tareas.

Materiales y recursos.

Alcance y restricciones.

Alternativas de solución.

### **Etapas de Hacer**

En esta etapa, se realizaron las tareas planificadas en concordancia con los objetivos propuestos, a fin de establecer la factibilidad y viabilidad de implementación de una red 5G-NR en las tres (3) localidades de Bogotá. Las actividades desarrolladas fueron las siguientes:

Caracterizar los indicadores de desempeño de la red 5G-NR.

Estudiar las características y especificaciones técnicas de la red 5G-NR.

Diseñar los escenarios de prueba para las simulaciones de la red 5G-NR.

Efectuar las simulaciones con la herramienta Xirio Online para obtener la información de cobertura radioeléctrica de las localidades de Suba, Engativá y Usaquén.

Procesar y comparar la información recolectada de los procesos de simulación.

Compilar los resultados y aspectos relevantes encontrados.

### **Etapas de Verificar**

En esta etapa, se efectuaron tareas de comprobación de las simulaciones de cobertura radioeléctrica en las tres (3) localidades con la herramienta Xirio Online. Las tareas desarrolladas fueron las siguientes:

Monitorear los procesos de las simulaciones.

Realizar las modificaciones y ajustes pertinentes.

Efectuar un análisis comparativo de las simulaciones.

Comparar los resultados obtenidos con los objetivos propuestos.

### **Etapas de Actuar**

En esta etapa se desarrollaron las actividades finales del proyecto encaminadas a plantear mejoras en las comunicaciones móviles con la simulación de redes 5G NR en las tres (3) localidades de Bogotá. Estas actividades fueron las siguientes

Redactar el documento final, con evidencias del estudio técnico desarrollado y todos sus componentes.

Realizar la socialización del proyecto.

Evaluar el proyecto, formulando recomendaciones y lecciones aprendidas en futuros proyectos similares.

## Indicadores de Desempeño de una Red 5G-NR

### Indicadores de Desempeño KPI

Los KPIs (key performance indicator), se definen como indicadores importantes o claves para medir el rendimiento o desempeño en porcentaje de un proceso, el cual va asociado a una estrategia de la organización para conseguir el cumplimiento de determinados objetivos de un proyecto.

La aplicación de los KPIs permite obtener una radiografía de la situación de una actividad o proceso, con el fin de poder evaluar su rendimiento, tomar decisiones para redireccionar la estrategia, optimizar recursos, maximizar las ganancias y evitar a toda costa que se descubran los problemas en las etapas finales del proyecto, cuando ya no hay nada que hacer (Nuñez, 2022).

Entre los indicadores de desempeño más apropiados para comunicaciones móviles, se mencionan los siguientes:

Velocidad de transmisión de datos.

Llamadas caídas.

Intentos de llamadas no exitosas.

Tasa de transferencias.

Retardo en un sentido.

Los indicadores clave de desempeño KPI (Key Performance Indicator), son métricas empleadas para evaluar y medir el rendimiento, y el éxito de una red 5G-NR.

En los servicios de redes móviles, estos indicadores son una herramienta indispensable para monitorear y controlar continuamente el funcionamiento del sistema de comunicaciones en lo concerniente a factores de rendimiento, usabilidad, estabilidad, factibilidad y escalabilidad (Pérez, 2021).

## **Categorías de Indicadores KPI**

De conformidad con los estándares internacionales de la industria de las telecomunicaciones y los indicadores KPI, estos se clasifican en las siguientes categorías:

Rendimiento de la Red, mide la eficiencia y calidad de la red, incluyendo la tasa de éxito de las conexiones de datos, la tasa de desconexión y la calidad de la señal. Los KPI de rendimiento de la red incorporan la latencia de extremo a extremo, la tasa de entrega de paquetes PDR (Packet Delivery Rate), la tasa de pérdida de paquetes y la tasa de errores de transmisión.

Experiencia del Usuario, evalúa la calidad de la experiencia por parte del usuario, incluyendo la velocidad de descarga y carga, la calidad de la voz y video, y la calidad de la conexión en tiempo real. Los indicadores KPI de experiencia del usuario incluyen la velocidad de descarga y carga, la calidad de voz y video (MOS), la tasa de falla de llamadas (Call Setup Success Rate, CSSR) y la tasa de caída de llamadas.

Capacidad de la Red, establece la capacidad de la red para manejar el tráfico de datos y la demanda de los usuarios. Los indicadores KPI de capacidad de la red incluyen la capacidad de carga de la red, la tasa de éxito de la asignación de recursos, la tasa de congestión de la red y la tasa de ocupación del canal.

Fiabilidad de la Red, determina la capacidad de la red para proporcionar servicios de alta calidad y disponibilidad, cuando los usuarios los necesitan. Los indicadores KPI de fiabilidad de la red incluyen la tasa de fallas del sistema, la tasa de errores de llamadas y la tasa de disponibilidad del servicio.

Es importante resaltar que los indicadores KPI pueden variar según el operador de la red y el sitio geográfico, por tanto, cada empresa puede ajustar los indicadores de acuerdo con sus objetivos y necesidades. Sin embargo, la mayoría de los indicadores KPI están diseñados para ser

medidos de manera estándar y comparativa entre los diferentes operadores y regiones geográficas.

### **Indicadores de Rendimiento KPI**

A continuación, se describen algunos indicadores de rendimiento KPI (David González-Franco et al, 2020):

Latencia de E2E (Extremo 2 Extremo latency), hace referencia al tiempo que tarda en transferir una determinada información desde una fuente a un destino en milisegundos. Esta medida se realiza en la interfaz de comunicación, desde el instante en que la fuente emisora transmite hasta el momento en que llega con éxito al destino.

Fluctuación del retardo (Jitter), corresponde a la variación de la demora de transportación de los paquetes recibidos. En el origen, los paquetes se envían separados uniformemente en una secuencia continua. Cuando la fluctuación de retardo (jitter) excede el valor establecido, los paquetes son recibidos fuera del rango, generando problemas por descarte de los paquetes.

Tasa de bits (Bit rate), este indicador se refiere a la tasa de bits de interés mínima que debe entregarse para garantizar el requerimiento aceptable del usuario en este servicio.

Velocidad de datos pico (Peak data rate), se refiere a la velocidad de datos teórica más alta para servicio de un solo usuario, en condiciones ideales de transmisión libre de errores, en el evento de utilizarse todos los recursos de radio disponibles para la respectiva dirección de enlace.

Movilidad (Mobility), corresponde a la velocidad máxima a la que se puede conseguir un estado de calidad de servicio (QoS) y una transferencia de datos sin interrupciones entre los puntos de transmisión y recepción pertenecientes a diferentes capas de implementación.

Confiabilidad del servicio (Service reliability), hace referencia a la capacidad del servicio de comunicación para desempeñarse con eficiencia en un intervalo de tiempo dado, bajo reglas establecidas.

El grado de confiabilidad puede establecerse entre otros, como el tiempo promedio entre fallas o también, la probabilidad de ausencia de fallas dentro de un período de tiempo determinado.

### **Usos de los indicadores KPI**

Los indicadores de desempeño KPI, se aplican en los siguientes procesos:

Seguimiento y optimización del rendimiento de las redes móviles, para lograr un eficiente uso de los recursos de red instalados, y por tanto suministrar una buena calidad de funcionamiento a los suscriptores del servicio.

Detección temprana de fallas y problemas que se puedan ocasionar en las terminales de usuario y en esa circunstancia aplicar medidas correctivas inmediatas para mejorar el desempeño del servicio.

Suministro de información oportuna de las fases de planeación, lo cual es una ayuda importante para garantizar el óptimo desempeño de la red (Pérez, 2021).

### **Indicadores KPI en Redes 5G**

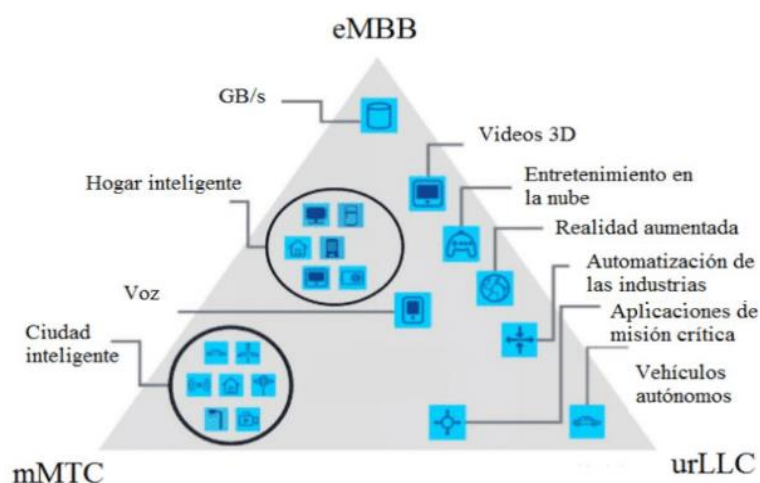
Las redes 5G, soportan una amplia gama de servicios de telecomunicaciones (Ver figura 8), los cuales son susceptibles de monitoreo mediante el uso de indicadores KPI, que describen y muestran el rendimiento de la capa de red a través de un grupo de parámetros medibles. (David González-Franco et al, 2020).

En el mundo, existen dos organizaciones importantes, encargadas de estandarizar la tecnología de comunicaciones. La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), y la 3GPP

(3rd Generation Partnership Project), las cuales definen los estándares, normas y especificaciones técnicas del ámbito de las comunicaciones y por supuesto incluyendo la estandarizan de los indicadores KPI. Es así, cómo a partir del año 2014 y con la expectativa real de la tecnología 5G, la UIT inicia un marco de trabajo en esta nueva tecnología y establece las normas técnicas para el año 2020 del estándar IMT-2020.

## Figura 8

### *Ejemplos de Servicios 5G*

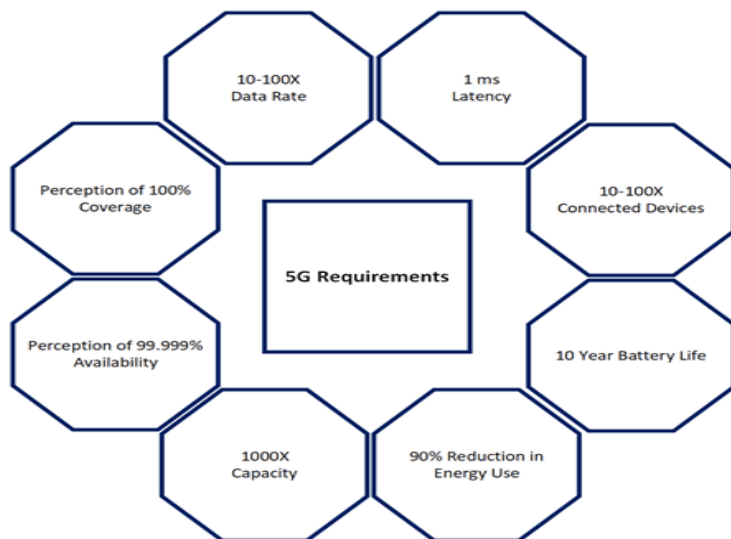


*Nota.* La gráfica muestra la gama de servicios de telecomunicaciones mediante susceptibles de monitorear con indicadores KPI. Tomado de (David Gonzalez-Franco et al, 2020).

En el año de 2015, estableció un marco de referencia con indicadores claves de desempeño (KPI) para ser aplicados en los desarrollos e implementación de la tecnología de red 5G, a fin de satisfacer la exigencia de los nuevos requerimientos tecnológicos que demanda la quinta generación de redes móviles en aspectos de redes, dispositivos y servicios. Los indicadores KPI generales del 5G establecidos por el IMT-2020, se muestran en la figura 9. (Electronics, 2020).

## Figura 9

### *Indicadores KPI Generales del 5G Establecidos por el IMT-2020*



*Nota.* En la gráfica se observa los indicadores KPI generales del 5G definidos por el estándar MT-2020. Tomado de (Electronics, 2020).

Las especificaciones del estándar IMT-2020, establecen los siguientes niveles para los indicadores KPI relacionados a la red 5G (Ver figura 10) (Barragán Martínez, 2021):

Banda ancha móvil mejorada, con velocidades de descarga de 20 Gbps y 100 Mbps en zonas urbanas, para servicios de video, servicios de realidad aumentada y realidad virtual.

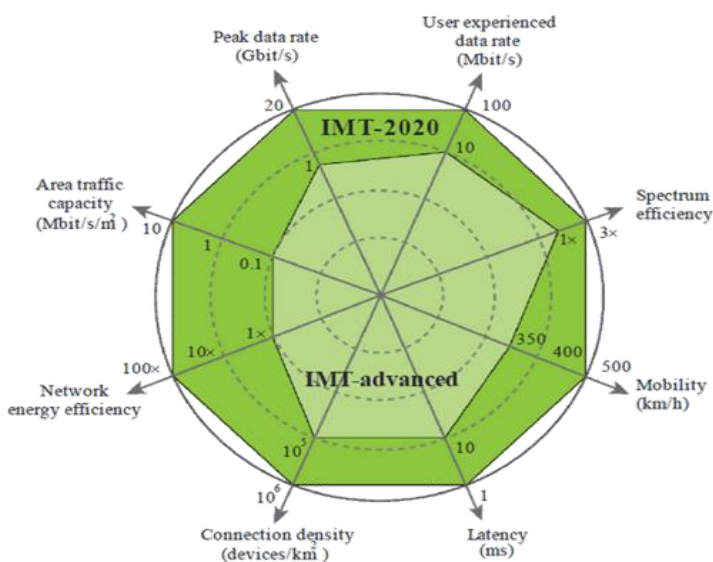
Comunicaciones ultra confiables de baja latencia, con latencias de 1 ms y alta disponibilidad, confiabilidad y seguridad para servicios de vehículos autónomos y la salud móvil.

Comunicaciones masivas tipo máquina, con capacidad de un millón de conexiones IoT por Km<sup>2</sup> que incluye larga vida de batería y amplia cobertura, fuera y dentro de edificios.

Acceso inalámbrico fijo, con velocidades de fibra óptica a hogares y negocios mediante el uso de nuevas bandas de frecuencia más amplia, MIMO masivo y tecnologías beamforming 3D, entre otros.

### Figura 10

#### Principales Características del IMT-2020



*Nota.* La gráfica muestra los niveles para los indicadores KPI referentes a la red 5G NR. Tomado de (ResearchGate, 2020).

En la estandarización de la tecnología 5G, es importante la organización 3GPP, la cual es un consorcio internacional cuyo propósito es desarrollar tecnologías inalámbricas 3G y posteriores con base en los estándares establecidos por el Sistema Global de Comunicaciones GSM. En los tres últimos años aprobó las especificaciones finales para el 5G-NR dejando atrás las antiguas redes 3G y 4G existentes (America Digital, 2021).

A continuación, se describen los indicadores KPI establecidos por el estándar 3GPP para 5G NR (Ver tabla 2).

**Tabla 2***Indicadores de Rendimiento KPI*

Indicador KPI	Traducción	Función
Latencia de E2E (Extremo2Extremo latency).	Latencia de E2E (Extremo2Extremo latency).	Mide el tiempo que tarda en transferir una determinada información desde una fuente a un destino en milisegundos: Esta medida se realiza en la interfaz de comunicación, desde el instante en que la fuente emisora transmite hasta el momento en que llega con éxito al destino.
Fluctuación del retardo (Jitter).	Fluctuación del retardo.	Variación de la demora de transportación de los paquetes recibidos. En el origen, los paquetes se envían separados uniformemente en una secuencia continua. Cuando la fluctuación de retardo (jitter) excede el valor establecido, los paquetes son recibidos fuera del rango, generando problemas por descarte de los paquetes.
Peak data rate	Velocidad de datos pico.	Velocidad de datos teórica más alta para servicio de un solo usuario, en condiciones ideales de transmisión libre de errores, en el evento de utilizarse todos los recursos de radio disponibles para la respectiva dirección de enlace.
Mobility	Movilidad.	Velocidad máxima a la que se puede conseguir un estado de calidad de servicio (QoS) y una transferencia de datos sin interrupciones entre los puntos de transmisión y recepción

Service reliability	Confiabilidad del servicio.	<p>pertencientes a diferentes capas de implementación.</p> <p>Capacidad del servicio de comunicación para desempeñarse con eficiencia en un intervalo de tiempo dado, bajo reglas establecidas. El grado de confiabilidad puede establecerse entre otros, como el tiempo promedio entre fallas o también, la probabilidad de ausencia de fallas dentro de un período de tiempo determinado.</p>
---------------------	-----------------------------	---

---

*Nota.* En la tabla se describen los indicadores de rendimiento KPI más usuales en una red 5G NR. Tomado de (Rodríguez Juan Pablo y Peña Francisco, 2018).

Finalizado este capítulo, se concluye que los indicadores de rendimiento KPI, son herramientas importantes en el despliegue y gestión de redes 5G NR, teniendo en cuenta que proporcionan una visión general del rendimiento de la red, permitiendo a los operadores identificar y solucionar problemas de manera rápida y eficiente.

## **Diseño de los Escenarios de Prueba para la Simulación de una Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá**

Un escenario de prueba para una red de telefonía móvil es un compendio de pasos y condiciones específicas que se establecen para verificar y evaluar el rendimiento de un conjunto de elementos y equipos en un entorno de simulación.

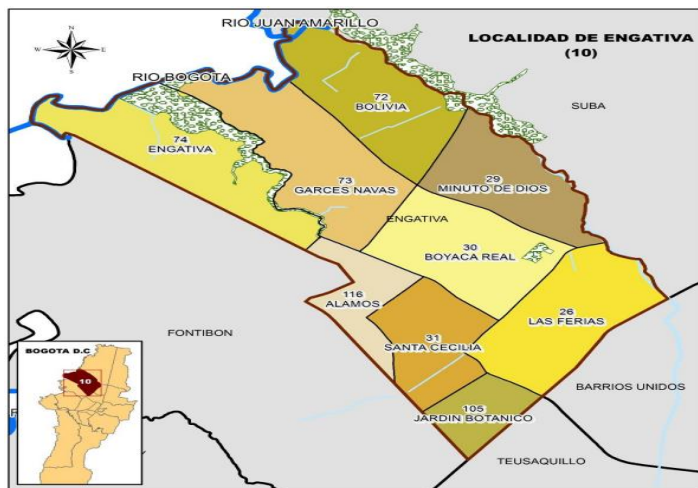
### **Áreas Geográficas de Simulación**

De acuerdo con la planificación del proyecto fueron definidos como escenarios de prueba las localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la ciudad de Bogotá para efectuar la simulación de una red 5G NR con aplicación del software Xirio Online.

#### ***Localidad de Engativá***

La Localidad de Engativá es la número 10 de la ciudad de Bogotá, se encuentra ubicada al noroccidente de la capital. Limita al norte con el río Juan Amarillo, al Oriente con la Avenida 68, al sur con la Autopista El Dorado y al occidente limita con el Río Bogotá.

Posee una población de 815.259 habitantes y una extensión geográfica plana de 3.588 hectáreas y cuenta un amplio sector económico de desarrollo empresarial, comercial y de transporte aéreo (Aeropuerto ElDorado), siendo este último un factor determinante en la alta demanda de comunicaciones móviles (Ver figura 11) (Alcaldía Bogotá, 2023).

**Figura 11***Mapa de la Localidad de Engativá*

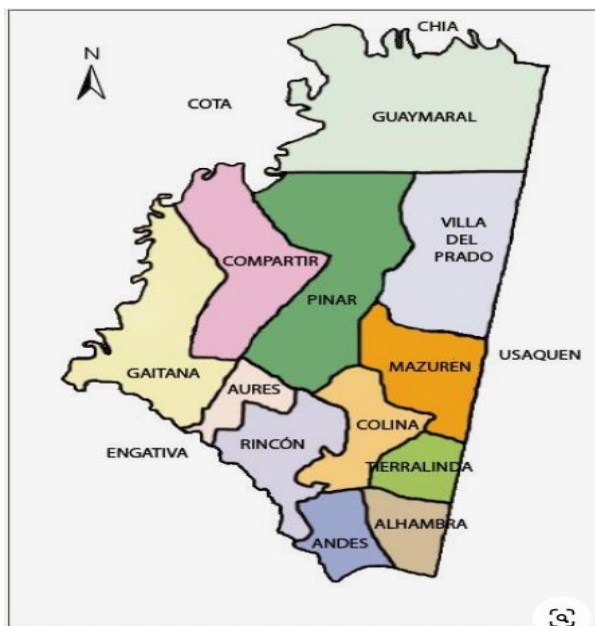
*Nota.* En la gráfica se muestra el mapa con la ubicación geográfica de la localidad de Engativá.

Tomado de (Hospital Engativá, 2014).

***Localidad de Suba***

La localidad de Suba es la localidad número 11 de la ciudad de Bogotá, se encuentra ubicada al noroccidente de la ciudad. Limita al Norte con el municipio de Chía, al Sur con la localidad de Engativá, al Oriente con la localidad de Usaquén y al Occidente con el municipio de Cota. Tiene una población de 1.252.675 habitantes y una extensión con elevaciones geográficas importantes de 10.056 hectáreas.

El sector económico lo componen un buen número de microempresas de sectores de servicios comerciales, hoteles y restaurantes, transporte, almacenamiento y comunicaciones que dinamizan su economía y demandan alto tráfico de comunicaciones móviles (Ver figura 12) (Alcaldía Bogotá, 2023).

**Figura 12***Mapa de la Localidad de Suba*

*Nota.* En la gráfica se ilustra el mapa con la ubicación geográfica de la localidad de Suba.

Tomado de (Pinterest, 2023).

***Localidad de Usaquén***

La localidad de Suba es la número 20 de la ciudad de Bogotá, se encuentra ubicada en el extremo nororiental de la ciudad. Limita al occidente, con la autopista Norte, al sur con la calle 100, al norte con los municipios de Chía y Sopo y al oriente con el municipio de La Calera.

Tiene una población de 502.000 habitantes y una extensión de 6.550 hectáreas. El sector económico está conformado por bastantes empresas de los sectores de servicios inmobiliarios, empresariales, intermediación financiera, hoteles y restaurantes que impulsan su desarrollo económico y por tanto un alto consumo de servicios de comunicaciones móviles (Ver figura 13) (Alcaldía Bogotá, 2023).

**Figura 13**

*Mapa de la Localidad de Usaquén*



*Nota.* En esta gráfica se muestra el mapa con la ubicación geográfica de la localidad de Usaquén.

Fuente: (Alcaldía local de Usaquén, 2010).

### **Bandas de Frecuencias Milimétricas para red 5G NR**

La tecnología 5G NR, técnicamente se puede desplegar en las bandas utilizadas actualmente por las generaciones 2G, 3G y 4G. Sin embargo, estas bandas actualmente están altamente ocupadas y saturadas por la mayoría de las empresas operadoras de telefonía celular, no solamente en el país sino en todo el mundo, siendo el motivo principal para que la organización 3GPP haya aprobado el uso de nuevas bandas de frecuencias destinadas a realizar pruebas de despliegues iniciales y asignación definitiva para uso de servicios de comunicaciones móviles 5G NR (New Radio).

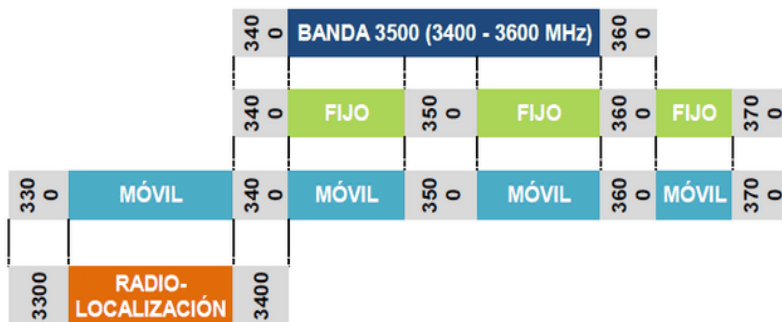
Las bandas de frecuencia definidas para 5G NR, se ubican en los siguientes dos rangos del espectro electromagnético de comunicaciones:

***Banda n78 C (3.5 GHz)***

El rango de frecuencia 1(FR1) que comprende las bandas inferiores a 6 GHz. Actualmente algunas de estas bandas son utilizadas por generaciones o estándares anteriores de telefonía móvil. “En esta banda se encuentra la canalización para enlaces punto a punto del Servicio Fijo (3400 – 4200 MHz), basada en el numeral 1 del anexo 1 de la recomendación REC UIT-R F. 635-7 de la UIT. Ahora bien, los enlaces que se encontraban operando en esta banda tenían permiso hasta el año 2017 y la mayoría no fueron renovados dejando la banda libre de enlaces microondas. De otro lado, se encuentran operando los enlaces de bajada (Banda C extendida) de algunos satélites, con permisos que se extienden hasta el año 2027. Así las cosas, la banda tiene un grado de ocupación por estos satélites que debe ser evaluado al momento de una posible implementación de 5G sobre la misma”.(MinTic, 2019). La banda 5G de 3.5 GHz, es la frecuencia más probada e implementada en muchos países del mundo para el estándar 5G NR (Ver figura 14). Su popularidad se debe al rendimiento que ofrece para operar los servicios móviles con grandes anchos de canal y las características favorables de propagación de las frecuencias altas, lo cual va muy de la mano con las tecnologías de antena complejas de 5G NR y por tanto más factibles de implementar. Según la empresa HBR Radiofrequency Technologies en informe del año 2022, hay 45 operadores en el mundo de redes móviles que utilizan actualmente la banda C (3.5 GHz) para servicios de comunicaciones móviles 5G. Entre ellos, se mencionan los siguientes: Vodafone de Nueva Zelanda, T-Mobile de Austria, Movistar de Chile, Elisa de Finlandia, Vodafone de España y Telenor de Noruega. (HBR Radiofrequency Technologies, 2022).

**Figura 14**

*Atribución Banda 3500 MHz en Colombia.*



*Nota.* En esta gráfica se muestra la distribución de frecuencias para la Banda N78 C (3.5 GHz).

Tomado de (MinTic, 2019).

### ***Banda n258 K (26 GHz)***

El rango de frecuencia 2(FR2) incluye las bandas comprendidas entre 24,25 GHz a 52,6 GHz. Estas bandas pertenecen a las ondas milimétricas, caracterizadas por tener una amplitud más corta pero un mayor ancho de banda. “Dentro de esta banda el servicio más utilizado es el Fijo, donde se despliegan enlaces punto a punto, sobre todo en zonas urbanas.

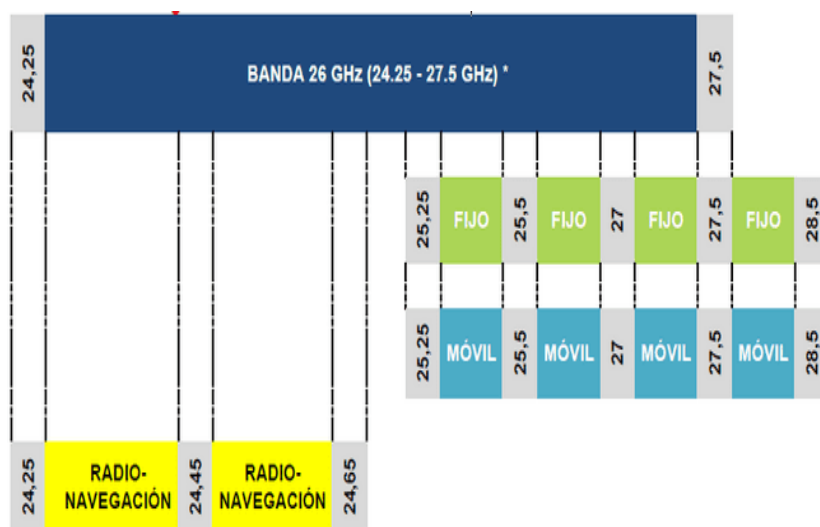
La canalización usada para el despliegue de estos enlaces se basa en el anexo 1 de la Recomendación UIT REC. UIT-R F.784- 4, ocupando la parte media de la banda desde 25.25 a 26.5 GHz (Ver figura 15). La ocupación actual de la banda, respecto a enlaces del Servicio Fijo, es baja y la Mayoría se encuentra en ciudades principales. Por otro lado, el vencimiento de los permisos varía entre el año 2023 y el 2027. Aunque la cantidad de permisos actual es baja, las solicitudes para el uso de la banda han ido aumentando durante los últimos Procesos de Selección Objetiva” (MinTic, 2019). La banda 5G mmWave de 3.5 GHz, “es una banda de frecuencia definida para la comunicación de ondas milimétricas en redes 5G NR”. El interés y la

popularidad de esta banda se fundamentan en las grandes porciones disponibles del espectro electromagnético que se encuentra infrautilizadas y que actualmente están siendo concesionados a operadores de varios países de Europa y China para la prestación de servicios 5G.

Otras ventajas que ofrece esta banda, es la excelente propagación y menor complejidad en la operación de los equipos. (Onda 5GMM, 2020). De acuerdo con la publicación de la empresa HBR Radiofrequency Technologies en informe del año 2022, únicamente hay 4 operadores en el mundo de redes móviles que utilizan actualmente la banda K (26 GHz) para servicios de comunicaciones móviles 5G. Entre ellos, se mencionan los siguientes: Telstra de Australia, Tele2 de Rusia, Telefonía Móvil Sammarinese de San Marino y SIA de Italia. (HBR Radiofrequency, 2022).

### Figura 15

#### *Atribución Banda 26 GHz en Colombia*



*Nota.* En esta gráfica se observa la distribución de frecuencias para la Banda N7258 K (26 GHz).

Tomado de (MinTic, 2019).

## **Equipos Radio RAN (Radio Acces Network) y Terminales de Usuario UE para la Banda C (3.5 GHZ)**

A continuación, se realiza una descripción y caracterización de equipos de radio RAN y terminales de usuario UE para funcionar en la banda C (3.5 GHZ, n78) ofrecidos en el mercado por los diferentes fabricantes y proveedores especializados en comunicaciones móviles del estándar 5G NR.

### ***Equipos de Radio RAN para la Banda C (3.5 GHZ n78)***

En este apartado se describen cinco (5) unidades de radio remota de última generación, para la banda C (3.5 GHz), cuyas características y especificaciones técnicas se obtuvieron de los datasheet publicados en las páginas web de los fabricantes.

**Cabezal de Radio Remota (RRH) CableFree.** La unidad RRH, es un dispositivo transceptor de radio remoto ubicado en partes exteriores, generalmente en la parte superior de una torre y se conecta a la estación base a través de una interfaz inalámbrica o eléctrica (Ver figura 16).

### **Figura 16**

#### ***Station Remote Radio Unit (RRH)***



*Nota.* En la imagen se muestra una Unidad de Estación Remota de Radio RRH para telefonía móvil 5G NR en la banda K (3.5 GHz). Tomado de (CableFree, 2020).

**Tabla 3***Características Técnicas de Station Remote Radio Unit (RRH)*

Ítem	Especificación
Equipo - Fabricante	Unidad de Radio Remota (RRU, RRH) - CableFree
Sistema técnico	N/A
Banda	N77, N78, N79
Frecuencia	400 MHz hasta 6000 MHz.
Max. Ancho de banda	N/A
Antena	Array de 2×2, 4×4 MIMO y 8×8 opcional.
Polarización	Vertical
TX Potencia	N/A
Sensitividad	N/A
Modo Duplex	FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex).
Modulación	N/A

*Nota.* En la tabla se describen las especificaciones de la una Estación Remota de Radio RRH.

Tomado de (CableFree, 2020).

**Unidad de Radio Remota Exterior (RRU) Malin NR-2520 Nybsys.** Estación base 5G NR integrada para exteriores, de fácil configuración y soporta alto tráfico pico NR 6 + Wifi 6. (Nybsys, 2023). (Ver figura 17). En la tabla se exponen las principales especificaciones técnicas del equipo.

**Figura 17**

*Remote Radio Units Outdoor (RRU) Malin NR-2520*



*Nota.* En la imagen se muestra una Unidad de Estación Remota exterior Malin NR-2520 para telefonía móvil 5G NR en la banda K (3.5 GHz). Tomado de (Nybsys, 2023).

**Tabla 4***Especificaciones Técnicas de Unidad de Estación Remota Exterior Malin NR-2520*

Ítem	Especificación
Equipo - Fabricante	Malin NR-2520.- NybSys
Sistema Técnico	5G NR& WiFi6
Banda	N77, N78, N79
Frecuencias	5G NR: N77/N78 (3300 MHz~3600 MHz) /N7(480MHz~5000 MHz)
Max. Ancho de banda	5G NR:100 MHz, WiFi 6:80 MHz
Antena	MIMO: 4x4
Polarización	Vertical
TX Potencia	4T4R,4*5W (N79) / 4*10W (N77/N78)
Sensitividad recepción	-93 dBm @ 5G NR 100 MHz
DatosThroughput	5G NR: DL Peak 1.5 Gbps, UL Peak 227 Mbps WiFi 6: Peak 1.2 Gbps
Modo Duplex	TDD
Modulación	N/A

*Nota.* En la tabla se muestran las características de la una Estación Remota exterior Malin NR-2520. Tomado de (Nybsys, 2023).

**Unidad de Radio Remota Indoor (RRH) MALIN NR-2320 Nybsys.** Esta unidad de radio muy armonizable con el estándar O-RAN para interiores, proporciona funciones de transmisión, recepción y procesamiento de señales de radio NR Sub-6 (Ver figura 18).

### **Figura 18**

*Remote Radio Units Indoor (RRU) Malin NR-2320*



*Nota.* En la gráfica se observa la imagen de una Unidad de Estación Remota interior Malin NR-2320 de telefonía móvil 5G NR para la banda K (3.5 GHz). Tomado de (Nybsys, 2023).

**Tabla 5***Especificaciones Técnicas de la Unidad de Estación Remota Interior Malin NR-2320*

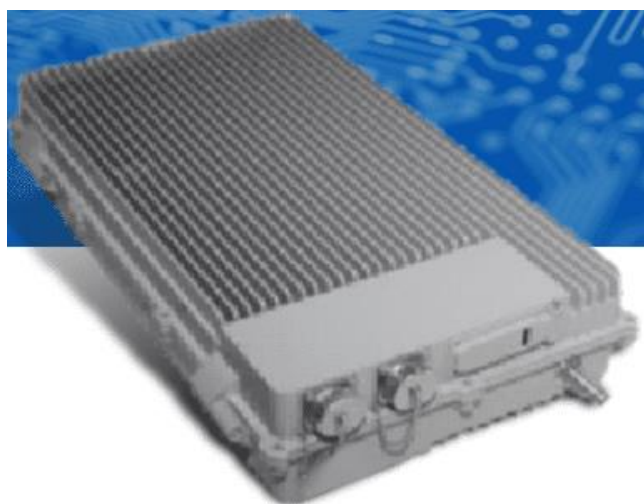
Ítem	Especificación
Equipo - Fabricante	Remote Radio Units Indoor (RRU) Malin NR-2320 - Nybsys
Sistema Técnico	3GPP TS 38.104, O-RAN Option 7-2x Category A, O-RU C/ U/M/ S plane
Bandas	n78, n79, n48
Frecuencias	3,300MHz~3,600MHz, 3,550MHz~3,800MHz 4,800MHz~4,900MHz, 4,600MHz~4,900MHz 3,550MHz~3,700MHz
Max. Ancho de banda	100 MHz
Antena	MIMO: 4T4R
Polarización	Vertical
TX Potencia	250 mW (24dBm) per channel
Sensitividad recepción	N/A
Datos Throughput	N/A
Modo Duplex	TDD
Modulación	QPSK<17.5 %, 16QAM<12.5 %, 64QAM<8.0 %, 256QAM<3.5%

*Nota.* En la tabla se describen las especificaciones técnicas de la una Estación Remota exterior Malin NR-2520. Tomado de (Nybsys, 2023).

**Unidad de Radio Remota (RRH) Outdoor 5G RRU ANKTION TECH.** La unidad 5G RRU Outdoor, es una unidad de radiofrecuencia (RF) de estación base para exteriores 5G NR. Se emplea generalmente para cobertura de escenarios de área amplia 5G al aire libre (Ver figura 19).

### **Figura 19**

*Unidad de Radio Remota RRH Exterior*



*Nota.* En la gráfica se muestra la Unidad de radio remota RRH Exterior de telefonía móvil 5G NR para la banda K (3.5 GHz). Tomado de (Anktion Tech, 2023).

***Características de la Unidad de Radio Remota RRH Exterior.*** Admite 4T4R, capacidad de procesamiento de celdas de ancho de banda de 100 MHz. La velocidad máxima de DL es de 1,7 Gbps y la velocidad máxima de UL es de hasta 400 Mbps (4T4R).

El retraso de la superficie de control no supera los 20 ms

Admite una unidad de banda base y conecta 8 unidades remotas.

Soporta la función de cascada para unidades remotas de más de 4 niveles.

Realiza la expansión y la división celulares en sistemas de banda base.

**Tabla 6***Especificaciones Técnicas de la Unidad de Radio Remota RRH Exterior*

Ítem	Especificación
Equipo - Fabricante	URR (RRH) Outdoor 5G RRU - ANKTION TECH
Sistema Técnico	3GPP R15
Bandas	N76, N77.
Frecuencias	N/A
Max. Ancho de banda	100 MHz
Antena	MIMO 4T4R
Polarización	Vertical
TX Potencia	43 dBm/puerto
Sensitividad recepción	N/A
Datos Throughput	N/A
Modo Duplex	FDD
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM

*Nota.* En esta tabla se relacionan las especificaciones técnicas de la Unidad de radio remota RRH Exterior. Tomado de (Anktion Tech, 2023).

**Unidad de Radio Remota (RRH) Indoor 5G RRU ANKTION TECH.** Esta unidad de radio de estación base interior 5G NR, realiza conversión de señales digitales o señales de frecuencia intermedia (IF) analógicas emitidas por la unidad RHUB en señales de radiofrecuencia. (Ver figura 20).

**Figura 20**

*Unidad de Radio Remota RRH Interior Indoor 5G RRU ANKTION TECH*



*Nota.* En la gráfica se observa la Unidad de radio remota RRH Interior de telefonía móvil 5G NR para la banda K (3.5 GHz). Tomado de (Anktion Tech, 2023)

***Características de la Unidad de Radio Remota 5G RRU ANKTION TECH.*** Admite múltiples celdas NR y múltiples celdas LTE.

La unidad de RF está alimentada por RHUB y admite cobertura de modo dual 4G, 5G.

La unidad de banda base y la RHUB están conectadas admitiendo transmisión eCPRI o CPRI, y la RHUB y la RRU.

Una RHUB conecta hasta 8 unidades RF y 4 conexiones RHUB en estrella o 2 conexiones en cascada.

**Tabla 7***Especificaciones de una Unidad de Radio Remota 5G RRU ANKTION TECH*

Ítem	Especificación
Equipo - Fabricante	URR (RRH) Indoor 5G RRU - ANKTION TECH
Sistema Técnico	3GPP R15
Bandas	N78
Frecuencias	2,6 GHz / 3,5 GHz (personalizado).
Max. Ancho de banda	5G NR: 5M ~ 100MHz.
Antena	MIMO 4T4R. Polarization vertical
TX Potencia	24 dBm/puerto
Sensitividad recepción	$\leq -100.8\text{dBm}@5\text{M}$ .
Modo Duplex	TDD/FDD.
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM.

*Nota.* En esta tabla se relacionan las características técnicas de la Unidad de radio remota 5G RRU ANKTION TECH Interior. Tomado de (Anktion Tech, 2023).

***Descripción de Equipos Inalámbricos de Usuario (UE) para la Banda C (3.5 GHz)***

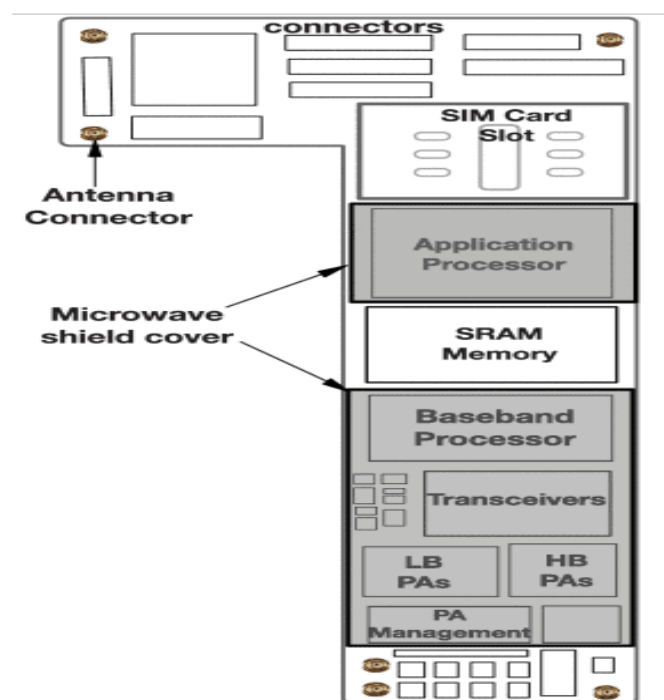
La fabricación de equipos de usuario (User Equipment UE) inalámbricos 5G, ha experimentado en los últimos años un crecimiento explosivo y una alta exigencia de calidad debido al uso de altas frecuencias milimétricas (mmWave) y la implementación de nuevos esquemas de radiofrecuencia, modulación, codificación y recepción con antenas MIMO de entrada y salida múltiples.

El institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), en publicación de julio de 2017, presentó el diseño de una placa multicapa para teléfono móvil 5G que permite incorporar el conjunto de chips necesarios para suplir las funciones, estándares y tecnologías requeridas en los equipos de usuarios 5G. El nuevo diseño contempla entre otros, los módulos (Huo et al, 2017) de Transceptor de RF celular /Wifi, Conmutación de antena, Amplificadores de potencia (PA), Módem de banda base (BB), Bluetooth, Procesador de aplicaciones (SRAM), Unidad de administración de energía, Topología de antena DPA-MIMO de 8X8 y Formación de haces (BF).

En la figura 21, se aprecia el conjunto de chips de la placa lógica principal de un teléfono inteligente 5G NR, los cuales son diseñados y fabricados por diferentes proveedores.

### Figura 21

#### *Placa Lógica Principal de un Teléfono Inteligente 5G*



*Nota.* En la gráfica se ilustra el conjunto de chips de la placa lógica principal de un teléfono inteligente 5G NR. Tomado de (Huo et al, 2017).

**Teléfono Móvil 5G Poco X4 Pro 5G.** Teléfono inteligente para conectividad 5G, con 6 GB de RAM. (Ver figura 22).

**Figura 22**

*Móvil Poco X4 Pro 5G. Xiaomi*



*Nota.* En esta gráfica se aprecia la imagen un móvil marca Poco X4 Pro 5G. Xiaomi. Tomado de (SmartPrix, 2023).

**Tabla 8***Especificaciones Técnicas del Móvil Marca Poco X4 Pro 5G*

Característica	Especificaciones
Equipo – Fabricante	5G Poco X4 Pro 5G – Xiaomi
Estándar	4G, 5G, VoLTE
Frecuencia	3.5 GHz.
Antena	Omni, polarización vertical
Ganancia estándar	10 dBi

*Nota.* En la tabla se relacionan las características técnicas del móvil marca Poco X4 Pro 5G.

Tomado de (SmartPrix, 2023).

**Teléfono Móvil 5G Motorola Edge 30.** Teléfono Motorola para conectividad 5G Sub-6, con 8 GB de RAM (Ver figura 23).

**Figura 23***Motorola Edge 30 5G*

*Nota.* En esta gráfica se muestra la imagen un móvil marca Motorola Edge 30 5G. Tomado de (Xataka, 2022).

**Tabla 9***Especificaciones Técnicas del Móvil Motorola Edge 30 5G*

Característica	Especificaciones
Equipo -Fabricante	5G Edge 30 – Motorola
Frecuencia	3.5 GHz
Estándar	5G Sub-6
Antena	Omni polarización vertical
Ganancia estándar	10dBi

*Nota.* En la tabla se describen las características del móvil Motorola Edge 30 5G. Tomado de (Xataka, 2022).

### **Equipos Radio RAN (Radio Access Network) y Terminales de Usuario (UE) para la Banda K (26 GHZ)**

A continuación, se realiza una descripción y caracterización de equipos de radio RAN y terminales de usuario UE seleccionados para funcionar en la banda K (26 GHZ, n258), ofrecidos en el mercado por los diferentes fabricantes y proveedores especializados en comunicaciones móviles del estándar 5G NR.

#### ***Equipos de Radio RAN para la Banda K (26 GHZ n258)***

En esta sección se describen dos (2) unidades de radio remota de última generación, para la banda C (26 GHz), cuyas características y especificaciones técnicas se obtuvieron de los datasheet publicados en las páginas web de los fabricantes.

**Unidad de Radio MAXCOMM 5G OUTDOOR CPE OWR-203.** La unidad MaxComm OWR-203 es un terminal inalámbrico multimodo de acceso a paquetes de alta

velocidad para banda ancha en exteriores, rápido, confiable y fácil de operar (MaxComm, 2023)

(Ver figura 24).

### Figura 24

*Terminal Inalámbrica MAXCOMM 5G OUTDOOR CPE OWR-203*



*Nota.* En la gráfica se muestra la imagen de una Terminal inalámbrica MAXCOMM 5G OUTDOOR CPE OWR-203. Tomado de (MaxComm, 2023).

**Tabla 10***Especificaciones Técnicas de la Terminal CPE OWR-203*

Ítem	Especificación
Equipo – Fabricante	5G OUTDOOR CPE OWR-203 – MAXCOMM
Sistema técnico	5G mmWave NSA/SA(*) SA(*)/5G Sub6 SA/5G Sub6 NSA 5G/LTE/DC, DC-HSPA+/HSPA+/HSPA/UMTS
Bandas	5GmmWavemmWave: N257/N258 .5G sub6: N1/N3/N5/N7/N8/N20/N28/N38/N40/N41/N77/N78/N79
Frecuencias	26 GHz
Max. Ancho de banda	100 MHz
Antena	Internal Antenna:5G/4G*5, QTM547*1.Support DL 4x4 MIMO.
Polarización	Vertical
TX Potencia	5G mmWave : 36dBm /5G Sub6: 28dBm.
Sensitividad recepción	N/A
Datos Throughput	DL: BW 400MHz, up to 4.3Gbps. 4.3Gbps(mmWave) UL: BW 200MHz, up to 2.3Gbps. 2.3Gbps(mmWave) DL: BW 100MHz, up to 2.4Gbps (Sub6G) UL: BW 100MHz, up to 0.9Gbps (Sub6G)
Modo Duplex	LTE-FDD:B1/B3/B5/B7/B8/B18/B19/B20/B28/B32.LTE -TDD:

*Nota.* En la tabla se describen las características técnicas de la terminal CPE OWR-203. Tomado de (MaxComm, 2023).

**Radio Unit WiBAS™ G5 Connect+.** Conjunto de unidad de radio con antena para estaciones terminales 5G con ubicación en exteriores. Funciona con tecnología de radio punto a multipunto (PtMP) y ofrece conectividad de acceso de banda ancha de alta calidad en frecuencias de la banda 26 GHz (Ver figura 25).

### Figura 25

*Unidad de Radio WiBAS™ G5 Connect+*



*Nota.* En la gráfica se ilustra la imagen de una Unidad de radio WiBAS™ G5 Connect+. Tomado de (Winncom Technologies Corp, 2022).

**Tabla 11***Especificaciones de la Unidad de Radio WiBAS™ G5 Connect+*

Ítem	Especificación
Equipo – Fabricante	WiBAS™ G5 Connect+ - Intracon Telecom.
Bandas	5GmmWavemmWave: N257/N258 .5G sub6: N1/N3/N5/N7/N8/N20/N28/N38/N40/N41/N77/N78/N79
Frecuencias	24.25 – 26.50, 26.50 – 28.50, 27.50 – 29.50 Ghz.
Max. Ancho de banda	40/50/75/100/(TDD) GHz
Antena	Parabolic 300 mm / 36.3 dBi at 25.5 GHz & 37.5 dBi at 28.5 GHz. Vertical horizontal Parabolic 500 mm / 39.0 dBi at 25.5 GHz & 40.0 dBi at 28.5 GHz. Vertical horizontal
TX Potencia dBm (4-QAM)	19.0(24.25–26.50GHz),14.0(26.50–28.50GHz),14.0 (27.50–29.50GHz)
Datos Throughput	700/100(1) (TDD 100 MHz), 950/670(2) (FDD 112 MHz)
Modo Duplex	TDD (4:1, DL:UL split ratio) TDD (8:1, 2:1, 1:1, 1:2, DL:UL split ratio)(3) FDD

*Nota.* En la tabla se describen las especificaciones técnicas de la Unidad de radio WiBAS™ G5 Connect+. Tomado de (Winncom Technologies Corp, 2022).

### ***Descripción de Equipos Inalámbricos de Usuario (UE) para la Banda K (26GHz)***

En esta se describen dos (2) terminales de usuario de última generación, para la banda K (26 GHz), cuyas características y especificaciones técnicas se tomaron de los datasheet publicados en las páginas web de los fabricantes.

**Teléfono Móvil Huawei 5G CPE Pro.** Móvil Huawei, diseñado con una antena Wifi en forma de X que ofrece una excelente intensidad de señal inalámbrica y con capacidad de transferir 9 modos de servicios simultáneamente (Ver figura 26).

#### **Figura 26**

*Huawei 5G CPE Pro*



*Nota.* En la gráfica se muestra la imagen un móvil Huawei 5G CPE Pro. Tomado de (Huawei, 2023).

**Tabla 12***Especificaciones del Móvil Huawei 5G CPE Pro*

Característica	Especificaciones
Equipo -Fabricante	5G CPE Pro – Huawei.
Bandas 5G	mmWave (26 – 28 GHz) y Sub 6 GHz (3,4 – 3,8 GHz)
	Comunication Estándar: 3GPP Release 15
Estándar 5G	Applicable Network: 5G/4G
	Network Mode: NSA/SA
Antena	Antenna Type: Built-in 5G/4G primary and secondary antennas
	Omni
Ganancia estándar	10 dBi
Potencia TX	125 a 250 mW. (FEMP, n.d.).

*Nota.* En la tabla se describen las características técnicas del móvil Huawei 5G CPE Pro.

Tomado de (Huawei, 2023).

**Teléfono Móvil Apple Iphone 13 A2482.** Móvil Apple, con antena incorporada 4x4 MIMO y sistema de duplexación por división de tiempo TDD que garantiza excelentes servicios de comunicación en 5G (Ver figura 27). Además, con su potente memoria interna de 128 GB ofrece amplia capacidad de almacenamiento para archivos y aplicaciones de gran tamaño sin necesidad de subirlos a la nube y de esa manera aprovechar las bondades y rendimiento de las redes 5G NR.

**Figura 27**

*Apple Iphone 13 A2482*



*Nota.* En esta gráfica se muestra la imagen un móvil Apple Iphone 13 A2482. Tomado de (Apple, 2023).

**Tabla 13***Especificaciones del Móvil Apple Iphone 13 A2482*

Característica	Especificaciones
Equipo -Fabricante	Iphone 13 A2482 – Apple
Bandas 5G	n258 (26 GHz)
Estándar 5G	FDD 5G: 2600, 2100, 1900, 1800, 900, 850, 800, 700 TDD 5G: 4700, 3700, 3500, 2600, 2500, 2300, 1700, 600
Antena	Gigabit LTE with 4x4 MIMO and LAA. Wi-Fi 6 (802.11ax) with 2x2 MIMO, Omni
Ganancia estándar	10 dBi.
Potencia TX	125 a 250 mW. (FEMP, n.d.).

*Nota.* En esta tabla se relacionan las características técnicas del móvil Apple Iphone 13 A2482.

Tomado de (Apple, 2023).

## **Simulación de la Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá**

En este capítulo se presenta el diseño de la simulación de una red de telefonía móvil 5G NR en las bandas milimétricas C (3.5 GHz) y K (26 GHz) de las tres (tres) localidades seleccionadas.

### **Diseño de la Simulación**

En este diseño del proceso de simulación, es necesario analizar las características y funcionalidades del aplicativo Xirio Online, realizar un comparativo de las especificaciones técnicas tanto de los equipos de radio remota RRH como de las terminales de usuario UE, con el fin de seleccionar las unidades remotas de radio y dispositivos móviles más adecuados para el funcionamiento en las bandas C (3.5 GHz) y K (26 GHz).

Igualmente, que reúnan las características, especificaciones técnicas y condiciones de rendimiento, eficiencia y calidad acordes con los parámetros requeridos en la descripción y configuración del software Xirio Online.

### **Comparativo de Equipos de Radio para la Banda C (3.5 GHz)**

En la tabla 14, se relacionan los datos de caracterización y especificaciones técnicas de cinco (5) equipos de radio para la banda C (3.5 GHz), cuya información técnica fue obtenida de los datasheet del fabricante.

**Tabla 14***Especificaciones Técnicas de Equipos de Radio para la Banda C (3.5 GHz)*

Equipo	Fabricante	Características	Especificaciones Técnicas
Outdoor RRU Malin NR-2520	Nybsys	<p>Unidad de radio 5G NR integrada para exteriores de fácil configuración.</p> <p>Posee alta capacidad de rendimiento de datos en todo el sistema.</p> <p>Permite alta convergencia de transmisión de 5G NR y Wifi6.</p> <p>Configuración versátil en Xirio Online.</p> <p>Experiencia integrada con Silicon Valley en diseño de soluciones 5G.</p>	<p>Banda: N78. 3300 MHz~3600 MHz.</p> <p>Max. BW 5G NR:100 MHz.</p> <p>Antena MIMO 4T4R con polarización vertical.</p> <p>Potencia transmisión: (N77/N78) 4*10W.</p> <p>Sensibilidad recepción: -93 dBm.</p> <p>Arquitectura: O-RAN 7.2.</p> <p>Duplexación: TDD.</p>
Station Remote Radio Unit RRH.	CableFree	<p>Transceptor de radio remoto ubicado en partes exteriores.</p> <p>Se conecta a estación base a través de interfaz inalámbrica o eléctrica.</p>	<p>Banda: N77, N78, N79.</p> <p>Frecuencias: 400 MHz hasta 6000 MHz.</p> <p>Antena: Array de 2x2, 4x4 MIMO y 8x8 opcional.</p>

Indoor	Nybsys	<p>Utiliza tecnología SDR (Software defined radio). Fácil actualización a nuevas funciones.</p> <p>Unidad remota de radio para espacios interiores.</p> <p>Proporciona estándar 5G.</p> <p>Funciones de transmisión, recepción y proceso de señales.</p>	<p>Duplexación: FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex).</p>
RRH			<p>Bandas: n78, n79, n48.</p> <p>Frecuencias: 3,300~3,600 MHz, 3,550~3,800 MHz. N78.</p>
MALIN			<p>Ancho de Banda: 100 MHz.</p>
NR-2320			<p>Antena: MIMO: 4T4R. Vertical.</p> <p>Duplexación: FDD.</p>
RRH	Anktion	<p>Unidad remota de radiofrecuencia.</p> <p>Diseñada para exteriores con tecnología 5G NR.</p> <p>Se emplea en escenarios de área amplia.</p> <p>Ofrece baja pérdida de propagación, amplia cobertura y alta penetración de señal.</p> <p>Bajos costos de red.</p>	<p>Bandas: N76, N77.</p> <p>Ancho de banda: 100 MHz.</p> <p>Antena: MIMO 4T4R vertical.</p> <p>Potencia TX: 43 dBm.</p> <p>Duplexación: FDD.</p>
Outdoor 5G	Tech		
RRU			

RRH)	Anktion	Unidad de radio para espacios interiores.	Sistema: 3GPP R15. Banda: n78.
		Realiza conversión de señales digitales y análogas a señales de radiofrecuencia 5G.	Frecuencias: 2,6 GHz /3,5 GHz. Ancho de banda: 5M ~ 100MHz.
Indoor 5G	Tech	Admite coberturas de modo 5G NR y también con el estándar con 4G.	Antena: MIMO 4x4. Vertical. Potencia: 24 dBm/puerto. Duplexación: TDD/FDD.
RRU			

---

*Nota.* En esta tabla se muestra un comparativo de las características técnicas de equipos de radio para la banda C (3.5 GHz). Elaboración propia.

### ***Selección del Equipo de Radio para la Banda C (3.5 GHz)***

De acuerdo con el análisis comparativo de las características y especificaciones técnicas fue seleccionado el equipo de Radio Remota RRU Outdoor Malin NR-2520 del fabricante Nybsys para realizar la simulación de la cobertura radioeléctrica en las tres (3) localidades de Bogotá en la banda C (3.5 GHz), debido a que cumple con el Release 15 del proyecto 3GPP.

Este equipo opera en la banda N78, la potencia de transmisión es de 40 W, emplea una antena integrada MIMO 4x4 y opera en el estándar NSA.

De otro lado, la empresa fabricante Nybsys con sede en Silicon Valley, goza de una reconocida experiencia en la fabricación, venta y soporte de una amplia gama de productos de conectividad y soluciones de redes móviles 5G NR a operadores públicos y privados de redes celulares, con presencia tecnológica en ocho (8) países del mundo.

Esto hace que la simulación tome características de la implementación real.(Nybsys.About-us, 2023).

### ***Comparativo de Terminales de Usuario UE para la Banda C (3.5 GHz)***

En la tabla 15, se relacionan los datos de especificaciones técnicas de dos (2) equipos de terminal de usuario para la banda C (3.5 GHz), cuya información técnica fue obtenida de los datasheet del fabricante.

**Tabla 15**

#### *Especificaciones Técnicas de Equipos de Terminal de Usuario UE*

Móvil	Fabricante	Especificaciones Técnicas
		Estándar: 4G, 5G, VoLTE Frecuencia 3.5 GHz.
Móvil Poco X4 Pro 5G.	Xiaomi	Antena: Omni, polarización vertical. Ganancia: 10 dBi. Potencia Tx: 125 a 250 mW.(FEMP, n.d.). Estándar: 5G Sub-6 Frecuencia 3.5 GHz.
Móvil 5G Edge 30.	Motorola	Antena: Omni, polarización vertical. Ganancia: 10 dBi. Potencia Tx: 125 a 250 mW.(FEMP, n.d.).

*Nota.* En la tabla se realiza un comparativo de las características técnica de los equipos de terminal de usuario UE para la Banda C (3.5 GHz).Elaboración propia.

### ***Selección del Móvil Terminal de Usuario UE para la Banda C (3.5 GHz)***

De acuerdo con el análisis comparativo de las especificaciones técnicas registradas en la tabla anterior, ambos equipos de terminal de usuario UE cumplen con las características técnicas

de los reléase 15 y 16 del proyecto 3GPP para realizar la simulación de la cobertura radioeléctrica en las tres (3) localidades de Bogotá en la banda C (3.5 GHz).

Sin embargo, fue elegido el terminal de usuario Móvil Poco X4 Pro 5G del fabricante Xiaomi, para simular sus características técnicas en Xirio.

### **Comparativo de Equipos de Radio para la Banda K (26 GHz)**

Debido a que comercialmente la banda K, el despliegue ha sido más lento en el mundo, no se encuentran muchos equipos de radio disponibles en el mercado.

En la tabla 16, se relacionan los datos de caracterización y especificaciones técnicas de dos (2) equipos de radio para la banda K (26 GHz), cuya información técnica fue obtenida de los datasheet del fabricante.

**Tabla 16***Especificaciones Técnicas de Equipos de Radio para la Banda K (26 GHz)*

Equipo	Fabricante	Características	Especificaciones Técnicas
WiBAS™ G5 Connect+.	Intracom Telecom	Unidad de radio de nueva generación que ofrece alta capacidad, rendimiento y bajo consumo de energía.  Ideal en soluciones de banda ancha en áreas urbanas y rurales.  Interoperable con otros radios de estaciones base.  Ventaja de operación en espectro de microondas en modos FDD y TDD.	Bandas 5G mmWave: N257/N258 .5G sub6. Rango Frecuencias: 24.25 - 26.50, 26.50 - 28.50, 27.50 - 29.50 Ghz.  Ancho de Banda: 40/50/75/100 GHz  Modulación TDD. Antena: Parabolic 300 mm/36.3 dBi at 25.5 GHz & 37.5 dBi at 28.5 GHz. Potencia TX: 19.0 y 14.0 dBm.
5G OUTDOOR CPE OWR- 203.	Maxcomm	Unidad de radio inalámbrica multimodo de acceso de paquetes a alta velocidad.  Operación en sitios exteriores con banda ancha.	Estándar: 5G mmWave NSA/SA(*)SA(*)/5G Sub6 SA/5G Bandas: 5G N257/N258. Frecuencia: 26 GHz. Ancho Banda: 100 MHz.

Funcionamiento de alta calidad, confiable y fácil de operar. Antena: Interna 5G/4G, 4x4 MIMO. Vertical. Potencia Tx: 36dBm /5G Sub6: 28dBm. Duplexación: FDD, TDD.

---

*Nota.* En la tabla se observa un comparativo de las características técnicas de equipos de radio para la banda K (26 GHz). Elaboración propia.

### ***Selección del Equipo de Radio para la Banda K (26 GHz)***

Tomando como base el estudio y análisis comparativo de las características y especificaciones técnicas de la tabla anterior, fue seleccionado el equipo de Radio Remota RRU WiBAS™ G5 Connect+ del fabricante Intracom Telecom, para efectuar la simulación de la cobertura radioeléctrica en las tres (3) localidades de Bogotá, en la banda de radiofrecuencia K (26 GHz).

Se justifica la elección de este tipo de radio Remota RRU WiBAS™ G5 Connect+, partiendo del análisis realizado, del cual se concluye que este dispositivo es funcional con el estándar 5G NR y cumple con las especificaciones del Release 15 del proyecto 3GPP para la operación en la banda N258. En complemento a la justificación del equipo de radio elegido, es importante mencionar que la empresa Intracom Telecom es un proveedor global de sistemas de telecomunicaciones con innovaciones constantes en el campo de transmisión y acceso inalámbrico, soluciones de software de telecomunicaciones con operación internacional desde hace más de 40 años. (IntraconTelecom, 2023).

### ***Comparativo de Terminales de Usuario UE para la Banda K (26 GHz)***

En la tabla 17, se registran los datos de las características técnicas de dos (2) equipos de terminal de usuario para la banda K (26 GHz), cuya información técnica se obtuvo de los datasheet del fabricante.

**Tabla 17**

#### *Especificaciones Técnicas de Equipos de Terminal de Usuario UE*

Equipo	Fabricante	Especificaciones Técnicas
Iphone 13 A2482.	Apple	Estándar: 5G. Bandas: n258 (26 GHz) Antena: Gigabit LTE with 4x4 MIMO, Omni. Duplex: FDD, TDD. Ganancia: 10 dBi. Potencia Tx: 125 a 250 mW.(FEMP, n.d.).
Smartphone CPE Pro.	5G Huawei	Estándar: 5G/4G. 3GPP Release 15 Bandas: mmWave (26 – 28 GHz) y Sub 6 GHz (3,4 – 3,8 GHz). Antena: Type Omni Built-in 5G/4G. Ganancia: 10 dBi. Potencia Tx: 125 a 250 mW.(FEMP, n.d.).

*Nota.* En la tabla se ilustra un comparativo de las características técnica de los equipos de terminal de usuario UE para la Banda K (26 GHz). Elaboración Propia.

### ***Selección del Móvil Terminal de Usuario UE para la Banda K (26 GHz)***

De acuerdo con el análisis realizado en la tabla comparativa anterior, sobre las mejores características y especificaciones técnicas que deben tener los equipos de terminal de usuario UE para la simulación en la banda K (26 GHz) de la cobertura radioeléctrica en las tres (3) localidades de Bogotá, se tuvo presente que los dos (2) equipos móviles (Smartphone y Iphone)

analizados cumplen con los parámetros de funcionamiento del estándar 5G NR y con las especificaciones de los reléase 15 y 16 del proyecto 3GPP en lo pertinente a la operación en la banda de radiofrecuencia N258. Por consiguiente, se consideró apropiado seleccionar el móvil Iphone 13 A2482 del fabricante Apple.

### **Simulación en Xirio Online**

La simulación en Xirio, se refiere al proceso de poder realizar de manera rápida, económica y en tiempo real, el levantamiento simulado de la cobertura radioeléctrica de una determinada área geográfica urbana o rural, aplicando procedimientos cartográficos de alta resolución, siendo Xirio una herramienta muy útil para el presente estudio del proyecto de implementación de una red 5G NR en las localidades de Suba, Usaquén y Engativá, con el objetivo de poder establecer técnicamente la ubicación de equipos, antenas y celdas de telefonía celular, con base en las características topográficas del terreno de las tres localidades de la ciudad de Bogotá.

### ***Descripción de la Herramienta Xirio***

El software Xirio es una herramienta online de simulación de uso profesional que posee una interfaz amigable e intuitiva, la cual que permite realizar cálculos de cobertura radioeléctrica en entornos urbanos, empleando cartografía de alta resolución con ayuda del visor de Google Maps.

La herramienta permite crear modelos del terreno en 3D que recrean el relieve del terreno objeto del estudio donde se desplegarán las redes de comunicación.

La plataforma Xirio Online, cuenta con los siguientes módulos de trabajo separados:

Planningtool, es la opción de planificación de cobertura radioeléctrica que permite realizar el estudio de simulación de diferentes estándares de comunicaciones móviles. (GSM, LTE, 5G, etc.).

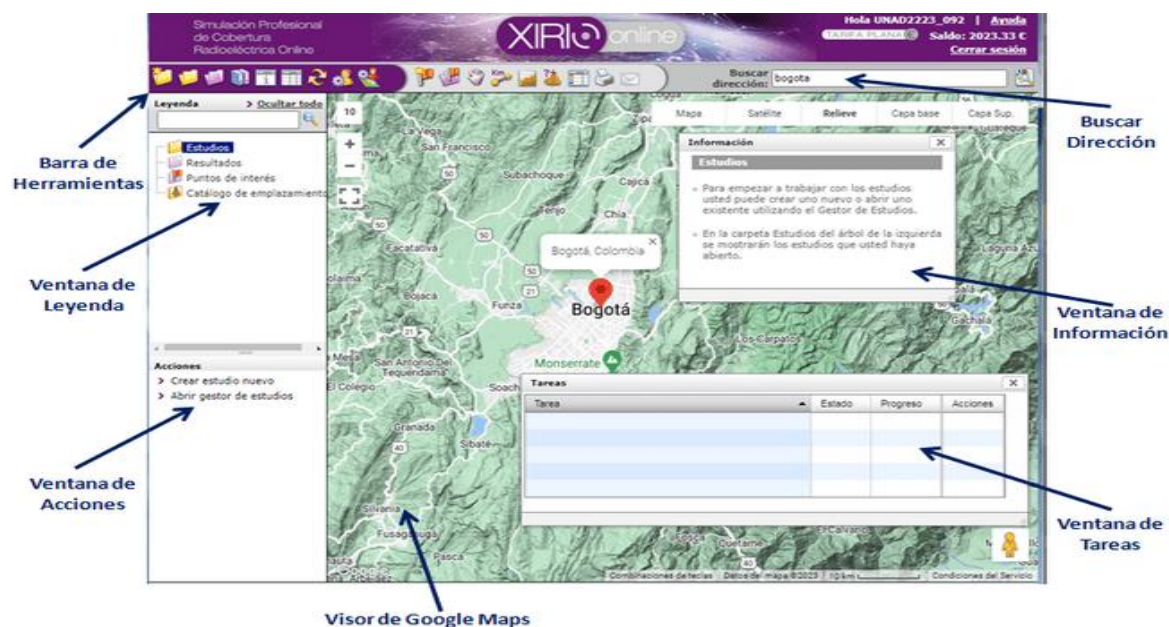
Shareplace, es una opción que permite consultar e intercambiar los resultados de los estudios de simulación realizados.

Esta plataforma, permite realizar cinco (5) clases de estudios de simulación, los cuales corresponden a: Enlace, red de transporte, cobertura y cobertura multitransmisor.

En la figura 28, se aprecian las ventanas principales para interactuar con la herramienta Xirio Online.

## Figura 28

*Ventana Principal de Xirio Online.*



*Nota.* En la gráfica se muestran las principales ventanas del software Xirio Online. Tomado de (Xirio Online. 2023).

El propósito del presente trabajo se enfoca en la simulación de la cobertura multitransmisor en las localidades de Engativá, Suba y Usaquén, desarrollando los siguientes tipos de cálculo:

Cobertura radioeléctrica que alcanza una red de estaciones.

Estadísticas de superficie y población cubierta.

Cálculo de interferencias (Relación portadora/interferencia C/I).

Cálculo de capacidad.

Visualización de medidas de ruta. (Xirio Online, 2023).

Parámetros de Configuración de la Herramienta Xirio Online

En este ítem, se especifican los parámetros de configuración del software Xirio Online requeridos en la simulación de la red 5G NR de telefonía móvil y de esa manera poder estimar la cobertura radioeléctrica de la señal del transmisor y el terminal de usuario en las tres (3) localidades anteriormente mencionadas. La parametrización es la siguiente:

### ***Creación de la Banda de Frecuencia C (3.5 GHz)***

En esta parte se crea y configura la banda de frecuencia C (3.5 MHz) requerida para la simulación de la red 5G NR, como se aprecia en la figura 29, en la cual se detallan y registran los valores de parámetros del ancho del canal, separación entre portadoras y frecuencias de tramos inferiores y superiores recomendados para la banda C (3.5 MHz), dentro del estudio de simulación y estimación de una cobertura radioeléctrica.

**Figura 29***Parámetros de Banda de Frecuencia C (3.5 GHz)*

**Propiedades de la Banda de Frecuencias**

**Banda** ★

Nombre: Banda C(3.5 GHz) 5G NR

Descripción 1: Banda C(3.5 GHz) para simulación de red 5G NR en localidad de Suba.

Descripción 2:

Color: 

---

**Parámetros de la banda**

Ancho de canal / Separación entre portadoras: 20 MHz

Ordinal del primer canal: 1

Tramo inferior:

Frecuencia inicial: 3.5 GHz

Frecuencia final: 3.6 GHz

Frecuencia primera portadora: 3.51 GHz

Tramo superior:

Frecuencia inicial: 3.6 GHz

Frecuencia final: 3.7 GHz

Frecuencia primera portadora: 3.61 GHz

*Nota.* En la gráfica se observa la configuración en Xirio Online para la banda C (3.5 GHz).

Adapta de (Xirio, 2023).

***Rango de Colores para la señal de potencia SS-RSRP. (5G NR)***

De acuerdo con la UIT, en cualquier sistema inalámbrico, ya sea LTE (Long Term Evolution), Red 5G u otro sistema de comunicación inalámbrica, el rendimiento de la señal de transmisión tiene una relación directa con las condiciones de radiofrecuencia RF. Según el estándar 3GPP, la señal RSRP se puede encontrar entre los valores -44 a -140 dBm. (CableFree.RSRP, 2020). Es de anotar que existen diferentes tablas de medidas de rendimiento RSRP, producto de experiencias de varios proveedores, entre ellas la clasificación de la figura 18, que incluye los siguientes tres (3) parámetros de medición: (CableFree Wireless Technology, 2020).

RSRP, determina la potencia recibida de la señal de referencia.

RSRQ, establece la calidad de la señal de referencia recibida.

SINR, cuantifica la relación señal a interferencia y nivel de ruido.

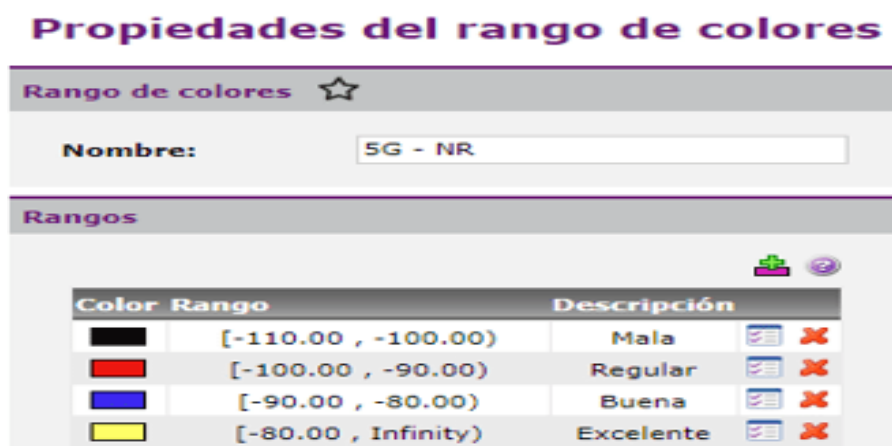
**Tabla 18**

*Parámetros de Medición de Rendimiento de la Red 5G*

RF Conditions	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Excellent	$\geq -80$	$\geq -10$	$\geq 20$
Good	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
Mid Cell	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
Cell Edge	$\leq -100$	$< -20$	$\leq 0$

*Nota.* La tabla ilustra los parámetros de medición de la señal de transmisión de sistemas inalámbricos de acuerdo con el estándar 3GPP. Tomado de (CableFree Wireless Technology, 2020).

Con base en los valores típicos de señales de la tabla 18, se definieron los niveles de potencia de señales radioeléctricas RSRP, RSRQ y SINR con rangos de colores que serán aplicados en el desarrollo de este trabajo. De esta manera se pretende cuantificar con mayor exactitud las métricas de potencia, intensidad y calidad de las señales radioeléctricas de la red 5G NR, para las áreas de cobertura radioeléctrica de las localidades de Suba, Engativá y Usaquén. En la figura 30 se observa la tabla definida para la señal RSRP.

**Figura 30***Rango de Colores 5G*

*Nota.* En la gráfica se muestra la configuración de rangos de colores para establecer la intensidad de la señal de transmisión en Xirio Online en la banda C (3.5 GHz). Tomado de (Xirio, 2023).

### ***Configuración de Parámetros del Sector, Emplazamiento y Radio***

En la figura 31, se muestra la configuración realizada en Xirio Online, con base en la caracterización de los sectores de la localidad de Suba, las coordenadas geográficas de Latitud: "04°42'27.58"N y Longitud: 074°03'49.74"W, los parámetros de la unidad de radio remota estándar del fabricante Nybsys referencia Malin NR-2520 y las especificaciones de la antena interna del transmisor de tipo MIMO 4x4.

**Figura 31***Configuración de Propiedades del Sector*

**Propiedades del sector**

Sector	
Nombre:	SUBA1 5G NR (3.5 GHz)
Estación:	<input type="text"/>
PCI:	<input type="text"/>
RSI:	<input type="text"/>
Emplazamiento	
Emplazamiento:	<input type="text"/>
Coordenadas	<input type="text"/>
Latitud:	04°42'27.58"N
Longitud:	074°03'49.74"W
Parámetros de radio	
Tipo sistema:	Estándar
Antena:	3G/4G/5G 17,5 dBi 65°
Altura antena:	10 m
Orientación:	90 °
Inclinación mecánica:	0 °
Inclinación eléctrica:	0 °

*Nota.* En esta gráfica se muestra la configuración para crear un emplazamiento en Xirio Online en la banda C (3.5 GHz). Tomado de (Xirio, 2023).

*Configuración de Parámetros de Altura del Edificio y Frecuencia de Transmisión*

En este punto, para la frecuencia de 3.510 GHz del primer canal de la banda 5G, se configuró en Xirio Online una altura de 40 metros del edificio donde será instalada la unidad de radio remota de marca Nybsys, referencia Malin NR-2520. Igualmente, se configuró para el radio transmisor una potencia de señal de transmisión Tx de 40 Watios determinada por el fabricante del equipo, la cual es equivalente a una señal RSRP (Reference Signal Received Power) de -78,195 dBm, definida por defecto en el parámetro de Xirio Online (Ver figuras 32).

**Figura 32***Configuración de Parámetros de Antena del Radio y Potencia de Transmisión*

**Referencia de alturas de antenas**

Alturas respecto a: Nivel de azotea

Usar altura de edificio: Capa de elevación (MDE)

Altura edificio: 40 m

---

**Frecuencias de transmisión**

Frecuencias	Canal
3.510 GHz	1

Polarización: Vertical

---

Feeder:

Longitud del feeder: 0 m

Pérdidas del feeder: 0.00 dB

Pérdidas pasivos: 0 dB

---

Potencia: 40 W

RSRP: -78.195 dBM

*Nota.* En la gráfica se detallan los parámetros de antena del radio y frecuencia de transmisión en Xirio Online para la banda C (3.5 GHz). Tomado de (Xirio, 2023).

*Configuración de Otros Parámetros del Estándar 5G de Xirio Online*

Para configurar esta sección de parámetros 5G de Xirio Online, se tuvo en cuenta la técnica de duplexación TDD (Time-Division Duplexing) que maneja el radio transmisor de marca Nybsys, referencia Malin NR-2520, en el proceso de enlaces downlink y uplink de banda ancha inalámbrica requeridos para redes móviles 5G NR.

Así mismo, en la configuración de slots se escogió el parámetro de combinación slot de 44(D:6/U:2/x:6), el cual no generó ningún tipo de error en Xirio Online. Los demás parámetros se dejaron por defecto en concordancia con las especificaciones del transmisor definidas por el fabricante.

Finalmente, se configuró el parámetro Stand Alone (SA) como “No Stand Alone” (NSA), teniendo en cuenta que la red 5G NR que se instalará inicialmente en Bogotá utilizará una nueva tecnología de acceso a radio junto con el núcleo (core) de la red 4G existente. (Adamowicz, 2023) (Ver figura 33).

### Figura 33

#### *Configuración de parámetros 5G*

**Parámetros 5G**

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/cobertura de toda la red 5G

**Planificador:**

Configuración de slots: 44 (D:6/U:2/X:6)

Stand alone: No Stand Alone

Umbral de agregación: 5 dB

Numerología ( $\mu$ ): 1

---

**Configuración PRACH:**

Categoría del preámbulo: Largo

Número de preámbulos PRACH: 64

Zero correlation zone: 0

Número de RS necesario: 1

---

**Configuración ICIC:**

Tipo ICIC de red: Estático

Distribución potencia por ICIC: Frequency reuse factor 1

Considerar ICIC en la estación

*Nota.* En la presente gráfica se especifican los parámetros en Xirio Online para estimar la cobertura radioeléctrica de una red 5G NR. Tomado de (Xirio, 2023).

#### *Configuración de Parámetros de Enlaces de Downlink y Uplink de la Señal*

Para los enlaces de downlink y uplink, además de los parámetros configurados por defecto del estándar 5G de Xirio online, se tuvo en cuenta para la parametrización de la antena estándar reforzada con tecnología MIMO 4x4, la cual garantiza una mayor ganancia en unidades dBi y velocidad de la señal radioeléctrica en el tráfico de información. (Ver figura 34).

**Figura 34***Configuración de Parámetros Downlink y Uplink*

Parámetros Downlink:	
Carga de tráfico:	70 %
Símbolos PDCCH:	2
Ocupación de PDCCH:	10 %
MIMO DL:	MIMO 4x4
SINR mínima para MIMO:	8.5 dB
Tipo de ganancia MIMO DL:	<input checked="" type="radio"/> Fija <input type="radio"/> Variable <input type="radio"/> Curva de eficiencia espectral
Ganancia MIMO DL:	1.48
Parámetros Uplink:	
Incremento de ruido:	3 dB
Factor de ruido:	2 dB
Alfa (control de potencia):	1
P0 (control de potencia):	-90 dBm
MIMO UL:	MIMO 4x4
Tipo de ganancia MIMO UL:	<input checked="" type="radio"/> Fija <input type="radio"/> Variable <input type="radio"/> Curva de eficiencia espectral
Ganancia MIMO UL:	1.48

*Nota.* En esta gráfica se muestran los parámetros en Xirio Online para determinar las señales downlink y uplink en una red 5G NR. Tomado de (Xirio, 2023).

*Configuración de Parámetros de Método de Cálculo y Básicos*

Para realizar el proceso de cálculo se aplicó la metodología “New York University, la cual que viene por defecto en Xirio Online y definida como método para 5G NR. Los restantes parámetros se dejaron por defecto, como se observa en la figura 35.

**Figura 35***Método de Cálculo y Parámetros Básicos*

The screenshot displays a software configuration window with two main sections: 'Extremos' and 'Parámetros de cálculo'.

**Extremos:**

- Sector:** SUBA1 5G NR (3.5 GHz)
- Parámetros del terminal:** (empty field)

**Parámetros de cálculo:**

- Método de cálculo:** Nuevo New York University
- Capas de cartografía:** (empty field)

Tipo	Nombre	Año	Res. (m)
MDT	Colombia Docente	2015	50

*Nota.* En la gráfica se muestra el parámetro para determinar las capas de cartografía en una red 5G NR. Tomado de (Xirio, 2023).

***Configuración del Equipo Terminal de Usuario UE***

Los parámetros del receptor terminal UE del fabricante Xiaomi, referencia Poco X4 Pro 5G, se configuró por defecto en Xirio Online, teniendo en cuenta que los recientes terminales de usuario UE ofrecidos en el mercado nacional e internacional, son modelos totalmente funcionales con el estándar 5G NR y cumplen con las especificaciones de los reléase 15 y 16 del proyecto 3GPP.

En ese sentido, se estableció una altura de antena de 1,5 metros, la polarización vertical y la potencia de recepción de 200 mW (23 dBm). Ver figuras 36 y 37.

**Figura 36***Parámetros del Equipo Terminal de Usuario*


**Propiedades de parámetros de recepción del terminal**

**Antena:** 3G/4G/5G 2 dBi Omni

**Altura antena:** 1.5 m

**Frecuencias de transmisión:**

Frecuencias	Canal
3.510 GHz	1

**Polarización:** Vertical

**Feeder:**

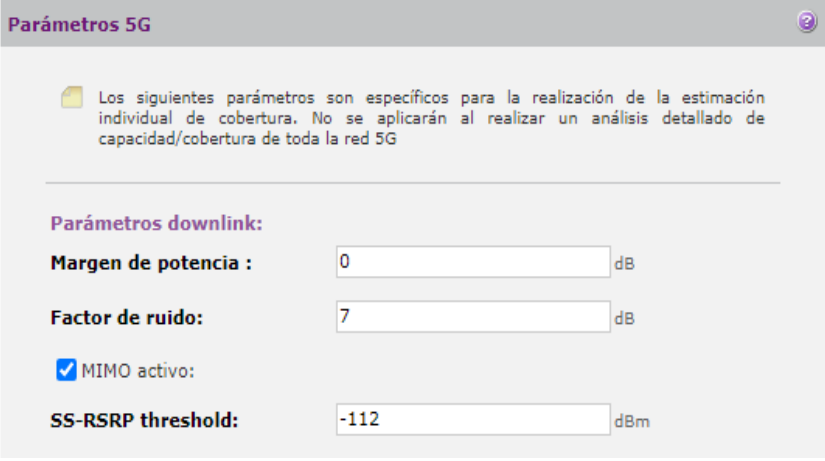
**Longitud del feeder:** 0 m

**Pérdidas del feeder:** 0.00 dB

**Pérdidas pasivos:** 3 dB

**Potencia de transmisión:** 23 dBm

*Nota.* En esta gráfica se describen los parámetros de configuración de la terminal de usuario UE en una red 5G NR. Tomado de (Xirio, 2023).

**Figura 37***Parámetros 5G del del Equipo Terminal de Usuario*


**Parámetros 5G**

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/cobertura de toda la red 5G

**Parámetros downlink:**

**Margen de potencia :** 0 dB

**Factor de ruido:** 7 dB

MIMO activo:

**SS-RSRP threshold:** -112 dBm

*Nota.* En la presente gráfica se describen los parámetros de configuración para estimar la potencia de la señal downlink en una red 5G NR. Tomado de Adaptado (Xirio, 2023).

## **Resultados y Discusión de la Simulación de la Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la Ciudad de Bogotá**

En este capítulo se configuran los parámetros necesarios en la plataforma Xirio Online correspondientes a los estudios de cobertura del equipo transmisor y cobertura multitransmisor de la señal radioeléctrica.

De igual manera, se configura la categoría de servicio móvil y subcategoría como 5G NR y también, se definen los parámetros de configuración de la terminal de usuario UE.

### **Resultados de la Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz)**

El proceso de simulación con la herramienta Xirio Online permitió obtener una serie de datos en cuadros, tablas, gráficas e informes, los cuales son insumos importantes y necesarios para efectuar análisis comparativos de cobertura, interferencia y determinar la cobertura de capacidad de la señal radioeléctrica de una red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) en las localidades Suba, Engativá y Usaquén de la ciudad de Bogotá.

### **Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) de la Localidad de Suba**

Para demarcar el área de estudio de la cobertura en la localidad de Suba, se definieron siete (7) sectores con ubicación de antenas de polarización vertical y omnidireccional.

### **Creación de Estudio de la Cobertura Multitransmisor**

En la figura 38, se muestra la ubicación de los siete (7) emplazamientos, con los cuales se pretende cubrir con eficiencia la demanda total de comunicaciones móviles de los 313.168 usuarios Indoor (25%) y 939.506 usuarios Outdoor (75%).

Figura 38

*Asignación de Usuarios para Estudio Multitransmisor*

### Propiedades del estudio de Cobertura Multitransmisor

**Estudio**

**Nombre:**

**Grupo:**

**Servicio:** 5G

**Descripción:**

---

**Coberturas de red**

Resultados 1-7 de 7

	Color	Nombre	Capa	Entorno
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	SUBA 5G NR (3.5 GHz)_S		Usuarios móviles

**1** Coberturas del estudio: 7 (0 seleccionadas)

*Nota.* En la gráfica se observa la definición de coberturas multitransmisor de estudio realizados en la localidad de Suba. Tomado de (Xirio, 2023).

La cantidad de usuarios corresponde a la población residente en la localidad de Suba, que asciende a 1.252.674 personas, según Boletín de Desarrollo económico de la Alcaldía de Bogotá del año de 2019 (DEB.Suba, 2019).

## **Análisis de Simulación de la red 5G NR en la Banda de 3.5 GHz de la Localidad de Suba**

Para obtener la información total de indicadores resultantes del proceso de simulación de la cobertura de señal radioeléctrica, fue necesario realizar los cálculos y análisis de cobertura, interferencia y capacidad, los cuales se describen a continuación:

### ***Resultado de Cobertura***

El presente resultado se refiere a la señal SS-RSRP (Synchronization Signal-Reference Signal Received Power), cuyos valores se miden en dBm.

Esta señal “se define como la media lineal de la potencia de todas las contribuciones de los recursos que transportan las señales de sincronización secundaria (SS)”. (Xirio Online, 2023).

En otras palabras, es el promedio de la potencia o nivel de señal de referencia emitida por la estación base hasta el dispositivo móvil del usuario (UE).

Para hallar los valores de intensidad o potencia de la señal radioeléctrica RSRP de la localidad de Suba en la banda C (3.5 MHz) diferenciada por rangos de colores, se definieron cuarenta (40) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, los cuales se registran en las siguientes tablas 19, 20, 21 y 22:

**Tabla 19**

*Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Excelente” de señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°40'43.77"N	074°04'23.53"W	-78.00 dBm
2	"04°41'25.04"N	074°04'17.97"W	-69.90 dBm
3	"04°42'19.85"N	074°04'38.37"W	-76.50 dBm
4	"04°43'34.99"N	074°03'52.64"W	-77.50 dBm
5	"04°44'56.51"N	074°03'48.31"W	-69.70 dBm
6	"04°45'48.86"N	074°03'46.46"W	-79.10 dBm
7	"04°43'50.61"N	074°05'42.02"W	-74.40 dBm
8	"04°45'14.98"N	074°06'03.65"W	-77.60 dBm
9	"04°44'07.85"N	074°07'20.89"W	-78.20 dBm
10	"04°44'49.73"N	074°07'40.67"W	-72.30 dBm

*Nota.* En la tabla se relacionan los puntos de coordenadas correspondientes al nivel de potencia

“Excelente” de señal RSRP del estudio en la localidad de Suba. Elaboración propia.

**Tabla 20**

*Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Buena” de señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
11	"04°40'34.75"N	074°03'38.42"W	-84.20 dBm
12	"04°41'02.36"N	074°05'07.32"W	-86.30 dBm
13	"04°42'40.90"N	074°03'38.95"W	-83.60 dBm
14	"04°42'58.76"N	074°04'58.05"W	-83.30 dBm
15	"04°43'22.78"N	074°02'53.83"W	-85.60 dBm
16	"04°46'00.44"N	074°02'48.89"W	-86.90 dBm
17	"04°45'03.17"N	074°04'21.59"W	-84.70 dBm
18	"04°43'26.48"N	074°06'40.02"W	-87.50 dBm
19	"04°44'47.77"N	074°06'09.73"W	-86.60 dBm
20	"04°44'48.39"N	074°06'57.94"W	-85.30 dBm

*Nota.* En esta tabla se muestran los puntos de coordenadas correspondientes al nivel de potencia

“Buena” de señal RSRP del estudio en la localidad de Suba. Elaboración Propia.

**Tabla 21**

*Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Regular” de señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°41'18.31"N	074°05'22.63"W	-94.30 dBm
2	"04°42'23.60"N	074°03'12.85"W	-94.10 dBm
3	"04°42'35.30"N	074°05'39.31"W	-94.50 dBm
4	"04°44'34.17"N	074°03'17.79"W	-95.60 dBm
5	"04°45'24.13"N	074°04'29.44"W	-92.10 dBm
6	"04°44'23.77"N	074°05'05.28"W	-94.00 dBm
7	"04°44'34.86"N	074°06'13.88"W	-97.00 dBm
8	"04°43'41.89"N	074°06'52.81"W	-92.50 dBm
9	"04°44'57.65"N	074°06'44.16"W	-95.00 dBm
10	"04°45'13.04"N	074°07'50.29"W	-95.30 dBm

*Nota.* En la presenta tabla se relacionan los puntos de coordenadas correspondientes al nivel de potencia “Regular” de señal RSRP del estudio en la localidad de Suba. Elaboración propia.

**Tabla 22**

*Puntos de Coordenadas con Nivel de Potencia “Nula” de señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
11	"04°41'50.25"N	074°05'30.21"W	-104.10 dBm
12	"04°41'51.48"N	074°03'10.55"W	-104.40 dBm
13	"04°42'38.91"N	074°05'01.17"W	-107.00 dBm
14	"04°44'36.54"N	074°02'42.74"W	-106.80 dBm
15	"04°45'45.52"N	074°04'21.62"W	-107.20 dBm
16	"04°44'27.92"N	074°04'40.77"W	-102.30 dBm
17	"04°43'18.94"N	074°06'25.21"W	-109.00 dBm
18	"04°44'37.77"N	074°06'41.90"W	-101.90 dBm
19	"04°45'39.36"N	074°07'17.12"W	-102.40 dBm
20	"04°45'40.59"N	074°07'49.26"W	-101.90 dBm

*Nota.* En la tabla se observan los puntos de coordenadas correspondientes al nivel de potencia “Nula” de señal RSRP del estudio en la localidad de Suba. Elaboración propia.

En la figura 41, se observa la ubicación de los puntos aleatorios, seleccionados de coordenadas geográficas dentro las áreas de cobertura radioeléctrica de la señal RSRP, de acuerdo con la siguiente clasificación:

Área de color amarillo, indica una señal “Excelente”, en los puntos de coordenadas del 1 al 10 y dentro de un rango de -69,7 a -79,1 dBm.

Área de color azul, denota una señal “Buena” en los puntos de coordenadas del 11 al 20 y dentro un rango de -83,3 a -87,5 dBm.

Área de color rojo indica, una señal “Regular” en los puntos de coordenadas del 21 al 30 y dentro de un rango de -92,1 a -97 dBm.

Área de color negro, denota una señal “Nula” en los puntos de coordenadas del 31 al 40 y dentro de un rango de -101,9 a -109,0 dBm.

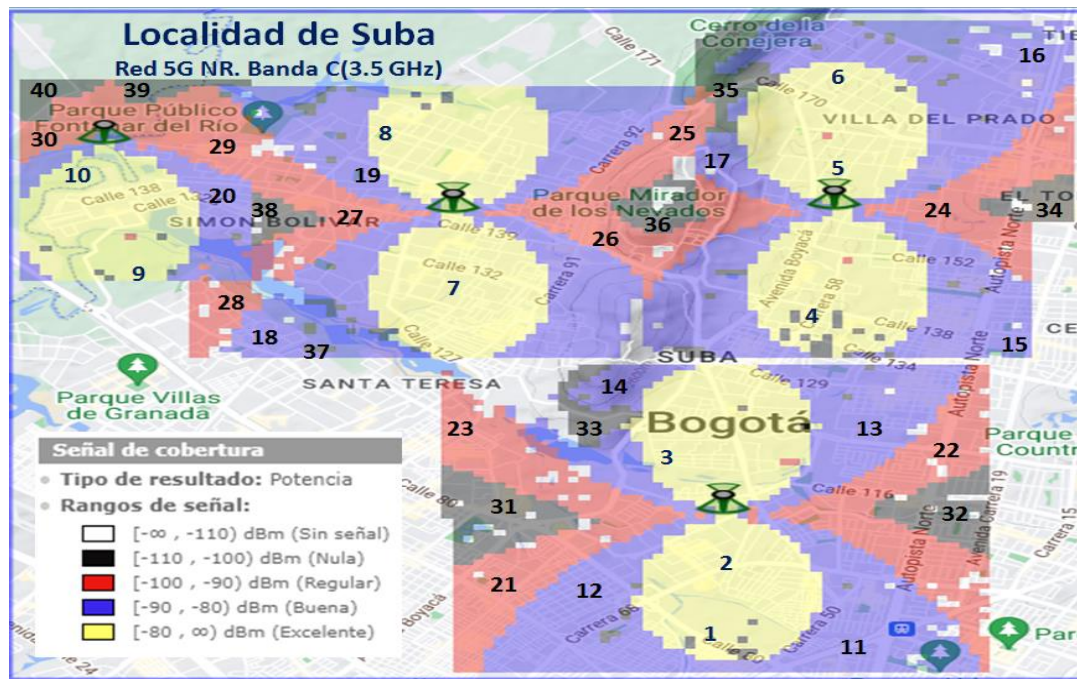
Los valores de potencia de la señal RSRP en unidades -dBm, obtenidos en el desarrollo del presente estudio y análisis, se encuentran dentro del estándar 3GPP release 15, señalado en la tabla 18 del capítulo anterior. También, en la figura 41, se muestran los siete (7) emplazamientos con el resultado de la simulación de cobertura radioeléctrica generada por Xirio Online, que indica un cubrimiento mayoritario con señales RSRP excelentes, buenas y en menor extensión con señales regulares.

Este resultado de óptimas señales se logró a la acertada planeación y ubicación estratégica de antenas y equipos RAN. Cabe señalar, además, que el nivel de potencia de recepción de las señales depende de la ubicación y cercanía de los usuarios móviles (UE) con respecto a la ubicación de la antena en cada una de las celdas.

También, se observa en la figura 39, una serie de puntos blancos y negros ubicados generalmente en los bordes de las celdas, donde la intensidad de señal RSRP es deficiente o nula, a causa de la lejanía de la antena o posiblemente por afectación de ruidos e interferencias del medio ambiente.

Figura 39

*Niveles de Intensidad de la Señal RSRP de Cobertura Radioeléctrica*



*Nota.* Señal RSRP de cobertura radioeléctrica de la red 5G NR. Adaptado de (Xirio, 2023).

### ***Resultados de Interferencia***

Estos resultados se refieren al estudio de las señales relacionadas con fenómenos de interferencia, que pueden afectar las comunicaciones de una red 5G NR.

En el análisis realizado en la localidad de Suba, se analizaron las señales RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR, que a continuación se explican con mayor detalle:

**Señal RSSI.** Esta señal RSSI (Received Signal Strength Indicator) se “define como la media de la potencia total recibida en la transmisión simultánea de múltiples flujos de datos en símbolos OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) que contienen señales de referencia”. (Xirio Online, 2023).

Es un indicador que ofrece información de la fuerza de la señal recibida teniendo en cuenta la presencia de fenómenos de interferencia y ruido térmico. Se mide en números negativos, por tanto, el valor más cercano a cero significa que hay menos interferencia y se tiene una señal de mejor calidad. (NetSpot, 2023).

Los fenómenos de interferencia y ruido en un entorno urbano son numerosos y pueden provenir de diversas fuentes ubicadas en cercanías a los equipos de radio.

Las posibles fuentes generadoras pueden ser ordenadores personales, emisoras de AM y FM, estaciones de radioaficionados, generadores de radiofrecuencia industrial, barrido de pantallas de TV, fuentes conmutadas, aparatos controlados por corriente alterna CA y otros dispositivos similares. (Enacom, 2021).

Para realizar el estudio del comportamiento de la RSSI (Received Signal Strength Indicator) en la localidad de Suba, se analizaron veinte (20) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, los cuales se registran en las siguientes tablas 23 y 24.

**Tabla 23**

*Puntos de Coordenadas con Nivel “Excelente” de Señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
1	"04°40'54.25"N	074°05'35.37"W	-70.76 dBm	Excelente
2	"04°41'07.80"N	074°04'21.22"W	-52.47 dBm	Excelente
3	"04°42'28.49"N	074°04'20.60"W	-51.27 dBm	Excelente
4	"04°42'58.67"N	074°03'22.51"W	-65.07 dBm	Excelente
5	"04°43'55.94"N	074°03'46.61"W	-52.07 dBm	Excelente
6	"04°45'51.73"N	074°02'54.08"W	-63.67 dBm	Excelente
7	"04°44'59.99"N	074°04'50.26"W	-70.06 dBm	Excelente
8	"04°43'51.02"N	074°05'43.41"W	-52.47 dBm	Excelente
9	"04°44'42.13"N	074°06'29.76"W	-74.86 dBm	Excelente
10	"04°44'31.05"N	074°07'32.17"W	52,17 dBm	Excelente

*Nota.* En la presente tabla se registran los puntos de coordenadas del nivel de potencia

“Excelente” de señal RSSI del estudio en la localidad de Suba. Elaboración propia.

**Tabla 24**

*Puntos de Coordenadas con Nivel “Buena” de Señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
11	"04°41'50.81"N	074°05'35.37"W	-81.59 dBm	Buena
12	"04°41'48.96"N	074°03'10.77"W	-80.93 dBm	Buena
13	"04°42'38.85"N	074°05'02.00"W	-84.93 dBm	Buena
14	"04°43'05.33"N	074°05'10.65"W	-88.08 dBm	Buena
15	"04°44'36.48"N	074°02'39.87"W	-85.22 dBm	Buena
16	"04°46'00.66"N	074°04'25.54"W	-86.76 dBm	Buena
17	"04°45'41.57"N	074°04'19.98"W	-84.06 dBm	Buena
18	"04°43'42.70"N	074°06'21.10"W	-85.32 dBm	Buena
19	"04°45'41.57"N	074°07'17.34"W	-81.51 dBm	Buena
20	"04°45'40.33"N	074°07'54.42"W	-81.31 dBm	Buena

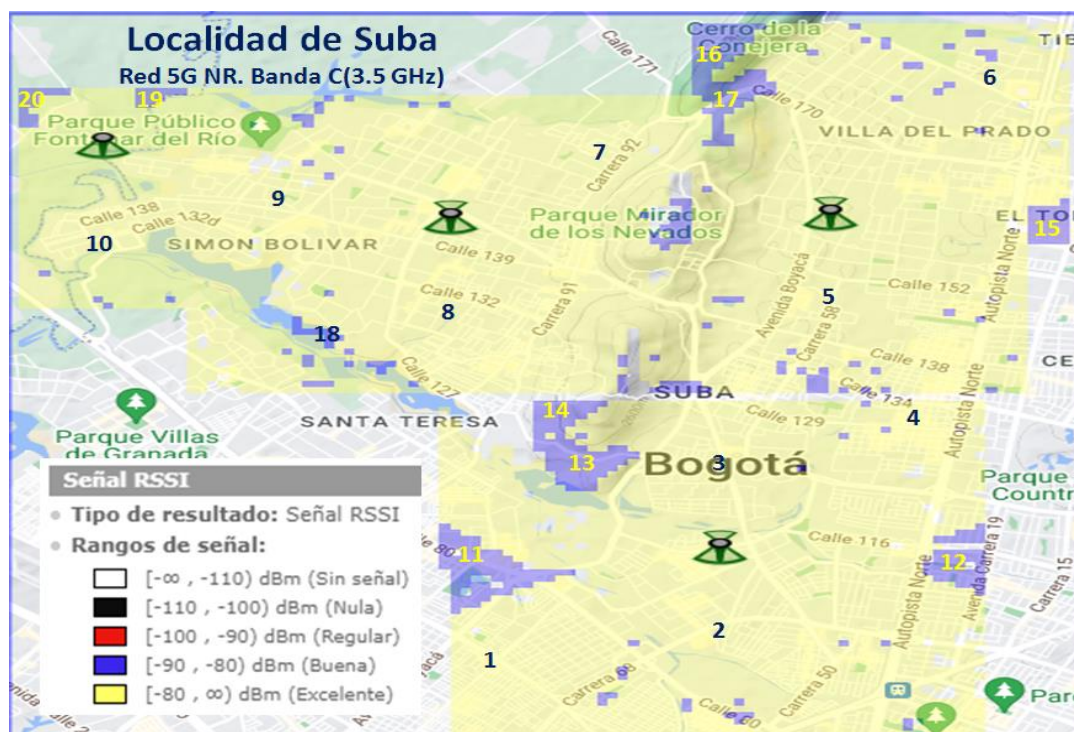
*Nota.* En esta tabla se muestran los puntos de coordenadas del nivel de potencia “Buena” de señal RSSI del estudio en la localidad de Suba. Elaboración Propia.

En la figura 40, se observan los veinte (20) puntos aleatorios de coordenadas geográficas en el plano generado con Xirio Online, cuyas ubicaciones fueron analizadas con respecto a la posición en terreno de los equipos RAN y antenas en cada emplazamiento, obteniendo como resultado que en toda el área de la localidad de Suba, se genera una cobertura de mayor extensión con señal RSSI “Excelente” en la zona de color amarillo y una cobertura “Buena” de menor extensión en la zona de color azul, correspondiente a los rangos de -51,27 a -74,86 dBm y 80,93 a -88,08 dBm respectivamente.

Por tanto, se puede concluir que este resultado favorable de señal RSSI, es producto de la adecuada definición de las coordenadas geográficas de los siete (7) emplazamientos (Equipos y antenas) y también, a las óptimas condiciones de propagación radioeléctrica presentes en el área de la localidad de Suba, lo cual evidencia una excelente y buena relación de señal a ruido que favorece la transmisión de datos de telefonía móvil en la red 5G NR.

### Figura 40

*Niveles de Potencia de la Señal RSSI*



*Nota.* En esta gráfica se observa el nivel de potencia de la señal RSSI con nivel de “Buena” de la red 5G NR. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Señal SS-RSRQ.** La señal de calidad RSRQ (Reference Signal Received Quality), indica el nivel de calidad de señal radioeléctrica de referencia recibida, cuyos valores se miden en unidades -dB.

Se interpreta como la relación:

$$\text{RSRQ} = N * \text{RSRP} / \text{RSSI} \quad (1)$$

Donde.

N = Es el número de RB's (Resource block) del ancho de banda de medida del resultado RSSI. (Xirio Online, 2023).

RSRP = (Reference Signal Received Power), promedio de la potencia o nivel de señal de referencia emitida por la estación base hasta el dispositivo móvil del usuario (UE).

RSSI = (Received Signal Strength Indicator), indicador que ofrece información de la fuerza de la señal recibida teniendo en cuenta la presencia de fenómenos de interferencia y ruido térmico. Para analizar en el presente estudio la calidad de la señal RSRQ de telefonía celular en la localidad de Suba, se escogieron diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, los cuales se registran en la siguiente tabla 25.

**Tabla 25**

*Puntos de Coordenadas con Nivel “Buena” de Señal SS-RSRQ*

#	Latitud	Longitud	SS-RSRQ
1	"04°40'42.86"N	074°05'11.89"W	-10.79 dB
2	"04°41'51.23"N	074°03'28.69"W	-12.27 dB
3	"04°42'36.19"N	074°05'41.55"W	-10.80 dB
4	"04°43'51.33"N	074°03'46.61"W	-10.79 dB
5	"04°45'29.86"N	074°03'48.46"W	-10.79 dB
6	"04°45'51.42"N	074°03'06.44"W	-10.79 dB
7	"04°45'21.24"N	074°04'53.35"W	-10.79 dB
8	"04°44'14.11"N	074°05'44.03"W	-10.79 dB
9	"04°45'09.54"N	074°06'56.95"W	-12.70 dB
10	"04°44'33.82"N	074°07'34.64"W	-10.79 dB

*Nota.* En la tabla se registran los puntos de coordenadas con nivel “Buena” de señal RSRQ del estudio efectuado en la localidad de Suba. Elaboración propia.

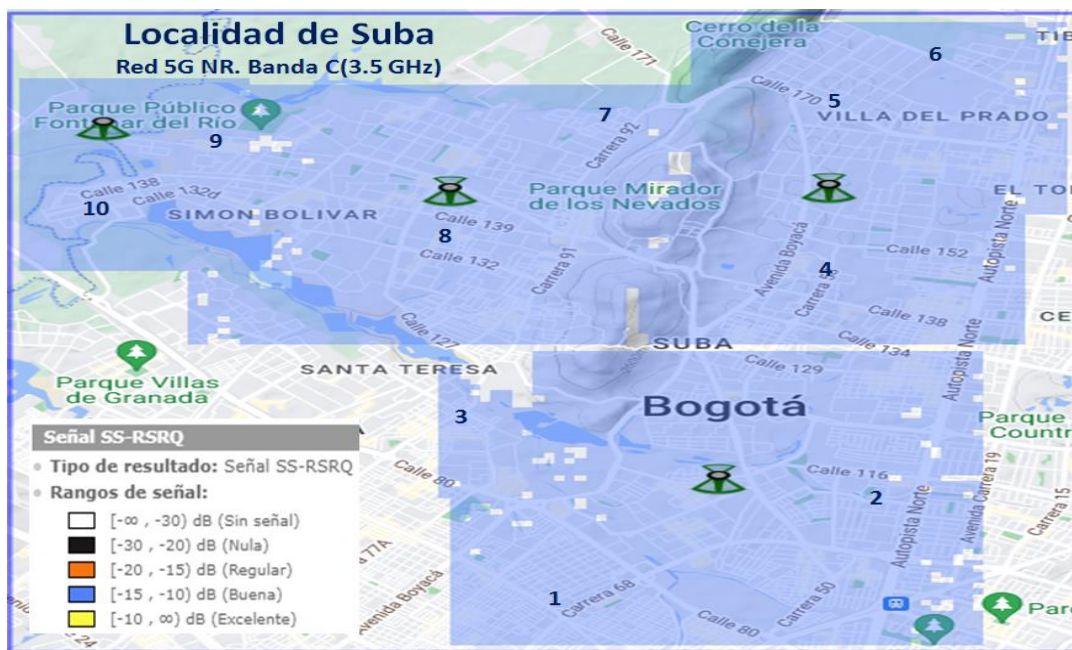
En esta parte del estudio y análisis de la señal SS-RSRQ en la localidad de Suba, se observa en la figura 41, la ubicación de los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas con señales RSRQ de nivel de “Buena” demarcada en color azul.

Con base en el comportamiento de la señal RSRQ de nivel de “Buena”, se concluye que esta señal da cobertura de buena calidad a toda el área de la localidad de Suba con valores dentro del rango de -10.79 a -12.07 dB, muy acordes con estándar 3GPP release 15, indicado en la tabla 18 del capítulo anterior. Así mismo, esta señal RSRQ caracterizada con buena calidad, obedece

al excelente rendimiento de las señales RSRP y RSSI analizadas anteriormente, lo cual ratifica el buen desempeño de la red 5G NR en el proceso de transmisión de datos de telefonía celular.

### Figura 41

*Nivel de Calidad de Señal “Buena” SS-RSRQ*



*Nota.* En la gráfica se aprecia la calidad de señal RSRQ con nivel de “Buena” de la red 5G NR.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Resultados del Enlace Downlink DL-SINR.** Las redes de telefonía móvil celular 5G NR, son susceptibles de ser afectados por diversos factores de interferencia, entre ellos señales eléctricas parásitas provenientes de otros sistemas como transmisores, equipos eléctricos y también por fenómenos atmosféricos (Humedad, nubes, lluvia, etc.) que generan “ruido” perturbando las señales de comunicaciones de telefonía móvil. Como resultado de las interferencias, se produce una señal radioeléctrica irregular que tarda más tiempo en viajar desde

el teléfono móvil a la torre celular, ocasionando llamadas interrumpidas, caídas de llamadas y otra serie de fallas en las comunicaciones.

Una de las métricas para determinar la calidad y eficiencia de la señal radioeléctrica en telefonía móvil es el término SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) que permite establecer la relación entre la potencia de señal deseada y la señal de ruido.

Los valores inferiores a cero indican una velocidad muy baja, que se traduce en mayor intensidad de ruido que señal útil recibida. Por el contrario, a mayor valor de SINR la señal es de mejor calidad. (Zyxel.Networks, 2023). En este resultado, se analiza el comportamiento del DL-SINR (Downlink-Signal to Interference & Noise Ratio), que es el enlace encargado de transportar la información recibida por el usuario a través de bloques de información del nodo gNB, ubicado en una estación base de red 5G NR.

Para minimizar los niveles de interferencia y ruido, los operadores de redes inalámbricas establecen planes de manejo adecuado de recursos, como niveles de potencia y bandas de frecuencias, con el fin de mantener una alta SINR y lograr un sistema de comunicación confiable para los usuarios. (Frackiewicz, 2023). En la tabla 26, se observa la muestra de los diez (10) puntos aleatorios tomados de la señal descendente DL-SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) de la localidad de Suba, en donde los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados en la zona de color amarillo, corresponden a sectores con una señal de nivel “Excelente” calidad y los siguientes cinco (5) puntos ubicados en la zona de color azul, pertenecen a una señal DL-SINR de nivel “Buena”.

**Tabla 26***Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°41'04.93"N	074°05'29.89"W	32.73 dB	Excelente
2	"04°42'25.62"N	074°04'21.91"W	52.73 dB	Excelente
3	"04°45'08.21"N	074°02'43.04"W	31.33 dB	Excelente
4	"04°43'54.92"N	074°05'47.20"W	51.53 dB	Excelente
5	"04°44'33.10"N	074°07'37.20"W	51.43 dB	Excelente
6	"04°41'51.74"N	074°03'10.85"W	18.99 dB	Buena
7	"04°42'41.63"N	074°04'57.76"W	19.23 dB	Buena
8	"04°44'50.96"N	074°04'21.30"W	18.25 dB	Buena
9	"04°44'30.64"N	074°06'02.64"W	18.65 dB	Buena
10	"04°45'42.70"N	074°07'17.42"W	21.73 dB	Buena

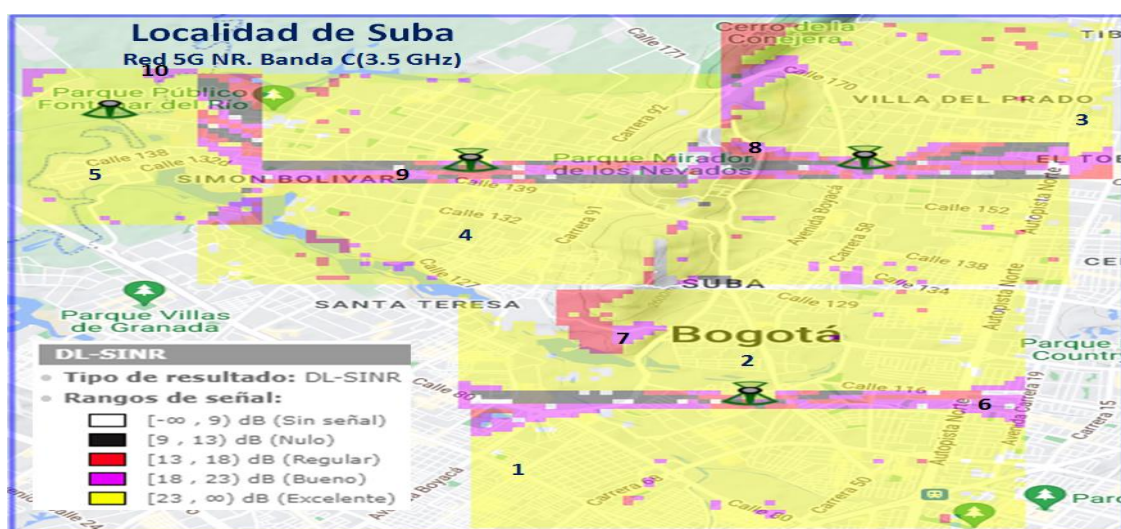
*Nota.* En esta tabla se muestran los puntos de coordenadas con niveles “Excelente” y “Buena” del enlace downlink efectuado en la localidad de Suba. Elaboración propia.

Tomando como base el parámetro de 23 dB de relación señal a ruido del estándar 3GPP Release 15, se muestra en la figura 42 la ubicación de los primeros cinco (5) posiciones aleatorias con valores superiores a 23 dB, indicando la presencia en la localidad de Suba de una señal downlink de nivel “Excelente” con bajo riesgo de ser afectada por ruidos e interferencias y generando una cobertura radioeléctrica del 95 % aprox. También, se aprecia una señal descendente de nivel “Buena” con valores inferiores a 23 dB que genera una cobertura mínima del 5% aproximadamente y que puede ser afectada por mayores niveles de interferencias y

ruidos. En la misma imagen, se distingue la presencia de algunos puntos blancos, los cuales son sectores en donde la señal DL-SINR es deficiente o totalmente nula. En conclusión, el parámetro DL-SINR analizado, asegura un eficiente proceso downlink con señales de alta frecuencia con mayor intensidad que permiten optimizar el tráfico de datos y señalización entre la estación base (BS) y el terminal de usuario (UE) de la red de telefonía celular 5G NR.

### Figura 42

*Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink DL-SINR*



*Nota.* En la gráfica se muestra el nivel de interferencia del enlace downlink con niveles de “Excelente” y “Buena” definidos en los 10 puntos de coordenadas. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Resultados del Enlace Uplink UL-SINR.** La señal UL-SINR (Uplink- Signal to Interference & Noise Ratio), hace referencia al enlace ascendente de una comunicación celular y se define como la relación entre la fuerza de la señal deseada y la presencia de ruidos e interferencias no deseados. En este sentido, los operadores de redes móviles siempre están

pendientes de la calidad de la señal, a través del monitoreo de la SINR y de esta manera poder realizar correcciones, ya sea aplicando más fuerza a la señal de transmisión o disminuyendo los factores de ruido e interferencias, con el fin de garantizar al usuario una excelente señal de comunicación celular. En la tabla 27, se registran los diez puntos aleatorios seleccionados para analizar el comportamiento de la señal downlink UL-SINR. Los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados en la zona de color amarillo, pertenecen a sectores con una señal de nivel “Excelente” calidad y los siguientes cinco (5) puntos ubicados en la zona de color azul, competen a una señal DL-SINR de nivel “Buena”.

**Tabla 27**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Uplink UL-SINR*

#	Latitud	Longitud	UL-SINR	Nivel
1	"04°41'43.12"N	074°05'22.17"W	10.39 dB	Excelente
2	"04°42'23.77"N	074°03'14.86"W	20.39 dB	Excelente
3	"04°43'22.89"N	074°05'47.50"W	23.55 dB	Excelente
4	04°45'44.54"N	074°03'16.10"W	21.15 dB	Excelente
5	"04°44'34.95"N	074°07'35.03"W	26.44 dB	Excelente
6	"04°42'31.78"N	074°05'11.04"W	2.89 dB	Buena
7	"04°42'58.87"N	074°05'17.84"W	2.99 dB	Buena
8	"04°43'30.28"N	074°04'51.89"W	2.79 dB	Buena
9	"04°43'51.84"N	074°06'32.62"W	2.99 dB	Buena
10	"04°40'29.83"N	074°03'22.71"W	2.59 dB	Buena

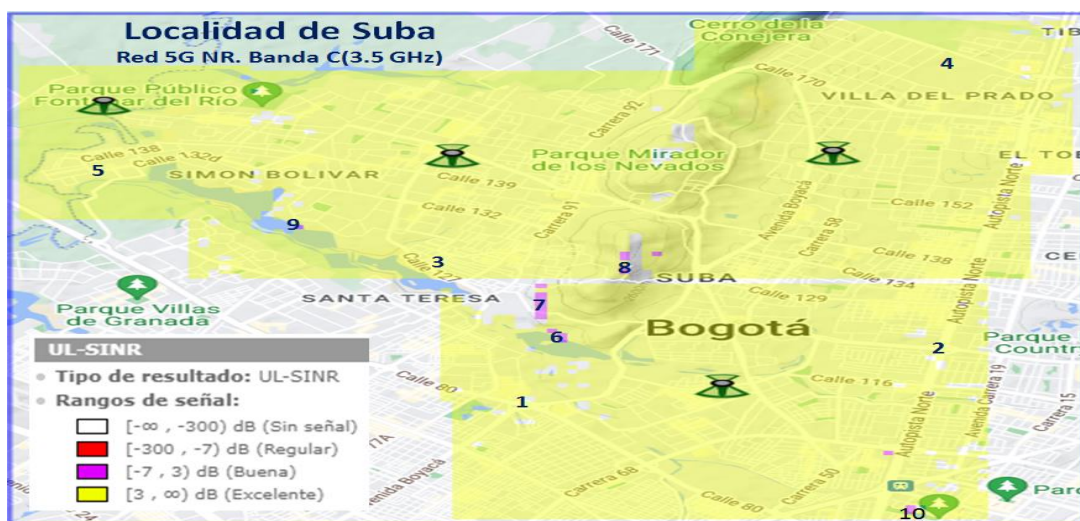
*Nota.* En esta imagen se observan los puntos de coordenadas con niveles “Excelente” y “Buena”

del enlace Uplink efectuado en la localidad de Suba. Elaboración propia.

En la figura 43, se observa la ubicación de los primeros cinco (5) posiciones aleatorias con valores superiores a 3 dB, mostrando la presencia de una señal uplink de nivel “Excelente” que cubre el 97% aprox. de la localidad de Suba y que permite la transmisión downlink de datos con baja posibilidad de afectación por ruidos e interferencias. En similares circunstancias, se aprecian los cinco (5) puntos con señales ascendentes de nivel “Buena” con valores inferiores a 3 dB, que dan un cubrimiento muy escaso del 3% y que son susceptibles de ser afectadas por interferencias del medio ambiente.

### Figura 43

*Gráfica de Interferencia de Enlace Ascendente UL-SINR*



Nota. Enlace uplink con niveles de “Excelente” y “Buena” definidos en los 10 puntos de coordenadas. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

Del análisis de la muestra de los diez puntos aleatorios de señales UL-SINR, se concluye que, en toda la extensión de la localidad de Suba, se presenta una adecuada combinación de señales de baja frecuencia uplink con niveles excelente y bueno, que ofrecen mayor penetración

de señal y por consiguiente un óptimo desempeño de señalización y transmisión de datos entre el terminal de usuario (UE) y la estación base (BS) de la red de telefonía celular 5G NR.

### ***Resultado de Capacidad***

La capacidad de una red móvil celular se refiere a la infraestructura de recursos que debe poseer la red para atender y manejar la demanda de llamadas de usuarios, el tráfico de datos y la administración de dispositivos de manera efectiva en aspectos de velocidad y calidad dentro de un área geográfica determinada.

**Informe de Throughput y Ancho de Banda.** El informe de Throughput de Xirio Online, muestra la información detallada sobre la velocidad de tráfico de datos de los transmisores instalados en cada uno de los siete (7) sectores de la localidad de Suba.

Consta de varias columnas con datos referentes a la carga de tráfico máxima estimada, en el borde y centro de las celdas en enlaces downlink y uplink, y también el número total de usuarios atendidos y dejados de atender.

En la tabla 28, se observa que la red 5G NR simulada, está en capacidad de atender en cada sector la demanda de 134.215 usuarios outdoor con una carga de tráfico del 100% y velocidades máximas de transmisión de datos de 15.078,39 kbps en enlace downlink y 2.108,87 kbps en enlace uplink, lo cual garantiza un ancho de banda y velocidades adecuados, para la prestación de servicios móviles eficientes al total de usuarios de la localidad de Suba en la banda C.

**Tabla 28**

*Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Suba 5G NR (3.5 GHz)*

Localidad	Número Usuarios	Carga Tráfico (%)	DLThP Máx. (kbps)	ULThP Máx. (kbps)	DLThP Gar. (kbps)	DLThP No Gar. (kbps)	ULThP Gar. (kbps)	ULThP No Gar. (kbps)
Suba_1	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	16.881,26	0
Suba_2	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	15.815,82	0
Suba_3	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	17.759,84	0
Suba_4	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	17.043,27	0
Suba_5	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	18.003,27	0
Suba_6	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	18.230,16	0
Suba_7	134.215	100	15.078,39	2.108,87	20.132,25	0	16.595,11	0

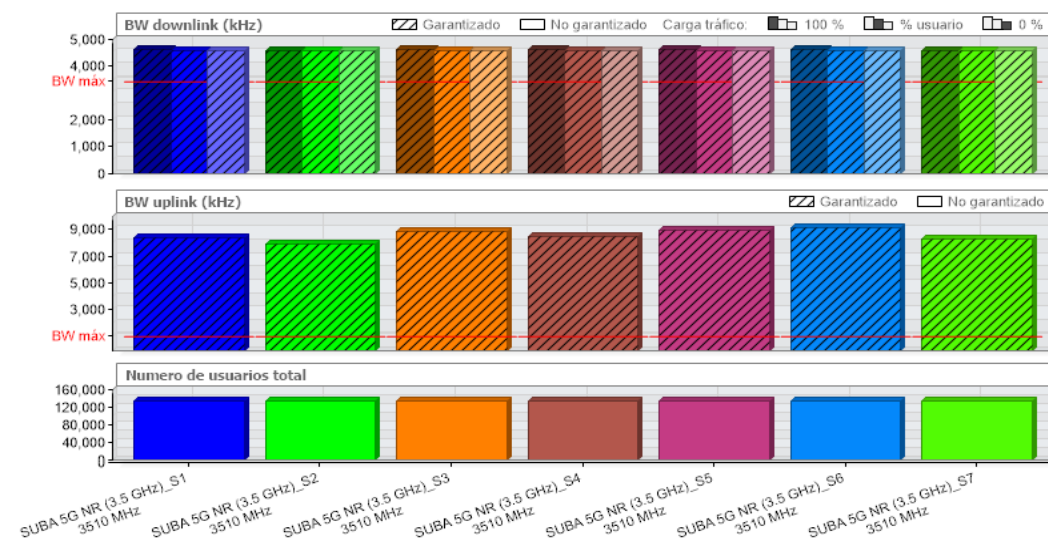
*Nota.* En la presente tabla se muestran los datos del Informe de throughput referentes a la velocidad de tráfico de datos de los transmisores definidos para la localidad de Suba. Tomado de (Xirio, 2023).

Adicionalmente, Xirio Online permite apreciar de manera gráfica el comportamiento del ancho de banda (BW) máximo downlink y uplink en los procesos de señalización y tráfico de datos entre la estación base (BS) y los terminales de usuarios (UE). En la figura 44, se puede observar que en todos los siete (7) emplazamientos de la localidad de Suba se alcanza el ancho de banda garantizado downlink de 4,59 GHz e igualmente, se obtiene el ancho de banda garantizado uplink de 8,44 GHz. Es de anotar, que el proceso downlink registra un menor ancho de banda correspondiente a la emisión de señales de la estación base (BS) hacia las terminales de usuario (UE). De la misma manera, el procedimiento uplink registra un mayor ancho de banda,

que obedece a la emisión de señales con mayor penetración por parte de los terminales de usuario (UE) con destino a las estaciones base de la red 5G NR.

### Figura 44

Gráfica de Ancho de Banda BW



*Nota.* En esta gráfica se indica el comportamiento del ancho de banda BW máximo downlink y uplink generado en la localidad de Suba. Tomado de (Xirio, 2023).

Teniendo en cuenta los valores apropiados de anchos de banda garantizado downlink y uplink obtenidos en la simulación, se concluye que la red 5G NR en la banda C (3.5 Ghz) posee la capacidad para atender con suficiencia la demanda de servicios de comunicaciones móviles de los 134.215 usuarios outdoor por sector (7 sectores ) de la localidad de Suba, con una carga de tráfico del 100% .

A continuación, se desarrollan los mismos pasos de simulación de cobertura multitransmisor, resultados de interferencia y capacidad en la banda C (3.5 MHz) de las

localidades de Engativá y Usaquéen, manteniéndose también, la misma configuración y parámetros aplicados en la simulación de la localidad de Suba.

### **Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) de la Localidad de Engativá**

En la localidad de Engativá, se definieron seis (6) sectores con ubicación de antenas de polarización vertical y omnidireccional.

Con esta configuración, se planea cubrir con eficiencia la demanda total de comunicaciones móviles de los 203.814 usuarios Indoor (25%) y 611.444 usuarios Outdoor (75%). La cantidad de usuarios corresponde a una población de 815.259 personas que habitan en la localidad de Engativá (Engativá, 2023).

### **Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 3.5 GHz de la Localidad de Engativá**

Para obtener la información total de indicadores resultantes del proceso de simulación de la cobertura de señal radioeléctrica, se efectuaron los correspondientes análisis de cobertura, interferencia y capacidad, los cuales se describen a continuación.

#### ***Resultado de Cobertura***

Para establecer los valores de intensidad o potencia de la señal radioeléctrica RSRP de la localidad de Engativá en la banda C (3.5 MHz) clasificada por rangos de colores, se definieron cuarenta (40) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, los cuales se registran en las siguientes tablas 29, 30, 31 y 32:

**Tabla 29***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°39'32.26"N	074°06'22.93"W	-77.70 dBm
2	"04°40'44.94"N	074°05'51.42"W	-76.80 dBm
3	"04°40'46.79"N	074°06'24.79"W	-78.70 dBm
4	"04°40'59.10"N	074°06'07.48"W	-77.90 dBm
5	"04°42'05.62"N	074°06'50.12"W	-77.90 dBm
6	"04°43'31.85"N	074°06'41.47"W	-75.50 dBm
7	"04°43'42.32"N	074°06'54.45"W	-78.70 dBm
8	"04°44'24.81"N	074°08'14.17"W	-77.30 dBm
9	"04°43'11.52"N	074°08'40.74"W	-77.00 dBm
10	"04°42'38.88"N	074°08'16.64"W	-79.60 dBm

*Nota.* En la tabla se muestran 10 puntos de coordenadas con sus valores de categoría “Excelente” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 30***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
11	"04°39'23.02"N	074°06'50.12"W	-87.40 dBm
12	"04°40'38.78"N	074°06'44.56"W	-87.10 dBm
13	"04°40'59.10"N	074°05'16.81"W	-88.00 dBm
14	"04°41'16.35"N	074°07'32.76"W	-88.10 dBm
15	"04°42'10.55"N	074°06'04.39"W	-83.50 dBm
16	"04°42'24.10"N	074°07'11.75"W	-84.70 dBm
17	"04°43'10.91"N	074°06'12.43"W	-87.10 dBm
18	"04°44'18.65"N	074°06'27.88"W	-82.50 dBm
19	"04°44'11.26"N	074°07'52.54"W	-84.60 dBm
20	"04°43'09.06"N	074°08'52.48"W	-83.40 dBm

*Nota.* La tabla relaciona 10 puntos de coordenadas con valores de categoría “Buena” de la señal

RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 31***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
21	"04°39'48.27"N	074°06'58.16"W	-97.30 dBm
22	"04°40'35.70"N	074°05'10.01"W	-95.60 dBm
23	"04°40'41.86"N	074°07'02.48"W	-93.50 dBm
24	"04°42'09.93"N	074°05'27.31"W	-95.00 dBm
25	"04°42'52.43"N	074°06'22.31"W	-95.60 dBm
26	"04°42'04.39"N	074°07'36.47"W	-90.90 dBm
27	"04°42'59.82"N	074°07'10.52"W	-95.50 dBm
28	"04°43'57.10"N	074°07'43.89"W	-90.50 dBm
29	"04°43'32.46"N	074°07'50.69"W	-97.40 dBm
30	"04°43'39.24"N	074°08'53.10"W	-96.60 dBm

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas con valores de categoría “Regular” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 32***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
31	"04°40'17.22"N	074°05'08.77"W	-103.60 dBm
32	"04°40'02.44"N	074°06'58.78"W	-103.80 dBm
33	"04°40'17.22"N	074°07'07.43"W	-101.70 dBm
34	"04°42'23.48"N	074°05'07.85"W	-102.60 dBm
35	"04°42'33.34"N	074°05'18.97"W	-103.00 dBm
36	"04°42'49.97"N	074°06'03.47"W	-103.70 dBm
37	"04°44'18.04"N	074°07'05.88"W	-109.10 dBm
38	"04°43'02.29"N	074°07'41.11"W	-102.70 dBm
39	"04°42'16.09"N	074°08'31.16"W	-107.00 dBm
40	"04°42'05.01"N	074°08'16.33"W	-108.40 dBm

*Nota.* En la tabla se detallan 10 puntos de coordenadas con valores de categoría “Nula” de la señal RSRP. Elaboración propia.

En la figura 45, se registra la ubicación de los puntos aleatorios, seleccionados de coordenadas geográficas dentro las áreas de cobertura radioeléctrica de la señal RSRP, de acuerdo con la siguiente clasificación:

Área de color amarillo indica una señal “Excelente”, en los puntos de coordenadas del 1 al 10 y rango de -75,5 a -79,6 dBm.

Área de color azul denota una señal “Buena”, en los puntos de coordenadas del 11 al 20 y rango de -82,5 a -88,1 dBm.

Área de color rojo indica una señal “Regular”, en los puntos de coordenadas del 21 al 30 y rango de -90,5 a -97 dBm.

Área de color negro denota una señal “Nula”, en los puntos de coordenadas del 31 al 40 y rango de -101,7 a -109,1 dBm.

La cobertura radioeléctrica con señales RSRP abarca los seis (6) emplazamientos de la localidad de Engativá, con mayor área de señales de niveles excelentes y buenos, y una menor área con señales regulares.

Este óptimo resultado es producto de la planeación y ubicación estratégica de antenas y equipos RAN en las estaciones base.

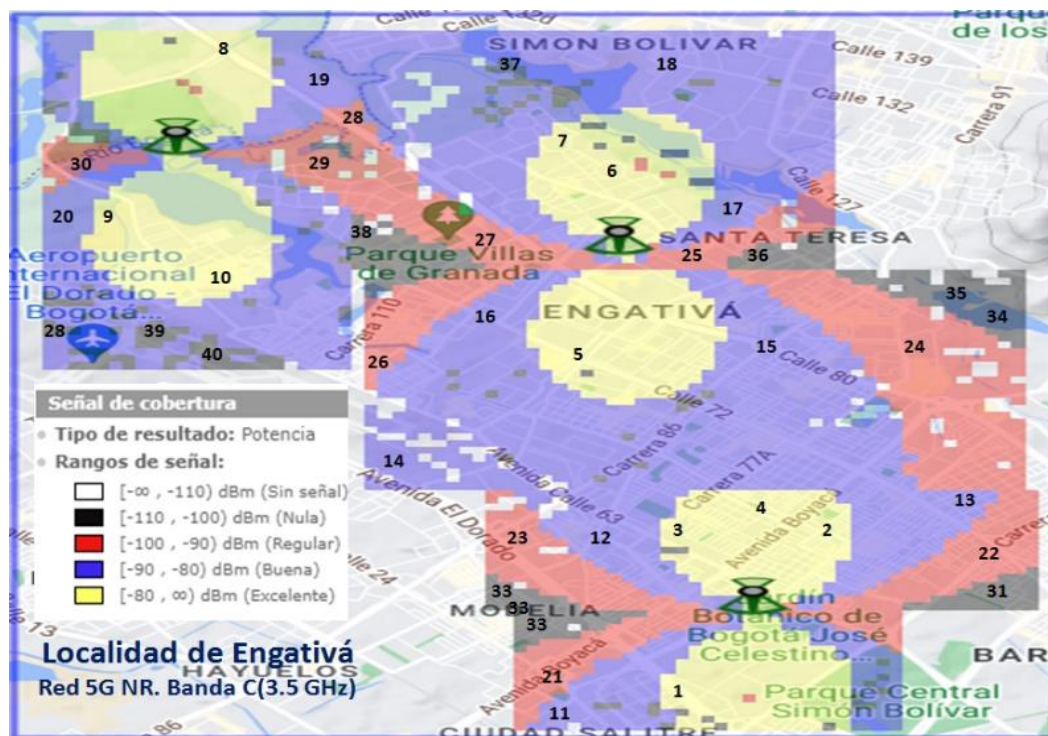
Es importante señalar, que el nivel de potencia de recepción depende de la ubicación y cercanía de los terminales de usuarios móviles (UE) con respecto al sitio de las antenas en cada una de las celdas.

En la Figura 45, también se observa una secuencia de puntos blancos y negros ubicados en los bordes de las celdas, que corresponden a señales RSRP nulas, ocasionados por lejanía de la antena o afectación de ruidos e interferencias del medio ambiente.

En conclusión, este análisis demuestra un funcionamiento eficiente de la red 5G NR en la banda C (3.5 GHz) para ofrecer servicios celulares a los 33.969 usuarios Indoor (25%) y 101.907 usuarios Outdoor (75%) de la localidad de Engativá.

**Figura 45**

*Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica*



*Nota.* En la gráfica se observa la intensidad de la señal de cobertura radioeléctrica. Adaptado de (Xirio, 2023).

### **Resultado de Interferencia**

En la localidad de Engativá, se analizó el comportamiento de las siguientes señales RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR:

**Señal RSSI.** Para efectuar el análisis de la señal RSSI (Received Signal Strength Indicator) en la localidad de Suba, se definieron veinte (20) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, los cuales se registran en las siguientes tablas 33 y 34.

**Tabla 33***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia/Interferencia de señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
1	"04°39'24.87"N	074°06'56.61"W	-67.67 dBm	Excelente
2	"04°40'30.16"N	074°05'07.85"W	-76.05 dBm	Excelente
3	"04°40'25.85"N	074°06'52.29"W	-72.36 dBm	Excelente
4	"04°41'52.07"N	074°05'15.88"W	-72.56 dBm	Excelente
5	"04°41'36.68"N	074°06'37.45"W	-59.27 dBm	Excelente
6	"04°42'30.87"N	074°07'11.44"W	-65.37 dBm	Excelente
7	"04°44'03.87"N	074°06'15.83"W	-60.47 dBm	Excelente
8	"04°43'47.86"N	074°07'09.59"W	-60.97 dBm	Excelente
9	"04°44'12.50"N	074°08'25.60"W	-52.47 dBm	Excelente
10	"04°43'08.44"N	074°08'48.47"W	-58.87 dBm	Excelente

*Nota.* La tabla relaciona 10 puntos de coordenadas de señal RSSI con valores de nivel

“Excelente” de Potencia/Interferencia. Elaboración propia.

**Tabla 34**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia/Interferencia de señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
11	"04°40'03.06"N	074°06'59.70"W	-83.08 dBm	Buena
12	"04°40'16.61"N	074°05'05.38"W	-83.67 dBm	Buena
13	"04°41'07.11"N	074°06'54.76"W	-88.08 dBm	Buena
14	"04°41'23.13"N	074°07'12.68"W	-88.27 dBm	Buena
15	"04°42'03.55"N	074°08'46.37"W	-87.33 dBm	Buena
16	"04°42'03.16"N	074°08'03.35"W	-87.61 dBm	Buena
17	"04°42'32.11"N	074°05'09.08"W	-82.10 dBm	Buena
18	"04°42'51.20"N	074°05'55.43"W	-83.37 dBm	Buena
19	"04°42'58.59"N	074°07'38.63"W	-80.72 dBm	Buena
20	"04°44'06.34"N	074°07'21.95"W	-88.82 dBm	Buena

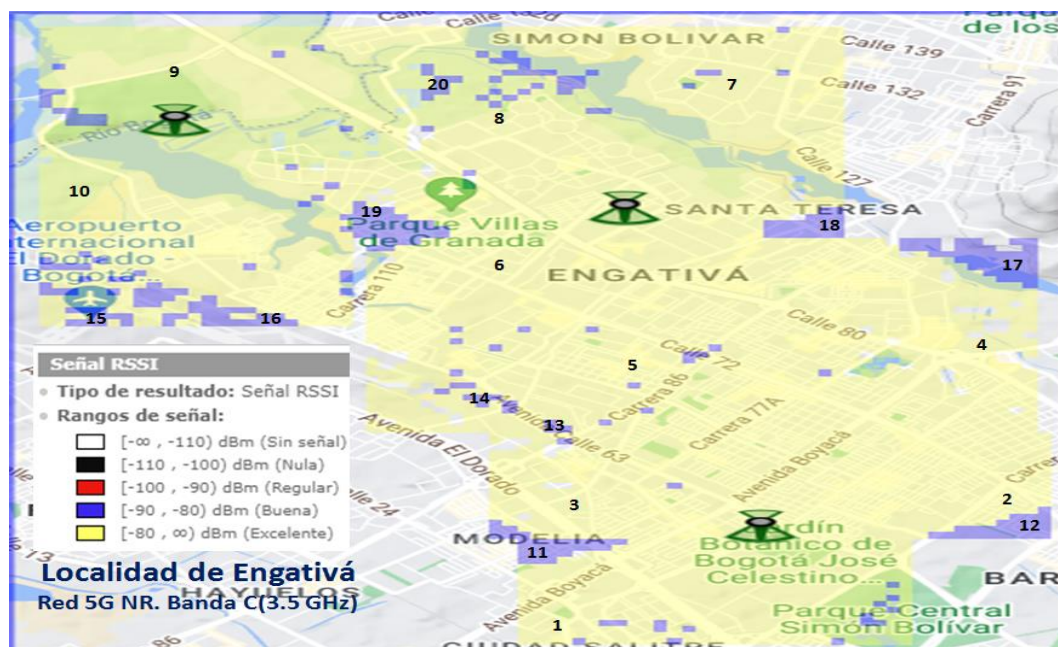
*Nota.* En la tabla se especifican 10 puntos de coordenadas de señal RSSI con valores de nivel “Buena” de Potencia/Interferencia. Elaboración propia.

En la figura 46, se muestran los veinte (20) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, cuyas ubicaciones fueron analizadas con respecto a la posición de equipos y antenas en cada sector, obteniendo como resultado que en toda el área de la localidad de Engativá, se presenta una cobertura de superior extensión con señal RSSI “Excelente” en la zona de color amarillo y una cobertura “Buena” de menor extensión en la zona de color azul, correspondiente a los rangos de -52,47 a -76,05 dBm y 80,72 a -88,82 dBm respectivamente.

Este resultado positivo de señal RSSI, es producto de la adecuada definición de las coordenadas geográficas de los seis (6) sectores y ubicación de equipos y antenas e igualmente, a las favorables condiciones de propagación radioeléctrica presentes en el área de la localidad de Engativá, lo cual demuestra una excelente y buena relación de señal a ruido, que permite un eficiente tráfico de datos en el sistema de telefonía móvil en la red 5G NR.

### Figura 46

#### *Niveles de Potencia de la Señal RSSI*



*Nota.* En esta gráfica se observa el grado de intensidad de la señal RSSI. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Señal SS-RSRQ.** En la localidad de Engativá, se escogieron diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas para analizar el comportamiento de la señal RSRQ (Reference Signal Received Quality), los cuales se registran en la siguiente tabla 35:

**Tabla 35**

*Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ*

#	Latitud	Longitud	SS-RSRQ
1	"04°39'29.80"N	074°06'12.12"W	-10.79 dB
2	"04°40'22.19"N	074°05'08.16"W	-10.84 dB
3	"04°41'25.01"N	074°06'46.42"W	-10.79 dB
4	"04°41'58.89"N	074°07'32.15"W	-10.79 dB
5	"04°42'38.92"N	074°06'35.30"W	-10.79 dB
6	"04°43'39.89"N	074°06'10.58"W	-10.79 dB
7	"04°44'18.69"N	074°06'08.73"W	-10.79 dB
8	"04°43'55.29"N	074°07'04.35"W	-10.79 dB
9	"04°44'02.68"N	074°08'08.62"W	-10.79 dB
10	"04°42'24.14"N	074°08'20.36"W	-10.79 dB

*Nota.* En la tabla se muestran 10 puntos de coordenadas de señal RSRQ con valores de categoría “Buena”. Elaboración propia.

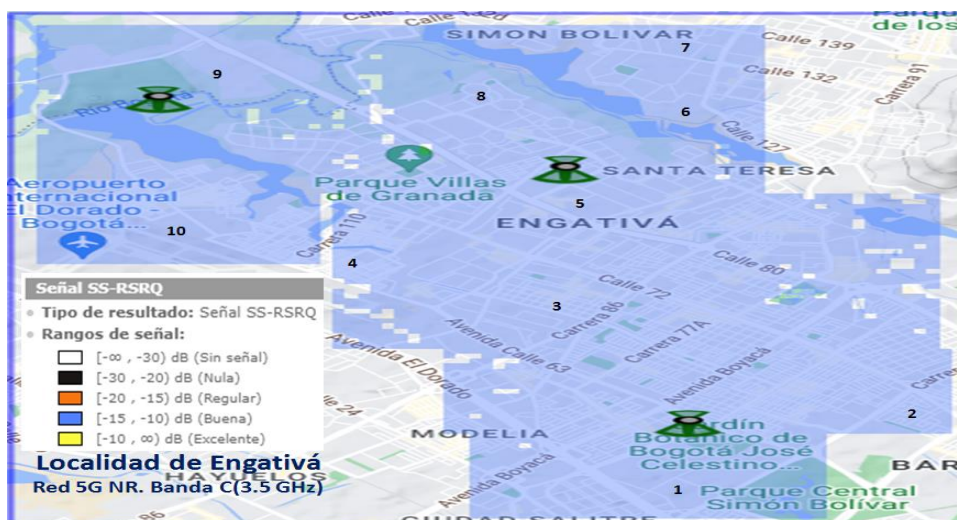
La señal SS-RSRQ en la localidad de Engativá, se muestra en la figura 47, y también, la ubicación de los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas con señales RSRQ de nivel “Buena”, demarcadas en color azul.

Teniendo en cuenta, que la señal RSRQ es de nivel de “Buena”, se concluye que toda el área de la localidad de Engativá recibe una señal de buena calidad con valores dentro del rango de -10.84 a -10.79 dB.

También se puede concluir, que la señal RSRQ de buena calidad, es producto del excelente comportamiento de las señales RSRP y RSSI analizadas anteriormente, lo cual garantiza un buen rendimiento de la red 5G NR en el proceso de tráfico de datos de telefonía móvil.

### Figura 47

#### *Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ*



*Nota.* La gráfica muestra el área de calidad de la señal RSRQ. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Downlink DL-SINR.** En la tabla 36, se observan los diez (10) puntos aleatorios tomados de la señal downlink DL-SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) de la localidad de Engativá, los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados en la zona de color amarillo, pertenecen a emplazamientos con señales de nivel “Excelente” calidad, los siguientes últimos cinco (5) puntos ubicados en la zona de color azul, corresponden a una señal DL-SINR de nivel “Buena”.

**Tabla 36**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°39'45.85"N	074°06'35.92"W	39.43 dB	Excelente
2	"04°41'02.84"N	074°05'28.56"W	40.93 dB	Excelente
3	"04°42'37.69"N	074°06'32.21"W	52.73 dB	Excelente
4	"04°44'03.30"N	074°08'09.85"W	48.33 dB	Excelente
5	"04°43'08.48"N	074°08'51.87"W	43.23 dB	Excelente
6	"04°40'03.10"N	074°07'00.02"W	20.13 dB	Buena
7	"04°40'16.65"N	074°05'05.07"W	19.53 dB	Buena
8	"04°42'30.91"N	074°05'08.16"W	21.13 dB	Buena
9	"04°42'51.24"N	074°05'53.90"W	19.03 dB	Buena
10	"04°42'16.13"N	074°08'31.48"W	18.23 dB	Buena

*Nota.* En la tabla se relacionan 10 puntos de coordenadas del enlace downlink DL-SINR con valores de categoría “Excelente” y “Buena”. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el valor de 23 dB como parámetro de comparación, se observa en la figura 48, la posición de los primeros cinco (5) puntos aleatorios con valores superiores a 23 dB, lo cual indica que en la localidad de Engativá se genera una señal downlink de nivel “Excelente” que cubre el 96% aprox. del área total y caracterizada por bajo riesgo de afectación por ruidos e interferencias.

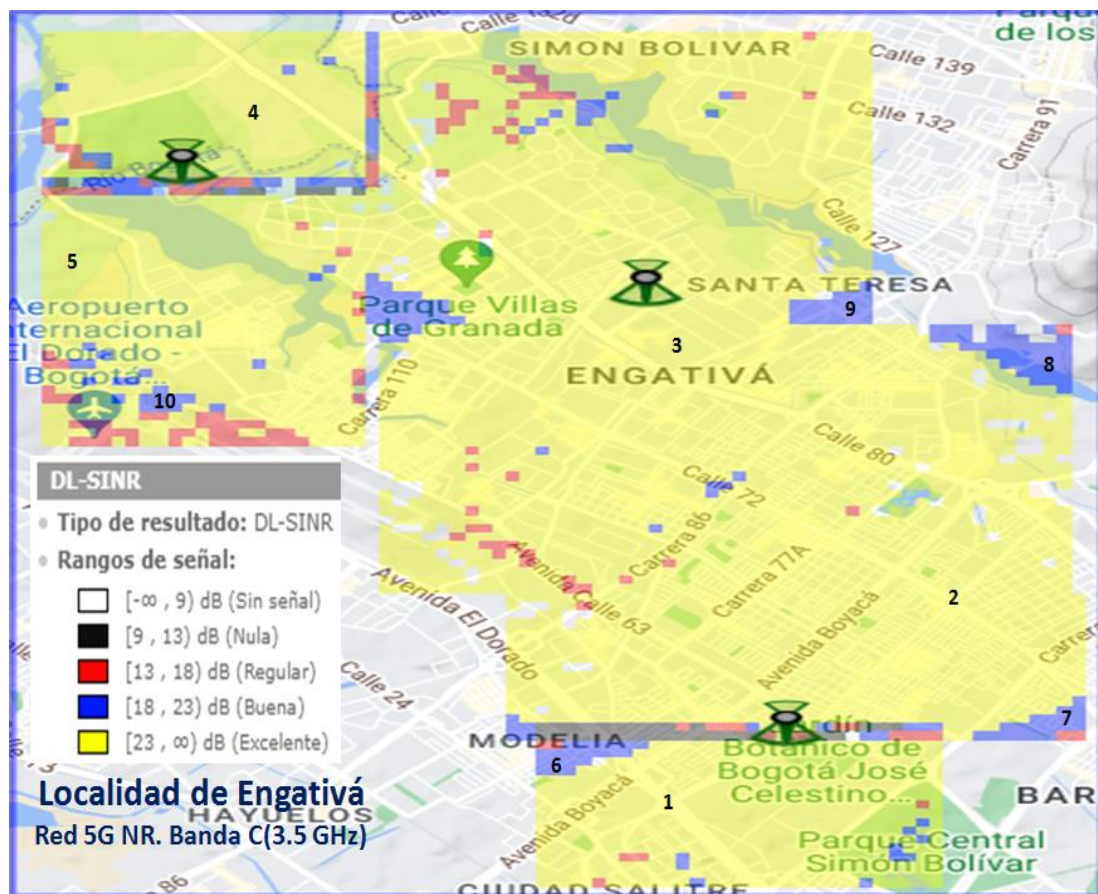
Igualmente, se registra una señal downlink de nivel “Buena” con valores inferiores a 23 dB que abarca una cobertura mínima del 5% aprox. y susceptible de ser perturbada por mayores niveles de interferencias y ruidos.

En la misma figura, se notan algunos puntos blancos, los cuales son sectores en donde la señal DL-SINR es nula.

Por tanto, se puede concluir, que los procesos donde intervienen señales downlink son eficientes debido al manejo de ondas de alta frecuencia con mayor potencia que permiten optimizar el tráfico de datos y señalización entre la estación base (BS) y el terminal de usuario (UE) de la red de telefonía celular 5G NR.

Figura 48

Gráfica de Interferencia de Enlace Downlink DL-SINR



Nota. La gráfica muestra el área de cobertura del enlace downlink con niveles “Excelente” y “Buena”. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Uplink UL-SINR.** En la tabla 37, se muestran los diez (10) puntos aleatorios que indican la presencia en toda el área de una señal ascendente UL-SINR de nivel “Excelente”.

**Tabla 37***Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Uplink UL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°39'45.90"N	074°06'35.47"W	18.41 dB	Excelente
2	"04°40'39.49"N	074°05'10.81"W	9.81 dB	Excelente
3	"04°40'54.27"N	074°06'03.96"W	26.44 dB	Excelente
4	"04°41'23.83"N	074°07'18.73"W	18.21 dB	Excelente
5	"04°42'11.26"N	074°06'04.57"W	20.71 dB	Excelente
6	"04°44'03.96"N	074°05'58.39"W	19.01 dB	Excelente
7	"04°43'36.19"N	074°06'58.34"W	25.51 dB	Excelente
8	"04°42'24.13"N	074°07'31.09"W	10.61 dB	Excelente
9	"04°42'24.13"N	074°08'24.24"W	23.31 dB	Excelente
10	"04°44'21.76"N	074°08'40.92"W	26.21 dB	Excelente

*Nota.* En la tabla se relacionan 10 puntos de coordenadas del enlace uplink UL-SINR con valor de categoría “Excelente”. Elaboración propia.

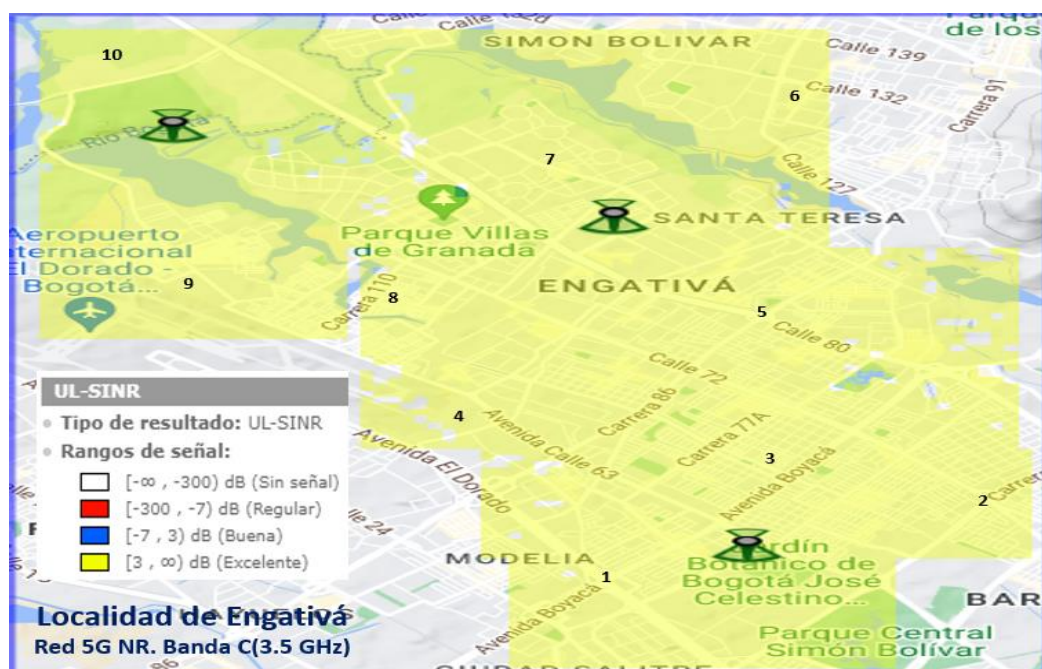
En la figura 49, se observa la cobertura total de la localidad de Engativá con señal uplink UL-SINR de nivel “Excelente” caracterizada por señales radioeléctricas de alta utilidad y baja afectación de ruidos e interferencias.

Del análisis de la muestra de los diez puntos aleatorios de señales UL-SINR, se concluye que, en la localidad de Engativá, se presenta una adecuada combinación de señales de baja frecuencia uplink, que permiten mayor penetración de señal y por tanto un eficiente desempeño

de señalización y transmisión de datos entre el terminal de usuario (UE) y la estación base (BS) de la red de telefonía celular 5G NR.

## Figura 49

*Gráfica de Interferencia de Enlace Ascendente*



*Nota.* En la gráfica se observa el área de cobertura del enlace uplink de nivel “Excelente”.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

## *Resultado de Capacidad*

En este resultado se genera un informe numérico y gráfico de la demanda de recursos, servicios de comunicaciones y carga de tráfico de datos de la red 5G NR en la localidad de Engativá.

**Informe de Throughput y Gráfica de Ancho de Banda.** En la tabla 38, se observa que la red 5G NR simulada, de la localidad de Engativá está en capacidad de atender en cada uno de los seis (6) sectores la demanda de usuarios outdoor con una carga de tráfico del 100% con velocidades máximas de transmisión de datos de 15.078,39 kbps en enlace downlink y 2.108,87 kbps en enlace uplink, lo cual garantiza un ancho de banda y velocidades apropiadas, para brindar servicios móviles eficientes al total de usuarios de la localidad de Engativá en la banda C.

**Tabla 38**

*Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Engativá 5G NR (3.5 GHz)*

Localidad	Número Usuarios	Carga Tráfico (%)	DLThP Máx. (kbps)	ULThP Máx. (kbps)	DLThP Gar. (kbps)	DLThP No Gar. (kbps)	ULThP Gar. (kbps)	ULThP No Gar. (kbps)
Engativá_1	101.907	100	15.078,39	21.08,87	15.286,05	0	13.332,66	0
Engativá_2	101.907	100	15.078,39	21.08,87	15.286,05	0	13.547,99	0
Engativá_3	101.907	100	15.078,39	21.08,87	15.286,05	0	13.745,92	0
Engativá_4	101.907	100	15.078,39	21.08,87	15.286,05	0	13.293,34	0
Engativá_5	101.907	100	15.078,39	21.08,87	15.286,05	0	13.646,68	0
Engativá_6	101.907	100	15.078,39	2.108,87	15.286,05	0	14.508,79	0

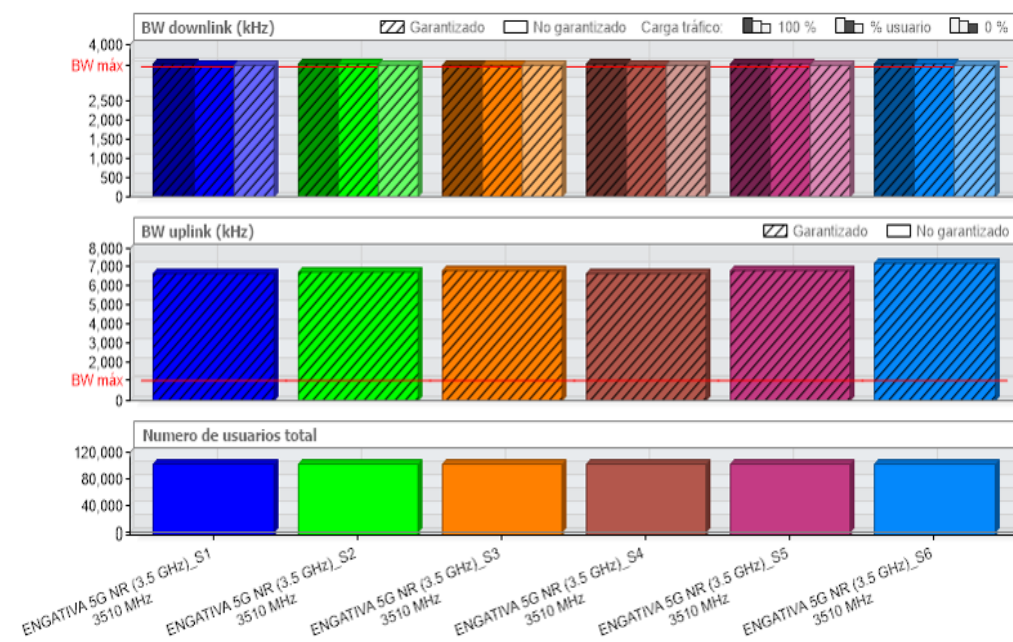
*Nota.* Datos del Informe de throughput concernientes a la velocidad de tráfico de datos de los transmisores definidos para la localidad de Engativá. Adaptado de (Xirio, 2023).

En la figura 50, se observa el resultado gráfico del proceso downlink, que arrojó los mismos valores de la localidad de Suba, referentes a un ancho de banda de garantizado de 3,47 GHz en el canal downlink que enlaza la estación base (BS) con las terminales de usuario (UE) y un ancho de banda garantizado de 6,66 GHz en el canal uplink que enlaza las terminales de

usuario (UE) con las estaciones base de la red 5G NR a través de señales de baja frecuencia que generan mayor penetración de la señal. De esta manera con los valores alcanzados de anchos de banda garantizado downlink y uplink obtenidos en la simulación, se concluye que la red 5G NR en la banda C (3.5 Ghz) tiene la capacidad suficiente para atender la necesidad de comunicaciones móviles de los 101.907 usuarios outdoor por sector (6 sectores) de la localidad de Engativá, con una carga de tráfico del 100%.

**Figura 50**

*Gráfica de Ancho de Banda BW*



*Nota.* En esta gráfica se indica el comportamiento del ancho de banda BW máximo downlink y uplink generado en la localidad de Engativá. Tomado de (Xirio, 2023).

### **Simulación de la Red 5G NR en la Banda C (3.5 GHz) de la Localidad de Usaquén**

En la localidad de Usaquén, se definieron cinco (5) sectores o emplazamientos con ubicación de antenas de polarización vertical y omnidireccional.

## Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 3.5 GHz de la Localidad de Usaquén

La simulación de la red 5G NR, comprendió realizar análisis de las señales radioeléctricas referentes a cobertura, interferencia y capacidad, las cuales se describen a continuación:

### *Resultado de Cobertura*

Para determinar los valores de potencia de la señal radioeléctrica RSRP de la localidad de Usaquén en la banda C (3.5 MHz) por zonas de colores, se definieron cuarenta (40) puntos aleatorios de coordenadas geográficas, que se registran en las siguientes tablas 39, 40, 41 y 42:

**Tabla 39**

#### *Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°40'35.31"N	074°02'38.79"W	-78.70 dBm
2	"04°41'10.41"N	074°02'29.52"W	-70.60 dBm
3	"04°41'50.45"N	074°02'17.16"W	-75.80 dBm
4	"04°42'15.70"N	074°02'41.88"W	-77.80 dBm
5	"04°43'38.84"N	074°02'15.92"W	-77.90 dBm
6	"04°44'07.79"N	074°01'56.77"W	-73.80 dBm
7	"04°44'27.79"N	074°02'07.18"W	-66.70 dBm
8	"04°45'12.69"N	074°02'07.89"W	-76.80 dBm
9	"04°45'53.89"N	074°02'15.31"W	-76.20 dBm
10	"04°46'08.61"N	074°01'54.29"W	-74.70 dBm

*Nota.* Esta tabla relaciona 10 puntos de coordenadas geográficas con valores de potencia

“Excelente” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 40***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP*

<b>#</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>RSRP</b>
11	"04°40'34.04"N	074°03'02.94"W	-83.40 dBm
12	"04°41'07.30"N	074°01'56.19"W	-85.30 dBm
13	"04°41'59.03"N	074°01'54.34"W	-86.30 dBm
14	"04°42'15.05"N	074°03'10.97"W	-86.40 dBm
15	"04°42'58.78"N	074°02'36.36"W	-84.50 dBm
16	"04°43'16.64"N	074°01'45.07"W	-81.80 dBm
17	"04°44'02.21"N	074°02'38.22"W	-86.90 dBm
18	"04°44'45.32"N	074°01'39.51"W	-83.50 dBm
19	"04°45'05.59"N	074°02'48.72"W	-87.30 dBm
20	"04°45'37.55"N	074°01'35.18"W	-83.40 dBm

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas geográficas con valores de potencia “Buena” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 41***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
21	"04°40'39.40"N	074°01'29.62"W	-94.40 dBm
22	"04°40'59.11"N	074°03'29.51"W	-96.60 dBm
23	"04°41'30.52"N	074°02'55.52"W	-97.30 dBm
24	"04°41'51.46"N	074°01'41.36"W	-94.00 dBm
25	"04°42'29.65"N	074°01'24.06"W	-92.60 dBm
26	"04°43'41.71"N	074°03'04.79"W	-92.00 dBm
27	"04°44'08.75"N	074°01'17.88"W	-93.90 dBm
28	"04°44'34.56"N	074°02'43.78"W	-97.30 dBm
29	"04°46'27.81"N	074°01'34.56"W	-97.30 dBm
30	"04°46'28.98"N	074°02'22.15"W	-97.60 dBm

*Nota.* La tabla relaciona 10 puntos de coordenadas geográficas con valores de potencia

“Regular” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 42**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
31	"04°41'20.02"N	074°03'33.83"W	-104.60 dBm
32	"04°41'28.03"N	074°03'15.29"W	-102.60 dBm
33	"04°41'36.65"N	074°01'26.53"W	-106.80 dBm
34	"04°41'50.82"N	074°01'24.06"W	-105.30 dBm
35	"04°44'14.87"N	074°03'03.55"W	-102.80 dBm
36	"04°44'27.81"N	074°02'59.23"W	-102.80 dBm
37	"04°44'30.21"N	074°01'12.93"W	-106.10 dBm
38	"04°46'13.61"N	074°01'14.79"W	-105.40 dBm
39	"04°46'35.73"N	074°01'17.88"W	-104.20 dBm
40	"04°46'33.82"N	074°02'30.80"W	-101.40 dBm

*Nota.* La tabla registra 10 puntos de coordenadas geográficas con valores de potencia “Nula” de la señal RSRP. Elaboración propia.

En la Figura 56, se muestra la ubicación de los puntos aleatorios, seleccionados de coordenadas geográficas dentro las áreas de cobertura radioeléctrica de la señal RSRP, de acuerdo con la siguiente clasificación:

Área de color amarillo indica una señal “Excelente”, en los puntos de coordenadas del 1 al 10 y rango de -66,7 a -78,7 dBm.

Área de color azul denota una señal “Buena”, en los puntos de coordenadas del 11 al 20 y rango de -81,8 a -87,3 dBm.

Área de color rojo indica una señal “Regular”, en los puntos de coordenadas del 21 al 30 y rango de -92,0 a -97.6 dBm.

Área de color negro denota una señal “Nula”, en los puntos de coordenadas del 31 al 40 y rango de -101,4 a -106,8 dBm.

La ubicación estratégica de antenas y equipos en las estaciones base, permitió dar cubrimiento en los cinco (5) emplazamientos con un área mayor de señales RSRP de niveles excelentes y buenos, y una menor área con señales regulares.

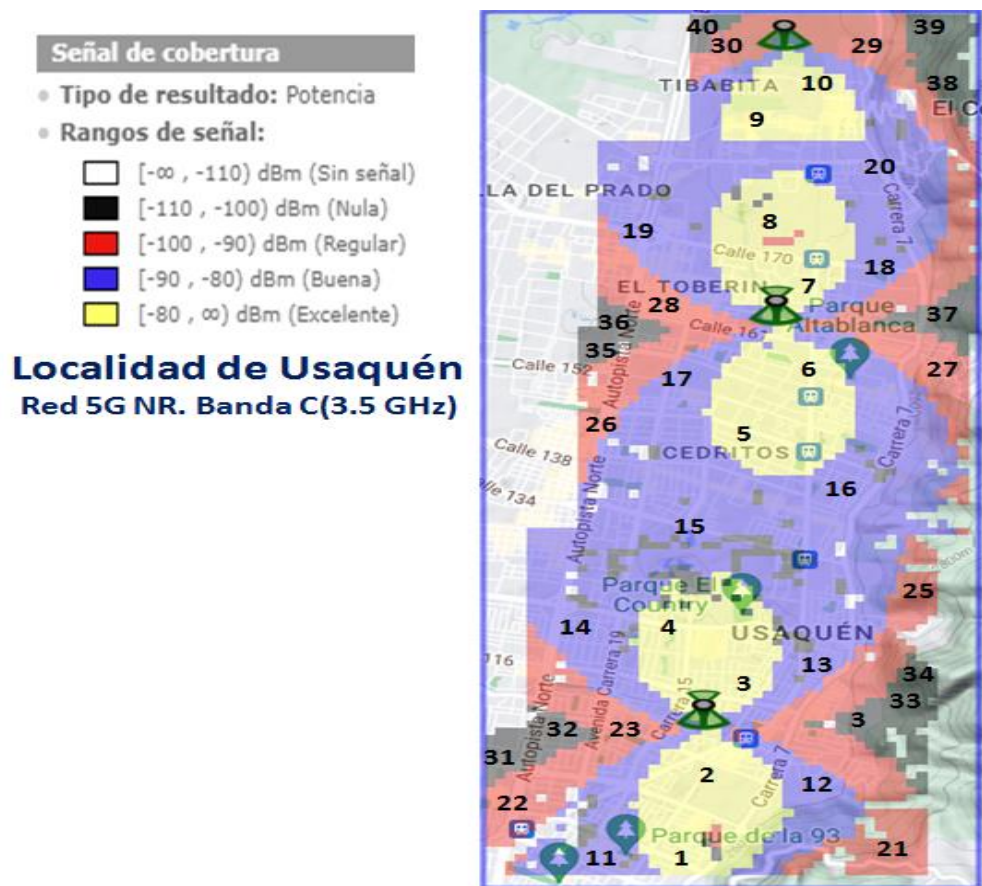
Es conveniente señalar, que el nivel de potencia de recepción depende de la ubicación y cercanía de los terminales de usuarios móviles (UE) con respecto al sitio de las antenas en cada una de las celdas.

En la figura 51, también se observa una secuencia de puntos blancos y negros ubicados en los bordes de las celdas, que son lugares donde no llegan las señales RSRP ocasionados por lejanía de la antena o afectación de ruidos e interferencias del medio ambiente.

El análisis de esta cobertura evidenció un funcionamiento eficiente de la red 5G NR en la banda C (3.5 GHz) para ofrecer servicios celulares a los 25.100 usuarios Indoor (25%) y 75.300 usuarios Outdoor (75%) de la localidad de Usaquén.

**Figura 51**

*Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica*



*Nota.* En la gráfica se observan las áreas demarcadas en colores de la intensidad de cobertura radioeléctrica de la señal RSRP. Adaptado de (Xirio, 2023).

### ***Resultado de Interferencia***

En el presente estudio de simulación de la localidad de Usaquén, se analizaron las señales RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR, las cuales se explican a continuación con mayor detalle:

**Señal RSSI.** En la simulación de la red 5G realizada en la localidad de Usaquén, se obtuvo el resultado de la potencia de la señal RSSI que se observa en la figura 52.

Los veinte (20) puntos aleatorios que se observan en las tablas 43 y 44, muestran que, en toda el área de la localidad de Usaquén, se recibe una cobertura de señal de relación a ruido RSSI (Received Signal Strength Indicator) con niveles de “Excelente” en la zona de color amarillo y “Buena” en la zona de color azul, correspondiente a los rangos de -58,77 a -76,15 dBm y -82.98 a -87,14 dBm respectivamente.

**Tabla 43**

*Niveles de Potencia de la Señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
1	"04°41'06.17"N	074°02'53.67"W	-61.27 dBm	Excelente
2	"04°41'39.43"N	074°02'04.23"W	-68.87 dBm	Excelente
3	"04°41'51.75"N	074°03'09.73"W	-69.86 dBm	Excelente
4	"04°42'55.80"N	074°02'59.23"W	-62.46 dBm	Excelente
5	"04°43'38.91"N	074°01'41.36"W	-58.77 dBm	Excelente
6	"04°44'12.17"N	074°02'39.45"W	-69.07 dBm	Excelente
7	"04°44'52.82"N	074°02'42.54"W	-65.17 dBm	Excelente
8	"04°44'42.91"N	074°01'31.47"W	-69.17 dBm	Excelente
9	"04°45'37.10"N	074°02'05.46"W	-58.87 dBm	Excelente
10	"04°46'24.46"N	074°02'27.71"W	-76.15 dBm	Excelente

*Nota.* La tabla registra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Excelente” de la señal RSSI. Elaboración propia.

**Tabla 44***Niveles de Potencia de la Señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
11	"04°40'44.84"N	074°03'09.03"W	-87.14 dBm	Buena
12	"04°41'22.42"N	074°03'32.51"W	-84.15 dBm	Buena
13	"04°41'35.35"N	074°01'33.86"W	-82.98 dBm	Buena
14	"04°41'50.13"N	074°01'22.12"W	-84.83 dBm	Buena
15	"04°42'06.15"N	074°01'57.96"W	-84.54 dBm	Buena
16	"04°42'49.87"N	074°02'11.56"W	-85.13 dBm	Buena
17	"04°44'21.02"N	074°03'02.23"W	-83.28 dBm	Buena
18	"04°44'30.20"N	074°01'09.76"W	-85.03 dBm	Buena
19	"04°46'16.07"N	074°01'11.61"W	-85.70 dBm	Buena
20	"04°46'32.02"N	074°01'13.47"W	-84.54 dBm	Buena

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Buena” de la señal RSSI. Elaboración propia.

En la figura 52, se muestran los veinte (20) puntos de coordenadas geográficas, cuyas ubicaciones fueron analizadas con respecto a la posición de equipos y antenas en cada sector.

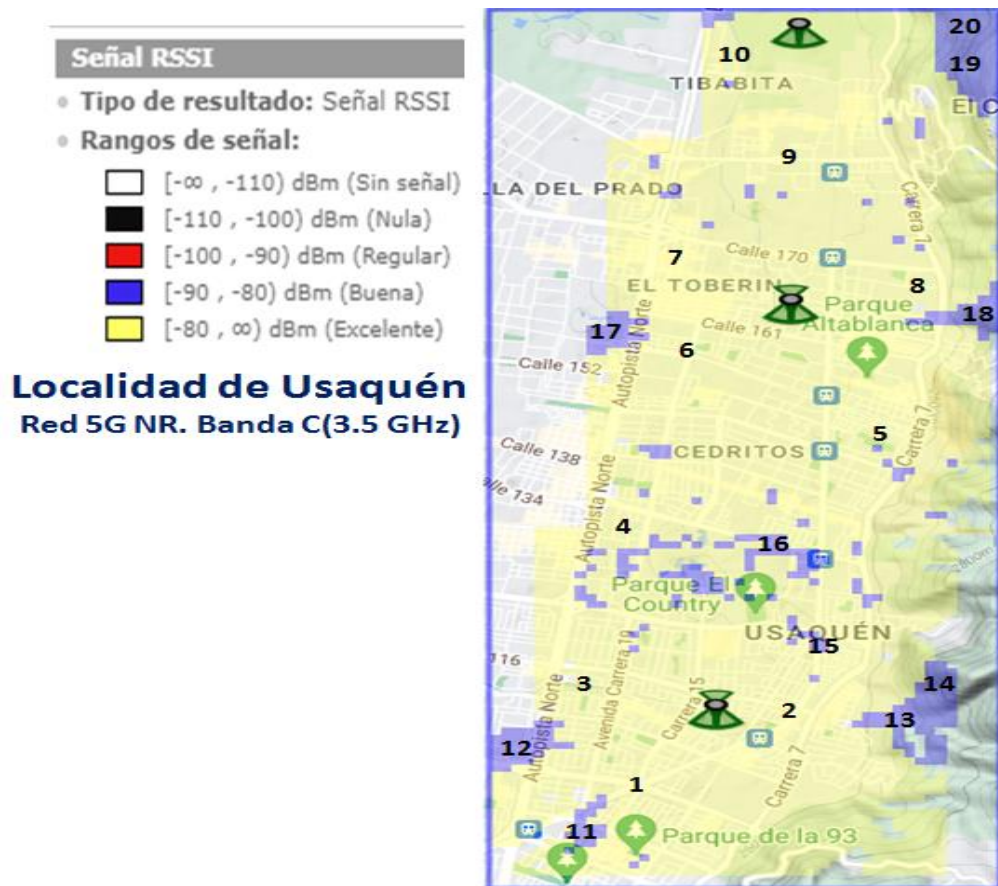
De esta manera, se obtuvo una cobertura que abarca toda la extensión de la localidad de Usaquéen con señales RSSI excelente y buena.

Este resultado positivo de señales RSSI, es producto de la acertada definición de las coordenadas geográficas de los cinco (5) sectores y ubicación de equipos y antenas e igualmente, a las condiciones óptimas de propagación radioeléctrica presentes en el área de la localidad de

Usaquén, que asegura una excelente y buena relación de señal a ruido que permite un eficiente tráfico de datos en el sistema de telefonía móvil en la red 5G NR.

**Figura 52**

*Niveles de Potencia de la Señal RSSI*



*Nota.* En la presente gráfica se observan las áreas demarcadas en colores de los niveles de potencia “Excelente” y “Buena” de la señal RSSI. Adaptado de (Xirio Online. 2023).

**Señal SS-RSRQ.** En la tabla 45, se registran los diez (10) puntos aleatorios seleccionados de coordenadas geográficas con valores de señal RSRQ dentro del rango de -10.79 a -10.83 dB.

**Tabla 45***Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ*

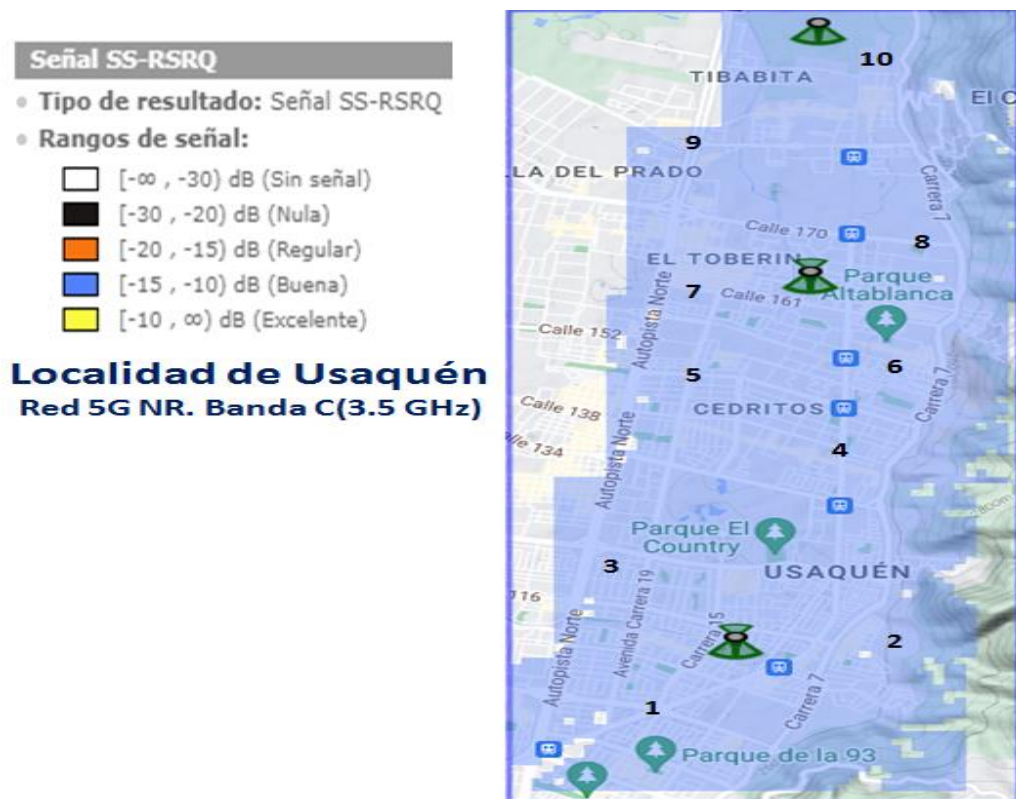
#	Latitud	Longitud	SS-RSRQ
1	"04°41'06.12"N	074°02'53.74"W	-10.79 dB
2	"04°41'39.37"N	074°01'40.81"W	-10.83 dB
3	"04°42'15.10"N	074°03'06.71"W	-10.79 dB
4	"04°43'04.98"N	074°01'58.12"W	-10.79 dB
5	"04°43'47.48"N	074°02'43.85"W	-10.79 dB
6	"04°43'48.65"N	074°01'39.58"W	-10.79 dB
7	"04°44'28.01"N	074°02'43.85"W	-10.82 dB
8	"04°44'53.82"N	074°01'34.02"W	-10.79 dB
9	"04°45'37.48"N	074°02'42.61"W	-10.79 dB
10	"04°46'18.62"N	074°01'46.99"W	-10.79 dB

*Nota.* Esta tabla registra 10 puntos de coordenadas de calidad de la señal RSRQ con categoría de “Buena”. Elaboración propia.

En la figura 53, se muestra el resultado de capacidad generado en Xirio Online, que arrojó una cobertura total de señal con “Buena” calidad demarcada en color azul, como producto del adecuado comportamiento de las señales RSRP y RSSI analizadas anteriormente, lo cual garantiza un buen desempeño de la red 5G NR en la transmisión de datos de telefonía celular.

**Figura 53**

*Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ*



*Nota.* En la gráfica se observa la cobertura a color de la calidad de la señal RSRQ. Adaptado de (Xirio Online. 2023).

**Enlace Downlink DL-SINR.** En la tabla 46, se observan los diez (10) puntos aleatorios tomados de la señal downlink DL-SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) de la localidad de Usaquén, donde los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados en la zona de color amarillo, pertenecen a sectores con una señal de “Excelente” calidad. Así mismo, los siguientes cinco (5) puntos aleatorios ubicados en la zona de color azul, pertenecientes a una señal DL-SINR de nivel “Buena”.

**Tabla 46***Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia DL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°40'56.83"N	074°02'34.51"W	50.53 dB	Excelente
2	"04°41'58.42"N	074°02'09.79"W	46.73 dB	Excelente
3	"04°43'44.97"N	074°02'30.80"W	43.63 dB	Excelente
4	"04°45'06.88"N	074°02'06.08"W	49.63 dB	Excelente
5	"04°46'13.33"N	074°01'53.72"W	49.83 dB	Excelente
6	"04°41'20.73"N	074°03'33.22"W	20.63 dB	Buena
7	"04°41'39.83"N	074°01'29.62"W	20.73 dB	Buena
8	"04°44'20.57"N	074°03'02.94"W	19.93 dB	Buena
9	"04°44'30.98"N	074°01'13.55"W	20.33 dB	Buena
10	"04°46'20.09"N	074°01'19.84"W	21.83 dB	Buena

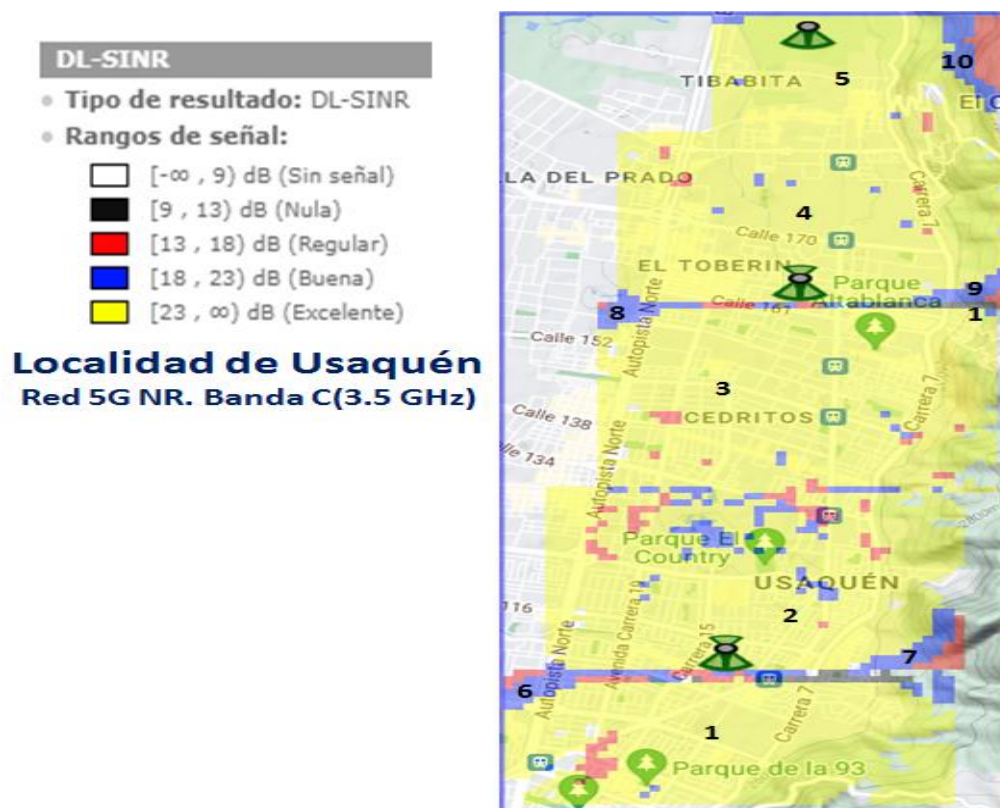
*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas de los niveles de interferencia del enlace downlink con categorías de “Excelente” y “Buena”. Elaboración propia.

En la figura 54, se ubican en terreno los diez (10) puntos aleatorios que establecen los valores de señal downlink DL-SINR excelentes y buenas en cada posición de coordenadas geográficas. Similar al análisis realizado en las localidades de Suba y Engativá, se puede concluir en este caso de Usaquén, que los procesos donde intervienen señales downlink son eficientes debido al manejo de señales de alta frecuencia con mayor potencia que permiten optimizar el

tráfico de datos y señalización entre la estación base (BS) y el equipo terminal de usuario (UE) de la red de telefonía celular 5G NR.

### Figura 54

Gráfica de Interferencia de Enlace Downlink DL-SINR



Nota. En la gráfica se muestra la cobertura a color del grado de interferencia del enlace downlink DL-SINR. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Uplink UL-SINR.** En la tabla 47, se muestra la cobertura total de la localidad de Usaquén de color amarillo, con la ubicación de diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas que indican la presencia en toda el área de una señal ascendente UL-SINR de nivel “Excelente”.

**Tabla 47***Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink UL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°41'05.93"N	074°02'54.39"W	21.01 dB	Excelente
2	"04°41'55.20"N	074°01'52.59"W	17.21 dB	Excelente
3	"04°42'27.05"N	074°03'04.89"W	20.11 dB	Excelente
4	"04°43'03.57"N	074°02'51.30"W	17.61 dB	Excelente
5	"04°43'44.83"N	074°01'40.23"W	23.71 dB	Excelente
6	"04°44'03.31"N	074°02'15.46"W	26.44 dB	Excelente
7	"04°45'01.81"N	074°02'35.85"W	21.61 dB	Excelente
8	"04°44'58.06"N	074°01'34.05"W	20.01 dB	Excelente
9	"04°45'37.47"N	074°02'29.05"W	21.71 dB	Excelente
10	"04°46'15.60"N	074°01'53.21"W	26.44 dB	Excelente

*Nota.* La tabla relaciona 10 puntos de coordenadas de los niveles de interferencia del enlace uplink con categoría de “Excelente”. Elaboración propia.

En la figura 55, se muestra la ubicación de los diez (10) puntos con señales uplink UL-SINR de nivel “Excelente”. Estas señales generalmente son de baja frecuencia caracterizadas por tener una alta potencia y una baja afectación de perturbaciones, por consiguiente, es factible concluir en este caso de Usaquén, que se presenta un buen desempeño de señalización y tráfico de datos entre el terminal de usuario (UE) y la estación base (BS) de la red de telefonía celular 5G NR.

**Figura 55**

*Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink*



*Nota.* En la gráfica se presenta la cobertura a color del grado de interferencia del enlace uplink UL-SINR. Adaptado (Xirio Online, 2023).

### **Resultado de Capacidad**

A continuación, se presentan los informes y gráficas del resultado de capacidad de la localidad de Usaquén, referente a la carga de tráfico de datos, demanda de recursos y servicios de comunicaciones en la red 5G NR.

**Informe de Throughput y Gráfica de Ancho de Banda.** En la tabla 48, se muestra el comportamiento en valores de la simulación de cobertura multitransmisor de la localidad de Usaquén en la banda C (3.5 GHz). En esta localidad conformada por cinco (5) sectores o emplazamientos, se observa que la red 5G NR simulada, está en capacidad de atender en cada sector una demanda de 75.300 usuarios outdoor con una carga de tráfico promedio del 74.97% y

velocidades máximas de transmisión de datos de 15.078,39 kbps en enlace downlink y 2.108,87 kbps en enlace uplink, lo cual garantiza un ancho de banda y velocidades óptimas, para la prestación de servicios móviles eficientes al total de usuarios de la localidad.

**Tabla 48**

*Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Usaquéen 5G NR (3.5 GHz)*

Localidad	Número Usuarios	Carga Tráfico (%)	DLThP Máx. (kbps)	ULThP Máx. (kbps)	DLThP Gar. (kbps)	DLThP No Gar. (kbps)	ULThP Gar. (kbps)	ULThP No Gar. (kbps)
Usaquén_1	75.300	74,99	15.078,39	21.08,87	11.295	0	9.555,08	0
Usaquén_2	75.300	75,01	15.078,39	21.08,87	11.295	0	9.184,59	0
Usaquén_3	75.300	74,95	15.078,39	21.08,87	11.295	0	10.492,99	0
Usaquén_4	75.300	74,99	15.078,39	21.08,87	11.295	0	10.143,69	0
Usaquén_5	75.300	74,91	15.078,39	21.08,87	11.295	0	80.71,32	0

*Nota.* En esta tabla se muestran los datos del Informe de throughput correspondiente a la velocidad de tráfico de datos de los transmisores definidos para la localidad de Usaquéen.

Adaptado de (Xirio, 2023).

En la figura 56, se observa el resultado gráfico del proceso downlink, con iguales valores obtenidos en la localidad de Engativá, de ancho de banda garantizado de 2,57 GHz en el canal downlink que enlaza la estación base (BS) con las terminales de usuario (UE) y un ancho de banda garantizado de 4,77 GHz en el canal uplink que enlaza las terminales de usuario (UE) con las estaciones base de la red 5G NR a través de señales de alta frecuencia que generan mayor velocidad de la señal. De esta manera, se concluye que la red 5G NR en la banda C (3.5 Ghz) con los valores de ancho de banda garantizados posee la capacidad suficiente para atender la

necesidad de comunicaciones móviles de los 75.300 usuarios outdoor por sector (5 sectores) de la localidad de Usaquén, con una carga de tráfico del 74,99%.

## Figura 56

Gráfica de Ancho de Banda BW



*Nota.* En la gráfica se observa el comportamiento del ancho de banda BW máximo downlink y uplink del estudio en la localidad de Usaquén. Adaptado de (Xirio, 2023).

## Resultados de la Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz)

En esta parte del trabajo se continua con la realización de las simulaciones en las localidades de Suba, Engativá y Usaquén, aplicando los parámetros del software Xirio Online para la operación de una red 5G NR de telefonía móvil en la banda K (26 GHz), con el propósito de obtener los datos necesarios sobre puntos de coordenadas geográficas, umbrales de cobertura multitransmisor, rangos de señal, resultados de interferencia y resultados de capacidad de la señal radioeléctrica. Así mismo, para efectuar estas simulaciones en la banda K, se mantuvo la misma configuración definida en la banda C, con relación a números de usuarios Indoor y

outdoor, y niveles de medición de señales RSRP, RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR. Con la información resultante de las simulaciones, se efectuaron los estudios y análisis técnicos, encaminados a determinar la funcionalidad y rendimiento de la red 5G NR, con el uso de equipos RAN para comunicaciones móviles con señales de alta frecuencia, en las tres (3) localidades de la ciudad de Bogotá.

### **Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz) de la Localidad de Suba**

Para la localidad de Suba, en la banda K se definieron cinco (5) sectores o emplazamientos con implementación de antenas directivas con polarización simple.

### **Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 26 GHz de la Localidad de Suba**

La simulación de la red 5G NR en la banda K, implicó realizar análisis de las señales radioeléctricas sobre cobertura multitransmisor, interferencia y capacidad, cuyos resultados se describen y analizan a continuación:

#### ***Resultado de Cobertura***

En las tablas 49, 50, 51 y 52 se registran los cuarenta (40) puntos aleatorios seleccionados de coordenadas geográficas de conformidad con la siguiente distribución en manchas de colores.

Área de color amarillo indica una señal “Excelente”, en los puntos de coordenadas del 1 al 10 y rango de -72,4 a -78.9 dBm.

Área de color azul denota una señal “Buena”, en los puntos de coordenadas del 11 al 20 y rango de -82,4 a -83,7 dBm.

Área de color rojo indica una señal “Regular”, en los puntos de coordenadas del 21 al 30 y rango de 90,2 a -97.7 dBm.

Área de color negro denota una señal “Nula”, en los puntos de coordenadas del 31 al 40 y rango de -101,1 a -109,6 dBm.

**Tabla 49***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°42'01.53"N	074°04'14.85"W	-76.90 dBm
2	"04°42'04.61"N	074°03'24.79"W	-75.90 dBm
3	"04°44'04.71"N	074°05'21.59"W	-78.10 dBm
4	"04°44'24.36"N	074°05'04.90"W	-78.90 dBm
5	"04°44'52.69"N	074°04'56.25"W	-72.40 dBm
6	"04°44'53.86"N	074°04'08.67"W	-77.70 dBm
7	"04°45'50.46"N	074°03'54.45"W	-78.50 dBm
8	"04°45'45.47"N	074°04'51.31"W	-76.10 dBm
9	"04°44'18.64"N	074°06'22.15"W	-75.30 dBm
10	"04°45'10.98"N	074°06'25.24"W	-77.70 dBm

*Nota.* Tabla con relación de 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia

“Excelente” de señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 50***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
11	"04°41'04.01"N	074°04'02.49"W	-83.40 dBm
12	"04°41'58.83"N	074°04'40.80"W	-83.30 dBm
13	"04°42'53.03"N	074°03'20.46"W	-85.00 dBm
14	"04°43'44.15"N	074°03'17.37"W	-89.00 dBm
15	"04°44'41.42"N	074°03'53.22"W	-82.40 dBm
16	"04°45'53.97"N	074°03'30.97"W	-83.70 dBm
17	"04°43'26.78"N	074°05'42.60"W	-88.00 dBm
18	"04°43'39.72"N	074°06'59.23"W	-86.40 dBm
19	"04°45'15.79"N	074°05'37.66"W	-84.00 dBm
20	"04°45'05.32"N	074°07'12.21"W	83.70 dBm

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Buena” de señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 51***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
21	"04°43'08.92"N	074°02'58.83"W	-91.40 dBm
22	"04°43'15.08"N	074°03'11.81"W	-90.20 dBm
23	"04°43'44.03"N	074°02'56.98"W	-90.80 dBm
24	"04°45'05.94"N	074°02'49.56"W	-90.30 dBm
25	"04°45'58.84"N	074°04'04.96"W	-95.00 dBm
26	"04°44'41.80"N	074°04'16.08"W	-97.70 dBm
27	"04°43'30.36"N	074°04'58.10"W	-96.00 dBm
28	"04°43'10.65"N	074°07'35.07"W	-91.10 dBm
29	"04°46'00.63"N	074°07'49.90"W	-91.10 dBm
30	"04°46'07.34"N	074°05'16.64"W	-90.30 dBm

*Nota.* Esta tabla registra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Regular” de señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 52***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
31	"04°42'25.56"N	074°04'48.42"W	-109.60 dBm
32	"04°43'00.05"N	074°05'08.20"W	-106.90 dBm
33	"04°43'09.97"N	074°04'57.32"W	-103.70 dBm
34	"04°43'06.89"N	074°04'40.64"W	-104.90 dBm
35	"04°43'05.66"N	074°04'20.86"W	-106.80 dBm
36	"04°43'23.58"N	074°04'20.62"W	-103.30 dBm
37	"04°44'33.79"N	074°04'12.58"W	-101.10 dBm
38	"04°45'18.74"N	074°04'08.87"W	-102.00 dBm
39	"04°46'06.72"N	074°03'52.81"W	-101.70 dBm
40	"04°43'52.40"N	074°06'34.72"W	-106.20 dBm

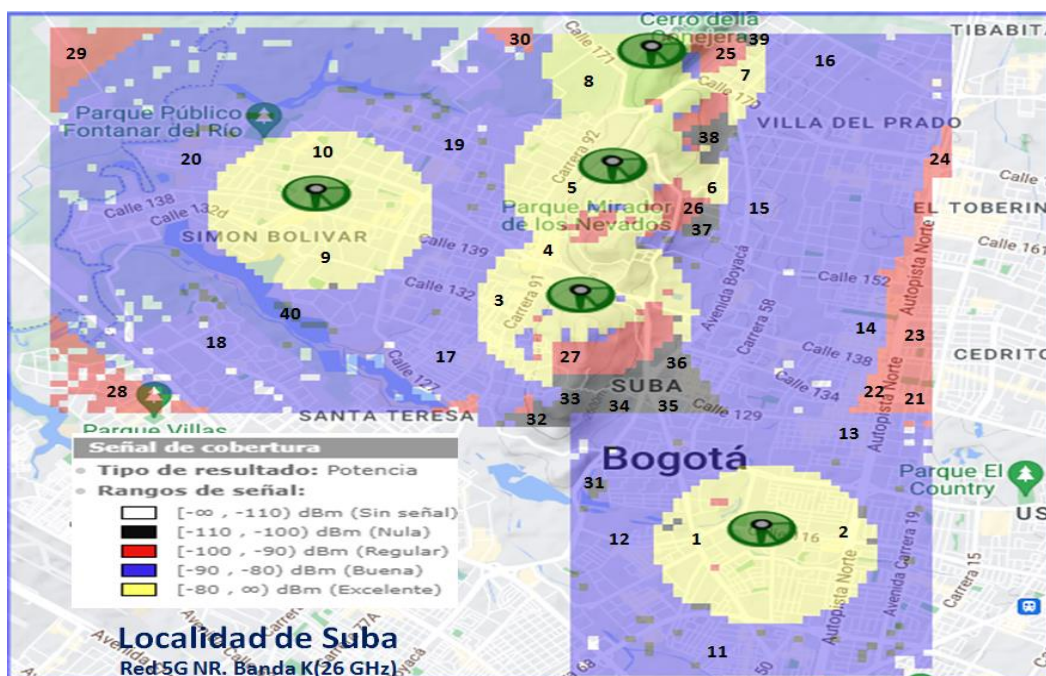
*Nota.* La presente tabla relaciona 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Nula” de señal RSRP. Elaboración propia.

En la figura 57, se observan los cinco (5) emplazamientos y la ubicación de los cuarenta (40) puntos de coordenadas geográficas, tenidos en cuenta para la estimación de la cobertura radioeléctrica necesaria de la localidad de Suba y de este modo atender la prestación de servicios de telefonía celular a los 62.633 usuarios Indoor (25%) y 187.901 usuarios Outdoor (75%). Así mismo, es pertinente señalar la presencia de mínimos puntos blancos y negros, donde la señal RSRP de potencia es deficiente o nula. En este caso de análisis de cobertura radioeléctrica en la banda K, igual que en la banda C, es importante destacar la ubicación estratégica de antenas y

equipos en las estaciones base, lo cual permitió establecer para la localidad de Suba, un área mayor de señales RSRP de niveles excelentes y buenos, y una menor área con señales regulares como se aprecia en la figura 63. Así mismo, hay que señalar que el nivel de potencia de recepción depende de la ubicación y cercanía de los terminales de usuarios móviles (UE) con referencia al sitio de posición de las antenas en cada una de las celdas.

**Figura 57**

*Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica*



*Nota.* En la figura se muestra el área de cobertura radioeléctrica a color de la señal de potencia RSRP. Adaptado de (Xirio, 2023).

### **Resultado de Interferencia**

En esta parte de simulación de la localidad de Suba, se analizaron las señales RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR, cuyos resultados se explican a continuación:

**Señal RSSI.** Los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas seleccionados para el análisis de la señal RSSI se registran en la siguiente tabla 53.

**Tabla 53**

*Niveles de Potencia de la Señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
1	"04°41'21.45"N	074°03'55.90"W	-47.41 dBm	Excelente
2	"04°42'22.42"N	074°04'13.82"W	-46.81 dBm	Excelente
3	"04°43'54.81"N	074°03'28.70"W	-55.61 dBm	Excelente
4	"04°45'00.03"N	074°03'16.96"W	-53.30 dBm	Excelente
5	"04°45'52.93"N	074°03'47.24"W	-48.11 dBm	Excelente
6	"04°45'02.37"N	074°05'13.14"W	-46.33 dBm	Excelente
7	"04°43'21.37"N	074°05'23.65"W	-48.57 dBm	Excelente
8	"04°44'12.49"N	074°06'16.18"W	-44.71 dBm	Excelente
9	"04°45'17.77"N	074°06'02.58"W	-48.81 dBm	Excelente
10	"04°44'59.91"N	074°07'00.67"W	-48.51 dBm	Excelente

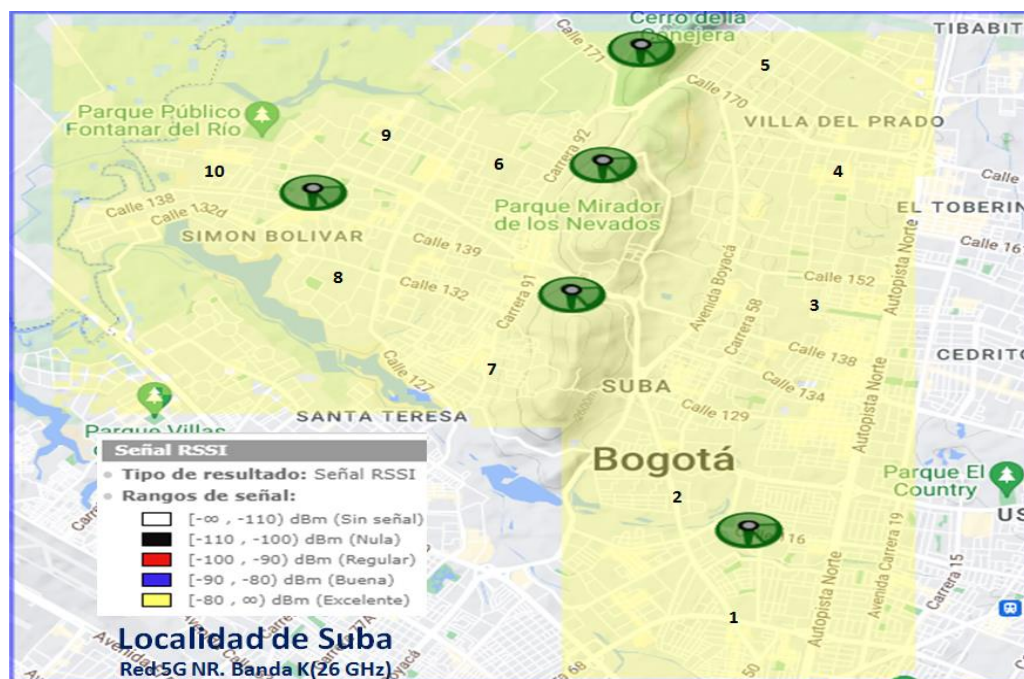
*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas geográficas de señal RSSI con nivel de “Excelente”. Elaboración propia.

En la figura 58, se muestra el resultado gráfico del análisis en Xirio de la señal RSSI (Received Signal Strength Indicator), que determinó una cobertura para toda la extensión de la localidad de Suba con nivel de señal “Excelente” demarcada con color amarillo y dentro del rango de -44.71 a -55,61 dBm. La presencia de esta excelente cobertura de señal RSSI, obedece al uso en la banda K de ondas de alta frecuencia y a la ubicación apropiada de las antenas y

equipos en los cinco (5) emplazamientos y también, a que el sector de la localidad de Usaquén probablemente es menos afectado por ruidos e interferencias del medio ambiente.

## Figura 58

### *Niveles de Potencia de la Señal RSSI*



*Nota.* En la gráfica se observa a color el área de cobertura radioeléctrica de la señal “Excelente” RSSI. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Señal SS-RSRQ.** En la tabla 54, se muestran los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas definidos, con valores en decibelios de la señal de calidad dentro del rango de -10.79 a -12.72 dB.

**Tabla 54***Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ*

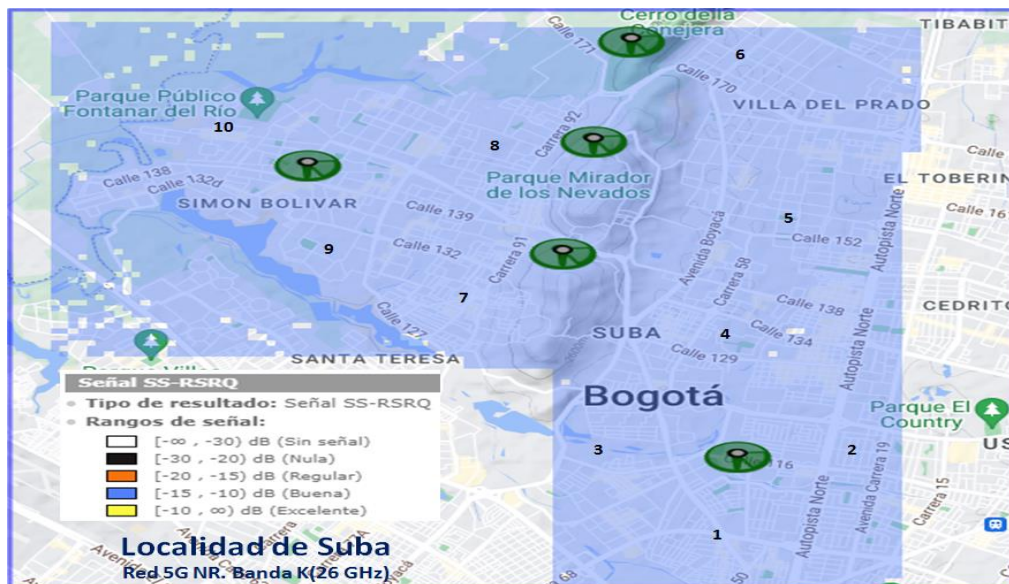
#	Latitud	Longitud	SS-RSRQ
1	"04°41'19.98"N	074°03'56.51"W	-10.79 dB
2	"04°42'08.64"N	074°03'07.69"W	-10.79 dB
3	"04°42'12.95"N	074°04'37.92"W	-10.79 dB
4	04°43'29.32"N	074°03'41.06"W	-10.79 dB
5	"04°44'19.82"N	074°03'29.94"W	-12.72 dB
6	"04°45'54.05"N	074°03'47.86"W	-10.79 dB
7	"04°43'37.88"N	074°05'29.83"W	-10.79 dB
8	"04°45'17.04"N	074°05'20.56"W	-10.79 dB
9	"04°44'02.52"N	074°06'19.27"W	-10.79 dB
10	"04°45'12.11"N	074°06'59.44"W	-10.79 dB

*Nota.* Esta tabla relaciona 10 puntos de coordenadas geográficas sobre la calidad de la señal RSRQ con nivel de “Buena”. Elaboración propia.

En la Figura 59, la señal RSRQ (Reference Signal Received Quality), que determina la calidad de referencia de señal recibida en unidades dB, establece para la localidad de Suba una cobertura de señales con niveles de “Buena” calidad, representada por la amplia zona de color azul y como en casos de localidades anteriores, esta buena calidad de señal RSRQ proviene de la relación de señales RSRP y RSSI con valores de niveles excelentes y buenos.

**Figura 59**

*Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ*



*Nota.* En la gráfica se muestra a color el área de cobertura radioeléctrica de la señal “Excelente” RSRQ. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Downlink DL-SINR.** En la tabla 55, se observan los quince (15) puntos aleatorios tomados de la señal descendente DL-SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) de la localidad de Suba, donde los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados en la zona de color amarillo, pertenecen a sectores con una señal de “Excelente” calidad, pero que a la vez son susceptibles de ser afectados por bajos niveles de ruido e interferencias.

Los siguientes cinco (5) puntos aleatorios ubicados en la zona de color azul, corresponden a una señal DL-SINR de nivel “Buena”, que es afectada por mayores factores de ruido e interferencias, haciendo que la señal de comunicación sea más débil y de menor utilidad. Igualmente, se observa en la misma imagen la presencia de puntos blancos, los cuales corresponde a sectores en donde la señal DL-SINR es deficiente o totalmente nula.

Finalmente, los siguientes cinco (5) puntos aleatorios muestran una señal “Regular” descendente útil, pero que también, es afectada por un grado mayor de interferencias y ruidos.

**Tabla 55**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR*

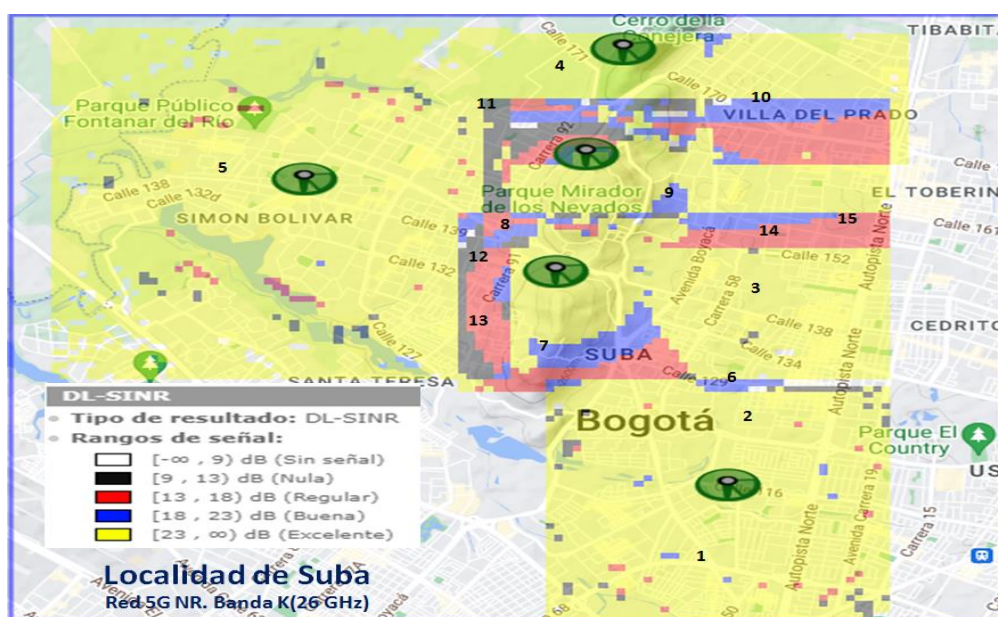
#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°41'21.09"N	074°03'55.90"W	42.62 dB	Excelente
2	"04°42'39.31"N	074°03'40.45"W	40.72 dB	Excelente
3	"04°43'47.06"N	074°03'38.59"W	36.12 dB	Excelente
4	"04°45'45.31"N	074°04'50.28"W	46.12 dB	Excelente
5	"04°44'47.97"N	074°06'52.02"W	45.12 dB	Excelente
6	"04°42'57.73"N	074°03'47.86"W	20.18 dB	Buena
7	"04°43'15.59"N	074°04'55.84"W	20.82 dB	Buena
8	"04°44'22.72"N	074°05'05.73"W	18.63 dB	Buena
9	"04°44'36.89"N	074°04'10.73"W	20.82 dB	Buena
10	"04°45'30.47"N	074°03'34.88"W	19.58 dB	Buena
11	"04°45'29.17"N	074°05'04.49"W	17.67 dB	Regular
12	"04°44'04.80"N	074°05'18.09"W	14.76 dB	Regular
13	"04°43'27.23"N	074°05'18.71"W	14.59 dB	Regular
14	"04°44'18.35"N	074°03'34.27"W	17.28 dB	Regular
15	"04°44'25.13"N	074°03'05.84"W	17.58 dB	Regular

Nota. La presente tabla registra 10 puntos de coordenadas de los niveles de interferencia del enlace downlink con categoría de “Excelente”, “Buena” y “Regular”. Elaboración propia.

En la figura 60, se aprecia de manera gráfica, la ubicación en terreno de los quince (15) puntos aleatorios que denotan un conjunto combinado de señales de interferencia downlink DL-SINR con niveles “Excelente”, “Buena” y “Regular” muy apropiado para dar una cobertura a toda la localidad de Suba y de esta manera, garantizar un óptimo funcionamiento de la red 5G NR para la prestación de servicios de comunicaciones celulares en la banda K.

### Figura 60

*Gráfica de Interferencia de Enlace Descendente DL-SINR*



*Nota.* En esta gráfica se ilustra la cobertura radioeléctrica de interferencia del enlace downlink.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Uplink UL-SINR.** En la tabla 56, se relacionan los diez (10) puntos aleatorios seleccionados para la simulación en Xirio Online de la señal uplink UL-SINR en la banda K.

**Tabla 56***Interferencia de Enlace Uplink UL-SINR*

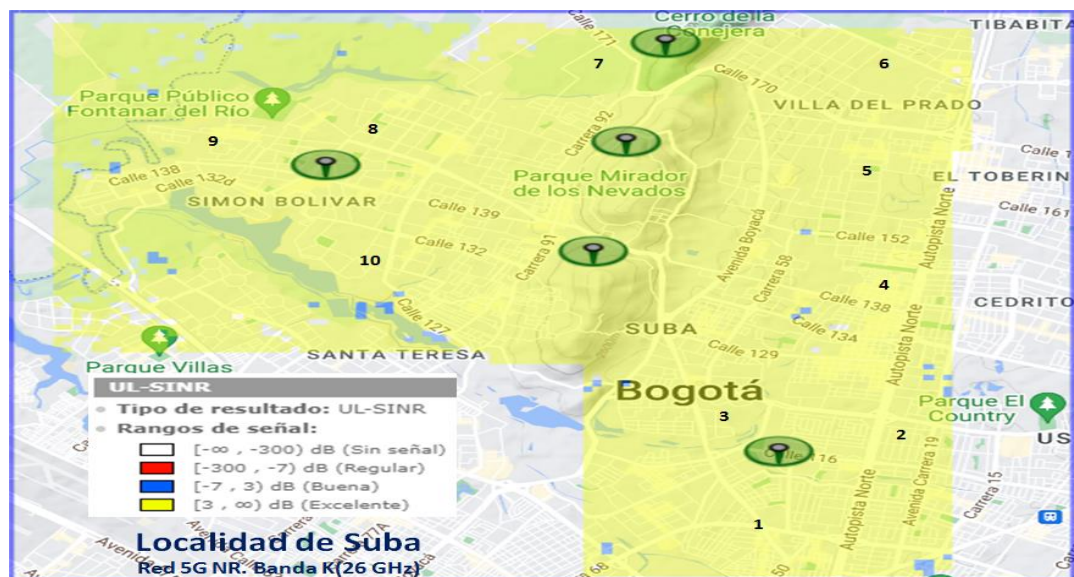
#	Latitud	Longitud	UL-SINR	Nivel
1	"04°41'20.97"N	074°03'56.51"W	21.60 dB	Excelente
2	"04°42'18.87"N	074°03'08.93"W	19.50 dB	Excelente
3	"04°42'24.41"N	074°04'09.49"W	22.10 dB	Excelente
4	"04°43'21.07"N	074°03'26.23"W	12.80 dB	Excelente
5	"04°44'48.53"N	074°03'20.05"W	14.00 dB	Excelente
6	"04°45'47.59"N	074°03'13.26"W	14.90 dB	Excelente
7	"04°45'48.76"N	074°04'52.13"W	23.43 dB	Excelente
8	"04°45'11.75"N	074°06'10.00"W	22.50 dB	Excelente
9	"04°45'04.98"N	074°07'03.14"W	19.10 dB	Excelente
10	"04°43'51.07"N	074°06'12.47"W	18.40 dB	Excelente

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas de interferencia del enlace uplink con categoría de “Excelente”. Elaboración propia.

En la figura 61, se observa la cobertura total de la localidad de Suba, marcada en color amarillo, con la ubicación de los diez (10) puntos aleatorios que indican la presencia en toda el área de una señal uplink UL-SINR de nivel “Excelente” caracterizada por señales radioeléctricas muy útiles y de menor afectación por perturbaciones de ruidos e interferencias del medio ambiente. Este nivel de excelencia de la señal uplink UL-SINR fue posible alcanzarlo, debido al uso en la banda K de señales de radio de menor longitud de onda que requieren mayor ancho de banda.

**Figura 61**

*Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink*



*Nota.* En esta gráfica se muestra la cobertura radioeléctrica de interferencia del enlace uplink.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

### **Resultado de Capacidad**

A continuación, se presenta el resultado de capacidad en valores y de manera gráfica de la localidad de Suba, referente a la carga de tráfico de datos, demanda de recursos y servicios de comunicaciones en la banda K.

**Informe de Throughput y Gráfica de Ancho de Banda.** En la tabla 57, se observa que la red 5G NR, está en capacidad de atender en cada sector una demanda de 187.901 usuarios outdoor con una carga de tráfico promedio del 19.3% con velocidades máximas de transmisión de datos de 147.750,35 kbps en enlace downlink y 22.386,42 kbps en enlace uplink. De esta manera, es factible la prestación de servicios móviles eficientes al total de usuarios de la localidad, debido

a la condición de la red celular de poder ofrecer máximas velocidades y también, al mayor ancho de banda que requieren las señales de alta frecuencia propias de la banda K.

**Tabla 57**

*Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Suba 5G NR (26 GHz)*

Localidad	Número Usuarios	Carga Tráfico (%)	DLThP Máx. (kbps)	ULThP Máx. (kbps)	DLThP Gar. (kbps)	DLThP No Gar. (kbps)	ULThP Gar. (kbps)	ULThP No Gar. (kbps)
Suba1	187.901	19,68	147.750,35	22.386,42	28.185,15	0	16.724,11	0
Suba2	187.901	19,13	147.750,35	22.386,42	28.185,15	0	12.802,98	0
Suba3	187.901	19,52	147.750,3	22.386,42	28.185,15	0	15.252,69	0
Suba4	187.901	19,08	147.750,35	22.386,42	28.185,15	0	12.247,67	0
Suba5	187.901	19,08	147.750,35	22.386,42	28.185,15	0	21.524,53	0

*Nota.* La tabla registra los datos del Informe de throughput referente a la velocidad de tráfico de datos de los transmisores de la localidad de Suba. Adaptado (Xirio, 2023).

En la figura 62, se observa el resultado gráfico del proceso en el enlace downlink con un ancho de banda garantizado de 6,63 GHz, encargado de enlazar la comunicación de la estación base (BS) con las terminales de usuario (UE) y también, el proceso en el canal uplink con un ancho de banda menor de 8,36 GHz, responsable de enlazar las comunicaciones de las terminales de usuario (UE) con las estaciones base de la red 5G NR a través de señales de mayor ancho de banda y alta frecuencia. Igualmente, con los valores de ancho de banda garantizados la red 5N NR posee la capacidad suficiente para atender la demanda de servicios de comunicaciones celulares del total 187.901 usuarios en cada sector de la localidad.

**Figura 62**

*Gráfica de Ancho de Banda BW*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento del ancho de banda BW máximo downlink y uplink del estudio en la localidad de Suba. Adaptado de (Xirio, 2023).

### **Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz) de la Localidad de Engativá**

Para la localidad de Engativá, en la banda K se definieron cuatro (4) sectores o emplazamientos con implementación de antenas directivas con polarización simple.

### **Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 26 GHz de la Localidad de Engativá**

El proceso de simulación de la cobertura de señal radioeléctrica implicó realizar análisis de cobertura, interferencia y capacidad, los cuales se describen a continuación:

### ***Resultado de Cobertura***

En las tablas 58, 59, 60 y 61 se registran los cuarenta (40) puntos de coordenadas geográficas seleccionados para hallar los valores de relación de potencia en decibelios (dBm) de la señal de radioeléctrica RSRP incidente en cada una de las manchas de coberturas de señales de referencia generadas en la simulación de Xirio Online.

De este modo, se obtuvo una estimación confiable de la fuerza de señal recibida con un ancho de banda específico en cada sector de la localidad de Engativá.

Los puntos seleccionados de coordenadas geográficas se colocaron en toda el área de la localidad, de acuerdo con la siguiente distribución de manchas de colores:

Área de color amarillo indica una señal “Excelente”, en los puntos de coordenadas del 1 al 10 y rango de -73,7 a -78.3 dBm.

Área de color azul denota una señal “Buena”, en los puntos de coordenadas del 11 al 20 y rango de -82,5 a -86,9 dBm.

Área de color rojo indica una señal “Regular”, en los puntos de coordenadas del 21 al 30 y rango de -90,35 a -92.9 dBm.

Área de color negro denota una señal “Nula”, en los puntos de coordenadas del 31 al 40 y rango de -107,6 a -109,6 dBm.

**Tabla 58**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°40'25.60"N	074°06'15.76"W	-73.70 dBm
2	"04°40'37.92"N	074°05'32.51"W	-76.00 dBm
3	"04°41'06.86"N	074°05'59.08"W	-77.20 dBm
4	"04°42'44.79"N	074°06'08.35"W	-75.90 dBm
5	"04°43'15.59"N	074°06'38.01"W	-77.40 dBm
6	"04°43'29.75"N	074°05'43.63"W	-78.30 dBm
7	"04°45'03.36"N	074°06'59.64"W	-76.20 dBm
8	"04°45'19.99"N	074°06'07.73"W	-76.70 dBm
9	"04°42'30.01"N	074°08'15.03"W	-76.30 dBm
10	"04°43'20.51"N	074°07'55.26"W	-77.00 dBm

*Nota.* La tabla registra 10 coordenadas geográficas con nivel de potencia “Excelente” de la señal

RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 59***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
11	"04°39'51.10"N	074°06'28.74"W	-83.80 dBm
12	"04°40'28.06"N	074°05'07.79"W	-83.10 dBm
13	"04°41'42.59"N	074°06'41.72"W	-86.90 dBm
14	"04°42'20.16"N	074°05'43.01"W	-83.50 dBm
15	"04°43'32.22"N	074°05'16.44"W	-83.80 dBm
16	"04°45'12.60"N	074°05'31.89"W	-84.70 dBm
17	"04°43'50.08"N	074°07'05.82"W	-86.20 dBm
18	"04°44'28.88"N	074°07'35.48"W	-86.30 dBm
19	"04°42'10.30"N	074°07'54.64"W	-82.50 dBm
20	"04°42'55.88"N	074°09'13.12"W	-84.30 dBm

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Buena” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 60**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
21	"04°41'57.98"N	074°07'31.78"W	-90.50 dBm
22	"04°41'55.52"N	074°09'46.50"W	-90.50 dBm
23	"04°42'06.61"N	074°09'52.06"W	-90.60 dBm
24	"04°41'53.06"N	074°10'17.39"W	-92.90 dBm
25	"04°42'20.77"N	074°10'14.31"W	-91.90 dBm
26	"04°42'50.34"N	074°10'03.80"W	-90.60 dBm
27	"04°43'03.88"N	074°10'18.63"W	-91.70 dBm
28	"04°43'20.51"N	074°10'09.36"W	-91.00 dBm
29	"04°43'37.14"N	074°10'16.78"W	-92.20 dBm
30	"04°43'53.77"N	074°10'08.13"W	-92.00 dBm

*Nota.* La tabla hace referencia a 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia

“Regular” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 61**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
31	"04°39'46.18"N	074°05'20.15"W	-109.20 dBm
32	"04°39'36.94"N	074°06'24.42"W	-109.60 dBm
33	"04°40'53.93"N	074°06'55.32"W	-107.70 dBm
34	"04°41'36.43"N	074°05'41.78"W	-108.30 dBm
35	"04°42'39.86"N	074°05'11.49"W	-109.30 dBm
36	"04°44'03.62"N	074°06'23.80"W	-109.20 dBm
37	"04°42'02.91"N	074°08'02.68"W	-107.60 dBm
38	"04°41'56.14"N	074°08'23.69"W	-108.90 dBm
39	"04°43'51.31"N	074°08'46.55"W	-108.90 dBm
40	"04°43'43.30"N	074°09'00.77"W	-109.10 dBm

*Nota.* La tabla registra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Nula” de la señal RSRP. Elaboración propia.

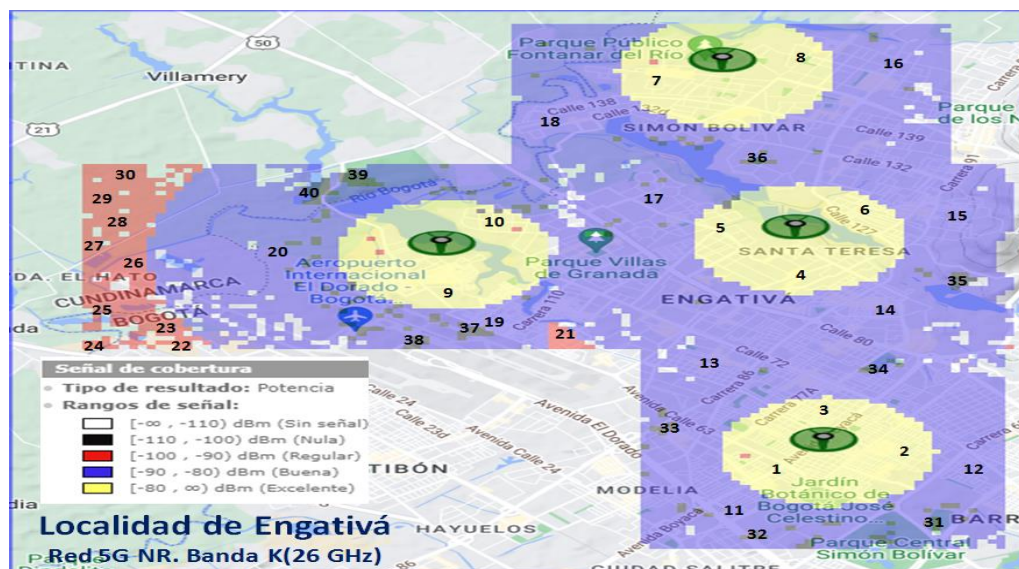
En la figura 63, se observan los cuatro (4) emplazamientos con el resultado de la potencia de señal radioeléctrica RSRP recibida y asignada por manchas de colores (Amarillo, azul , rojo y negro), logrando así, un cubrimiento eficiente a toda el área de la localidad de Suba en un 95% aprox. con señales excelentes (mancha amarilla ) y señales buenas (Mancha azul).

De esta manera el resultado de simulación arrojado garantiza la prestación de óptimos servicios de telefonía celular en la banda K a los 50.953 usuarios Indoor (25%) y 152.861

usuarios Outdoor (75%). Igualmente, es destacable señalar la ocurrencia mínima de puntos blancos y negros, en donde la señal RSRP no llega, debido a ser deficiente o nula.

### Figura 63

#### *Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica*



*Nota.* La gráfica muestra las áreas de cobertura radioeléctrica de la señal RSRP. Adaptado de (Xirio, 2023).

### *Resultado de Interferencia*

En la simulación realizada en la localidad de Engativá, se analizaron las señales RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR, que a continuación se explican con mayor detalle.

**Señal RSSI.** En la tabla 62, se relacionan los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas seleccionados para analizar y evaluar la incidencia de la señal RSSI en la simulación con Xirio Online de la localidad de Engativá.

**Tabla 62***Niveles de Potencia de la Señal RSSI*

#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
1	"04°40'12.66"N	074°05'13.35"W	-50.81 dBm	Excelente
2	"04°41'02.55"N	074°05'28.18"W	-48.51 dBm	Excelente
3	"04°41'25.96"N	074°06'50.37"W	-53.91 dBm	Excelente
4	"04°42'10.87"N	074°05'27.91"W	-54.01 dBm	Excelente
5	"04°43'17.38"N	074°06'39.60"W	-45.21 dBm	Excelente
6	"04°44'47.92"N	074°05'47.07"W	-51.11 dBm	Excelente
7	"04°44'08.50"N	074°07'21.00"W	-54.51 dBm	Excelente
8	"04°43'20.46"N	074°07'57.47"W	-44.01 dBm	Excelente
9	"04°42'26.27"N	074°07'53.76"W	-47.41 dBm	Excelente
10	"04°43'09.38"N	074°08'58.03"W	-49.21 dBm	Excelente

*Nota.* La tabla relaciona 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Excelente” de la señal RSSI. Elaboración propia.

Los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas que se observan en la figura 64, confirman que, en toda el área de la localidad de Engativá, se logra una cobertura del 100% de señal RSSI con nivel de “Excelente” correspondiente a la mancha de color amarillo en el rango apropiado de -44.01 a -54,51 dBm.

Este óptimo resultado del indicador RSSI se consigue al alto grado de intensidad de señal recibida, favorecido por la baja afectación de ruidos e interferencias y también, al uso en la banda K de señales de mayor frecuencia con mayor ancho de banda.

### Figura 64

*Niveles de Potencia de la Señal RSSI*



*Nota.* La gráfica muestra el nivel de potencia radioeléctrica “Excelente” de la señal RSSI.

Adaptado (Xirio Online, 2023).

**Señal SS-RSRQ.** En la tabla 63 se registran los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas elegidos para la medición de calidad de señal recibida RSRQ en los cinco (5) sectores de la localidad de Engativá.

**Tabla 63***Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ*

#	Latitud	Longitud	SS-RSRQ
1	"04°40'05.22"N	074°05'19.26"W	-10.79 dB
2	"04°41'15.44"N	074°05'43.36"W	-10.79 dB
3	"04°41'26.52"N	074°06'55.05"W	-10.79 dB
4	"04°41'51.78"N	074°05'35.33"W	-12.78 dB
5	"04°43'16.15"N	074°06'38.98"W	-10.79 dB
6	"04°44'47.92"N	074°05'46.45"W	-10.79 dB
7	"04°44'07.89"N	074°07'19.15"W	-10.79 dB
8	"04°43'23.54"N	074°08'04.26"W	-10.79 dB
9	"04°42'26.27"N	074°07'56.85"W	-10.79 dB
10	"04°43'08.76"N	074°08'58.03"W	-10.79 dB

*Nota.* La tabla muestra 10 puntos de coordenadas geográficas con calidad “Excelente” de la señal RSRQ. Elaboración propia.

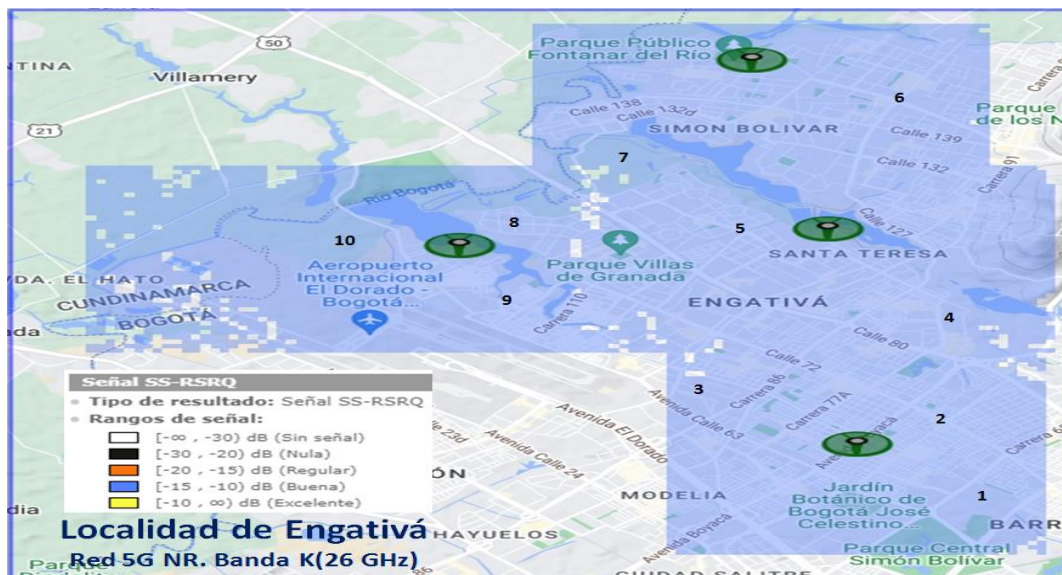
En la figura 65, se observa que en toda la extensión de la localidad de Engativá se recibe un nivel “Buena” de calidad RSRQ (Reference Signal Received Quality), cuyos valores se encuentran del rango apropiado de -10.79 a -12.78 dB definido en el estándar 3GPP y demarcada por la mancha de color azul.

Este indicador se obtiene de la relación entre la potencia de señal recibida y la cantidad de ruidos e interferencias presentes en los sectores.

Por tanto, la simulación con Xirio Online ratifica la existencia de mayor señal RSRP y baja afectación de ruidos y perturbaciones.

### Figura 65

#### Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ



Nota. En esta gráfica se indica el nivel de calidad “Buena” de la señal RSRQ. Fuente: Adaptado de (Xirio Online, 2023). Elaboración propia.

**Enlace Downlink DL-SINR.** En la tabla 64, se observan los quince (15) puntos aleatorios seleccionados de la señal downlink DL-SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) de la localidad de Engativá, donde los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados en la zona de color amarillo, pertenecen a sectores con una señal de “Excelente” calidad, los siguientes cinco (5) puntos aleatorios ubicados en la zona de color azul, corresponden a una señal de nivel “Buena” y los restantes cinco (5) denotan una señal de nivel “Regular”.

**Tabla 64***Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°40'31.71"N	074°05'37.80"W	47.22 dB	Excelente
2	"04°42'12.10"N	074°05'41.51"W	37.22 dB	Excelente
3	"04°45'02.08"N	074°05'40.89"W	38.62 dB	Excelente
4	"04°43'16.77"N	074°07'39.54"W	42.02 dB	Excelente
5	"04°42'47.82"N	074°09'27.07"W	35.82 dB	Excelente
6	"04°43'33.40"N	074°06'34.04"W	21.32 dB	Buena
7	"04°44'00.50"N	074°06'27.24"W	18.68 dB	Buena
8	"04°43'30.32"N	074°07'45.11"W	18.62 dB	Buena
9	"04°43'41.40"N	074°08'17.86"W	18.02 dB	Buena
10	"04°42'15.18"N	074°08'17.24"W	18.32 dB	Buena
11	"04°39'59.06"N	074°05'14.94"W	14.12 dB	Regular
12	"04°40'53.88"N	074°06'55.05"W	14.52 dB	Regular
13	"04°42'43.51"N	074°05'11.23"W	13.12 dB	Regular
14	"04°42'02.25"N	074°08'03.65"W	14.62 dB	Regular
15	"04°43'50.03"N	074°08'45.05"W	13.62 dB	Regular

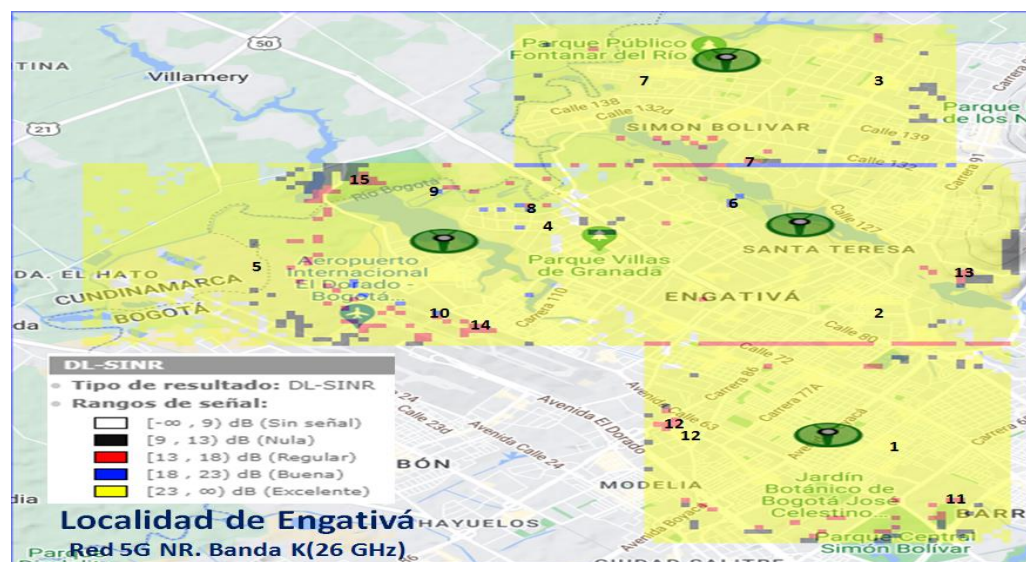
*Nota.* En la tabla se observan los 10 puntos de coordenadas geográficas del enlace downlink DL-SINR. Elaboración propia.

En la figura 66, se observa la ubicación los quince (15) puntos aleatorios seleccionados de señal de interferencia y también, se muestra el efecto de la simulación en Xirio online de la

señal de interferencia DL-SINR en los cuatro (4) sectores de la localidad de Engativá, el cual, determinó una mayor cobertura del 97% aprox. con nivel de “Excelente” demarcada por la mancha amarilla, que traduce la existencia de señales radioeléctricas en el canal downlink acompañadas de alta potencia y baja afectación de ruidos e interferencias. Igualmente, se muestran escasos puntos de manchas azules y rojas que indican presencia de señales DL-SINR con niveles “Buena” y “Regular” Este óptimo resultado es el producto de las excelentes condiciones de las ondas radiales de alta frecuencia y mayor ancho de banda que operan en la banda K (26 GHz).

### Figura 66

*Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink DL-SINR*



*Nota.* En la gráfica se muestra la cobertura de interferencia del enlace downlink DL-SINR.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Uplink UL-SINR.** En la tabla 65, se relacionan los diez (10) puntos aleatorios escogidos para efectuar la simulación y comparación en Xirio online y poder establecer el nivel de

potencia y presencia de ruidos en la señal de interferencia UL-SINR del enlace uplink de la red 5G NR.

**Tabla 65**

*Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink UL-SINR*

#	Latitud	Longitud	UL-SINR	Nivel
1	"04°40'08.92"N	074°05'18.64"W	18.40 dB	Excelente
2	"04°41'02.50"N	074°05'30.39"W	21.10 dB	Excelente
3	"04°41'24.68"N	074°06'53.81"W	15.00 dB	Excelente
4	"04°42'15.18"N	074°05'26.68"W	15.40 dB	Excelente
5	"04°43'15.54"N	074°06'37.75"W	23.43 dB	Excelente
6	"04°44'47.92"N	074°05'45.84"W	17.90 dB	Excelente
7	"04°44'08.50"N	074°07'15.44"W	14.70 dB	Excelente
8	"04°43'23.54"N	074°07'58.08"W	23.43 dB	Excelente
9	"04°42'23.80"N	074°07'54.99"W	21.30 dB	Excelente
10	"04°43'07.53"N	074°08'56.79"W	20.00 dB	Excelente

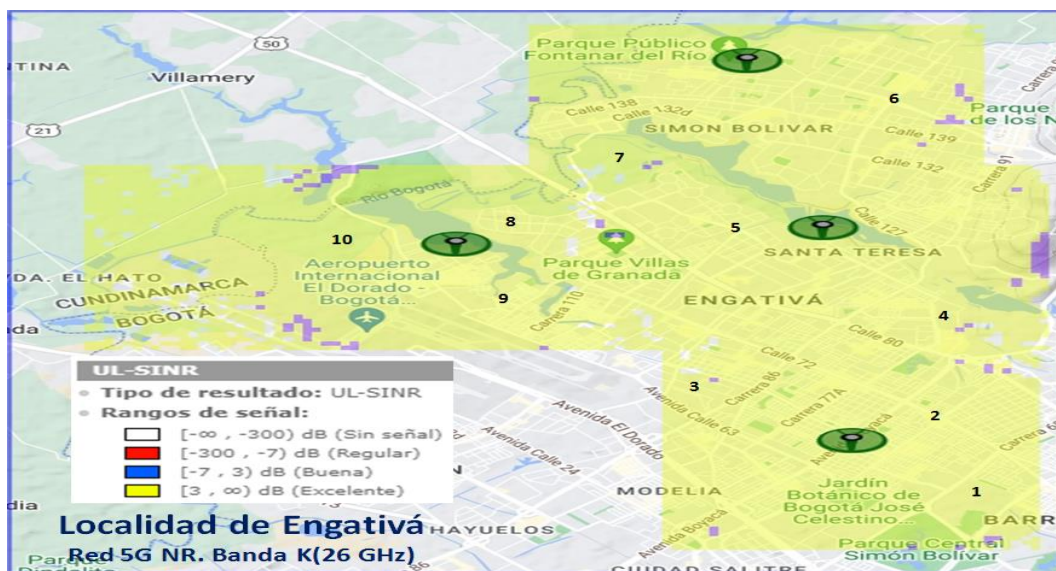
*Nota.* En esta tabla se registran los 10 puntos de coordenadas geográficas del enlace uplink UL-SINR. Relaboración propia.

En la figura 67, se observa un resultado similar al obtenido en el análisis anterior de señal DL-SINR, pero de mayor beneficio, ya que la señal de interferencia UL-SINR en el canal uplink es de nivel “Excelente” y suministra cubrimiento en un 100% a todo el sector de la localidad de Engativá. De este modo, se garantiza un eficiente de tráfico de datos entre la terminal de usuario (UE) y la estación (BS) de la red de telefonía celular. Por consiguiente, este excelente resultado

también se deriva de las excelentes condiciones de las ondas de radio de alta frecuencia, caracterizadas por menor longitud de onda y mayor ancho de banda, muy típicas en la operación de la banda K (26 GHz).

### Figura 67

#### Gráfica de Interferencia de Enlace Uplink



*Nota.* En la gráfica se muestra la cobertura de interferencia del enlace uplink UL-SINR.

Adaptado (Xirio Online, 2023).

### Resultado de Capacidad

En esta parte del análisis de simulación, se presentan los informes y gráficas del resultado de capacidad de la localidad de Engativá, referente a la carga de tráfico de datos, demanda de recursos y servicios de comunicaciones en la red 5G NR.

**Informe de Throughput y Gráfica de Ancho de Banda.** En la tabla 66, se muestran los resultados comparativos de capacidad de la red 5G NR obtenidos en la simulación Xirio online para la operación de telefonía móvil en la banda K (26 GHz). Estos resultados indican que la red

está en capacidad de atender a 152.861 usuarios por cada sector (5 sectores) con una carga de tráfico promedio estimada del 14,34%, lo cual significa que la red posee alta capacidad de expansión futura. Con respecto a los indicadores de throughput máximo en el enlace downlink DL-ThP se observa una velocidad máxima de tráfico de datos de 160 Gbps entre la estación base (NB) y la terminal de usuario (UE) y para el enlace uplink UL-ThP una velocidad máxima de 22 Gbps entre la terminal de usuario (UE) y la estación base (NB), Con referencia al throughput garantizado, únicamente el informe arrojó datos de una velocidad garantizada de 14 Gbps en el enlace uplink entre la terminal de usuario (UE) y la estación base (NB). De acuerdo con el análisis efectuado, los anteriores datos de velocidad y rendimiento se consideran apropiados, teniendo en cuenta el estándar 3GGP Release 15 que establece velocidades de transferencia de datos de hasta 20 Gbps en el enlace downlink y 10 Gbps en el enlace uplink (Rodhe&Schwarz, 2022).

### Tabla 66

*Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Engativá 5G NR (26 GHz)*

Localidad	Número Usuario	Carga Tráfico (%)	DLThP Máx. (kbps)	ULThP Máx. (kbps)	DLThP Gar. (kbps)	DLThP No Gar. (kbps)	ULThP Gar. (kbps)	ULThP No Gar. (kbps)
Engativá_1	152.861	14,36	160.062,88	22.386,42	22.929,15	0	15.598,06	0
Engativá_2	152.861	14,34	160.062,88	22.386,42	22.929,15	0	13.403,14	0
Engativá_3	152.861	14,33	160.062,88	22.386,42	22.929,15	0	15.367,9	0
Engativá_4	152.861	14,33	160.062,88	22.386,42	22.929,15	0	11.225,61	0

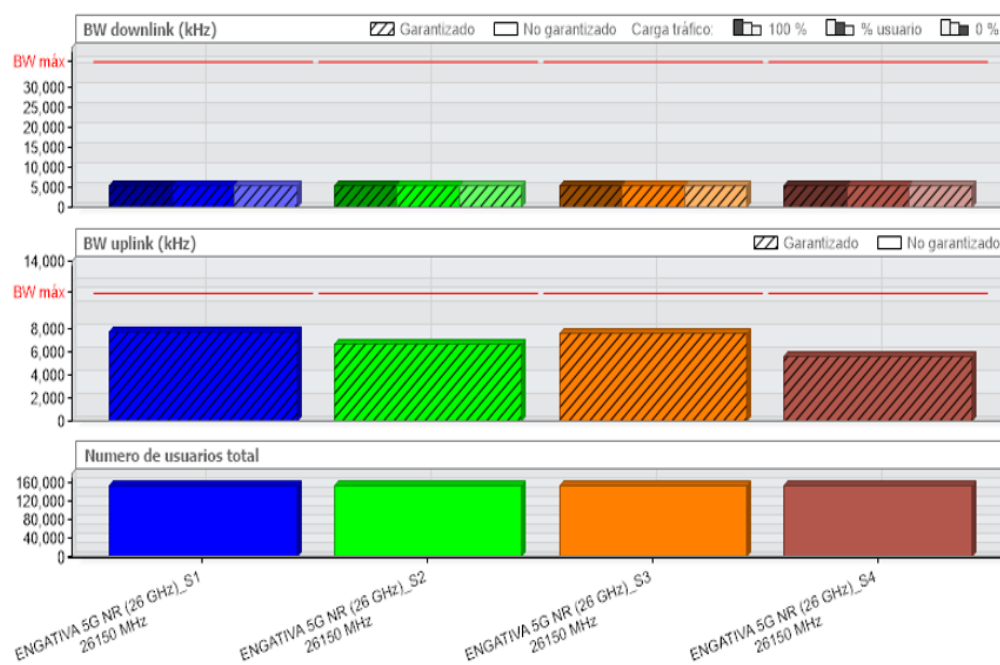
*Nota.* La tabla indica los datos del Informe de throughput referente a la velocidad de tráfico de datos de los transmisores de la localidad de Engativá. Adaptado de (Xirio, 2023).

En la figura 68, se observa el resultado gráfico del proceso en el enlace downlink con un ancho de banda garantizado de 5,22 GHz, encargado de enlazar la comunicación de la estación

base (BS) con las terminales de usuario (UE) y también, el proceso en el canal uplink con un ancho de banda garantizado de 7,79 GHz, responsable de enlazar las comunicaciones de las terminales de usuario (UE) con las estaciones base de la red 5G NR. De esta manera, se logra mayor velocidad y potencia en la transferencia de datos teniendo en cuenta, que en la banda K, las ondas de radio poseen mayor ancho de banda y funcionan a altas frecuencias. Así mismo, se concluye que, con los valores de anchos de banda garantizados, el sistema de red 5G NR está en capacidad de atender los servicios de comunicaciones de los 152.861 usuarios estimados en cada uno de los cuatro (4) sectores.

**Figura 68**

*Gráfica de Ancho de Banda BW*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento del ancho de banda BW máximo downlink y uplink del estudio en la localidad de Engativá. Adaptado de (Xirio, 2023).

## **Simulación de la Red 5G NR en la Banda K (26 GHz) de la Localidad de Usaquén**

En la localidad de Usaquén para la banda K, se definieron únicamente tres (3) sectores con implementación de antenas directivas con polarización simple.

### **Análisis de Simulación de Red 5G NR en la Banda de 26 GHz de la Localidad de Usaquén**

El proceso de simulación produjo varios reportes de información referentes a análisis de cobertura, interferencia y capacidad, los cuales se describen a continuación:

#### ***Resultado de Cobertura***

En las tablas 67, 68, 69 y 70 se relacionan los veinte y siete (27) puntos de coordenadas geográficas escogidas para hallar los valores de relación de potencia en decibelios (dBm) de la señal de radioeléctrica RSRP presente en cada una de las manchas de coberturas de señales de referencia generadas en la simulación de Xirio Online.

De esta manera, se obtuvo una estimación confiable de la fuerza de señal recibida con un ancho de banda específico en cada sector de la localidad de Engativá.

Los puntos aleatorios seleccionados de coordenadas geográficas se ubicaron en toda la extensión de la localidad, de conformidad con la siguiente distribución de manchas de colores:

Área de color amarillo indica una señal “Excelente”, en los puntos de coordenadas del 1 al 10 y rango de -74,3 a -78.90 dBm.

Área de color azul denota una señal “Buena”, en los puntos de coordenadas del 11 al 20 y rango de -82,10 a -87,70 dBm.

Área de color rojo indica una señal “Regular”, en los puntos de coordenadas 21 al 22 y rango de -90,40 a -90.80 dBm.

Área de color negro denota una señal “Nula”, en los puntos de coordenadas del 23 al 27 y rango de -106,6 a -109,4 dBm.

**Tabla 67***Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Excelente de la señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
1	"04°40'53.52"N	074°02'31.83"W	-75.40 dBm
2	"04°41'36.15"N	074°03'03.97"W	-78.90 dBm
3	"04°41'26.29"N	074°02'08.35"W	-76.20 dBm
4	"04°44'05.19"N	074°02'26.89"W	-74.30 dBm
5	"04°43'56.57"N	074°01'58.46"W	-75.90 dBm
6	"04°44'23.67"N	074°02'45.43"W	-78.70 dBm
7	"04°44'18.74"N	074°01'43.63"W	-76.70 dBm
8	"04°45'57.58"N	074°01'47.34"W	-77.50 dBm
9	"04°45'56.35"N	074°02'14.53"W	-78.10 dBm
10	"04°46'17.29"N	074°01'33.74"W	-76.30 dBm

*Nota.* Esta tabla registra 10 puntos de coordenadas correspondiente al nivel de potencia

“Excelente” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 68**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Buena de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
11	"04°40'28.70"N	074°03'06.44"W	-84.40 dBm
12	"04°41'19.20"N	074°01'39.92"W	-83.40 dBm
13	"04°42'14.64"N	074°03'08.91"W	-85.20 dBm
14	"04°43'06.37"N	074°02'49.14"W	-87.70 dBm
15	"04°44'07.14"N	074°03'06.44"W	-84.10 dBm
16	"04°43'31.42"N	074°01'57.22"W	-82.80 dBm
17	"04°44'37.93"N	074°01'25.09"W	-82.50 dBm
18	"04°45'39.11"N	074°02'41.72"W	-84.90 dBm
19	"04°45'38.69"N	074°01'49.81"W	-82.10 dBm
20	"04°47'14.77"N	074°02'02.17"W	-82.60 dBm

*Nota.* Esta tabla señala 10 puntos de coordenadas correspondiente al nivel de potencia “Buena” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 69**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Regular de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
21	"04°42'47.11"N	074°03'14.57"W	-90.80 dBm
22	"04°42'44.65"N	074°01'20.86"W	-90.40 dBm

*Nota.* Esta tabla señala 2 puntos de coordenadas referentes al nivel de potencia “Regular” de la señal RSRP. Elaboración propia.

**Tabla 70**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Potencia Nula de la Señal RSRP*

#	Latitud	Longitud	RSRP
23	"04°40'26.68"N	074°01'55.47"W	-109.40 dBm
24	"04°40'46.39"N	074°03'18.28"W	-106.60 dBm
25	"04°44'27.70"N	074°03'14.57"W	-109.00 dBm
26	"04°46'55.51"N	074°02'51.08"W	-108.40 dBm
27	"04°47'11.11"N	074°01'18.39"W	-108.80 dBm

*Nota.* En la tabla se indican 5 puntos de coordenadas geográficas referentes al nivel de potencia “Nula” de la señal RSRP. Elaboración propia.

En la figura 69, se muestran los cuatro (4) emplazamientos con el resultado de la potencia de señal radioeléctrica RSRP recibida y asignada por manchas de colores (Amarillo, azul , rojo y

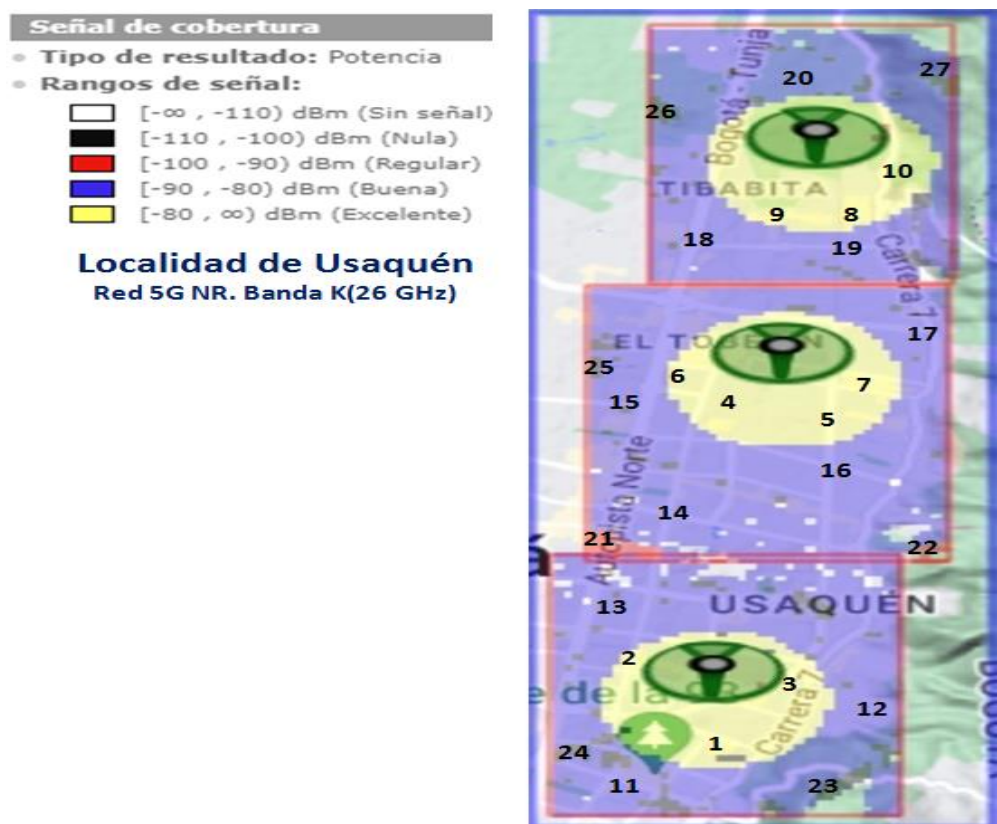
negro), permitiendo así, un cubrimiento óptimo a toda el área de la localidad de Usaquéen en un 98% aprox. con señales excelentes (Mancha amarilla ) y señales buenas (Mancha azul).

De este modo, el resultado de simulación emitido garantiza la prestación de eficientes servicios de telefonía celular en la banda K a los 50.953 usuarios Indoor (25%) y 152.861 usuarios Outdoor (75%).

De igual manera, se presenta una cantidad muy mínima de puntos blancos y negros, en donde la señal RSRP no llega, por motivo de ser bastante deficiente o totalmente nula.

**Figura 69**

*Niveles de Intensidad de la Señal de Cobertura Radioeléctrica*



*Nota.* La gráfica muestra las áreas de cobertura radioeléctrica de la señal RSRP diferenciada por colores. Adaptado (Xirio, 2023).

### ***Resultado de Interferencia***

En el análisis realizado en la localidad de Usaqué, se analizaron las señales RSSI, SS-RSRQ, DL-SINR y DL-SINR, que a continuación se explican con mayor detalle:

**Señal RSSI.** En la tabla 71, se muestran los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas seleccionados para analizar y evaluar la incidencia de la señal RSSI en la simulación con Xirio Online de la localidad de Usaqué.

**Tabla 71**

#### *Niveles de Potencia de la Señal RSSI*

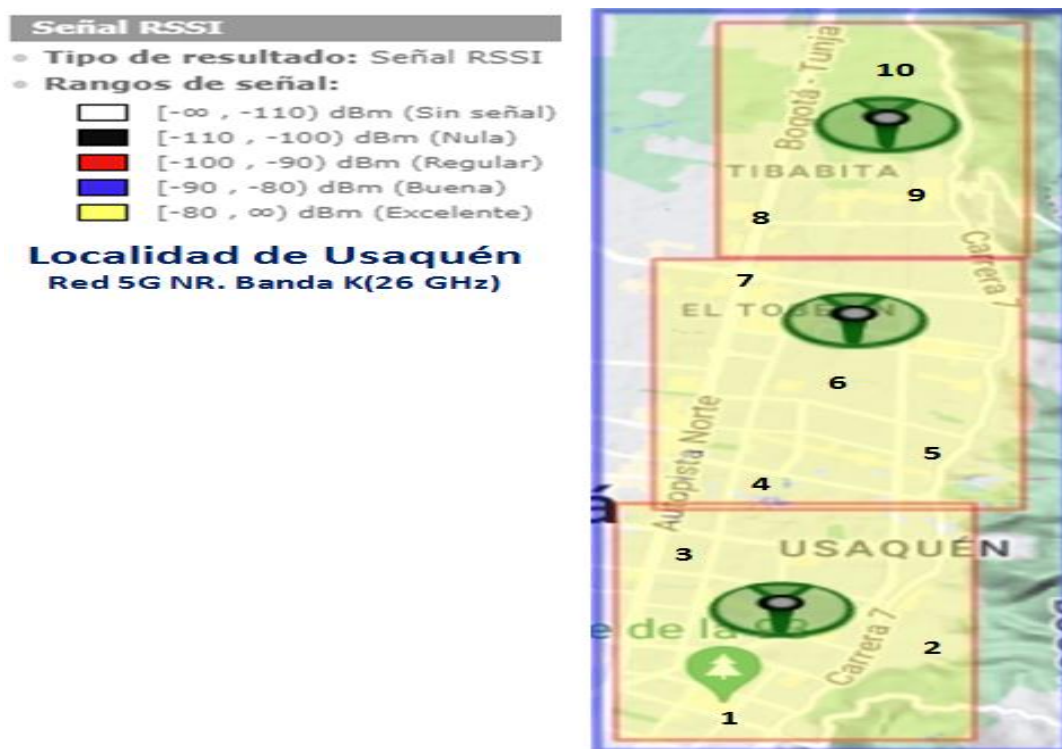
#	Latitud	Longitud	RSSI	Nivel
1	"04°40'25.45"N	074°02'54.79"W	-51.71 dBm	Excelente
2	"04°41'10.62"N	074°01'48.05"W	-50.11 dBm	Excelente
3	"04°42'12.21"N	074°03'05.92"W	-52.31 dBm	Excelente
4	"04°42'54.09"N	074°02'42.43"W	-56.61 dBm	Excelente
5	"04°43'13.80"N	074°01'43.11"W	-54.21 dBm	Excelente
6	"04°44'03.07"N	074°02'21.42"W	-41.21 dBm	Excelente
7	"04°45'04.24"N	074°02'47.38"W	-51.91 dBm	Excelente
8	"04°45'35.86"N	074°02'43.67"W	-53.41 dBm	Excelente
9	"04°45'55.15"N	074°01'51.76"W	-45.91 dBm	Excelente
10	"04°47'16.03"N	074°02'02.88"W	-50.41 dBm	Excelente

*Nota.* Esta tabla registra 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de potencia “Excelente” de la señal RSSI. Elaboración propia.

Los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas que se muestran en la figura 70, establecen que, en la totalidad de la localidad de Usaquéen, se obtiene una cobertura del 100% de señal RSSI con categoría de “Excelente”, perteneciente a la mancha de color amarillo en el rango adecuado de -41.21 a -56,61 dBm. Este eficiente resultado del indicador RSSI fue posible a la excelente intensidad de señal recibida, a la mínima afectación de ruidos e interferencias y también, al uso de señales de mayor frecuencia con mayor ancho de banda muy propias y presentes en la banda K.

**Figura 70**

*Niveles de Potencia de la Señal RSSI*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el área de cobertura del nivel de potencia de la señal RSSI.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Señal SS-RSRQ.** En la tabla 72, se relacionan los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas seleccionados para la medición de calidad de señal recibida RSRQ en los tres (3) sectores de la localidad de Engativá.

En la figura 71, se observa que, en toda la extensión de la localidad de Usaquén, se recibe una señal RSRQ de categoría “Buena” de calidad, cuyos valores se encuentran en el rango apropiado de -10.79 a -110.80 dB establecido en el estándar 3GGP y señalada por la mancha de color azul.

**Tabla 72**

*Puntos Seleccionados de Calidad de Señal SS-RSRQ*

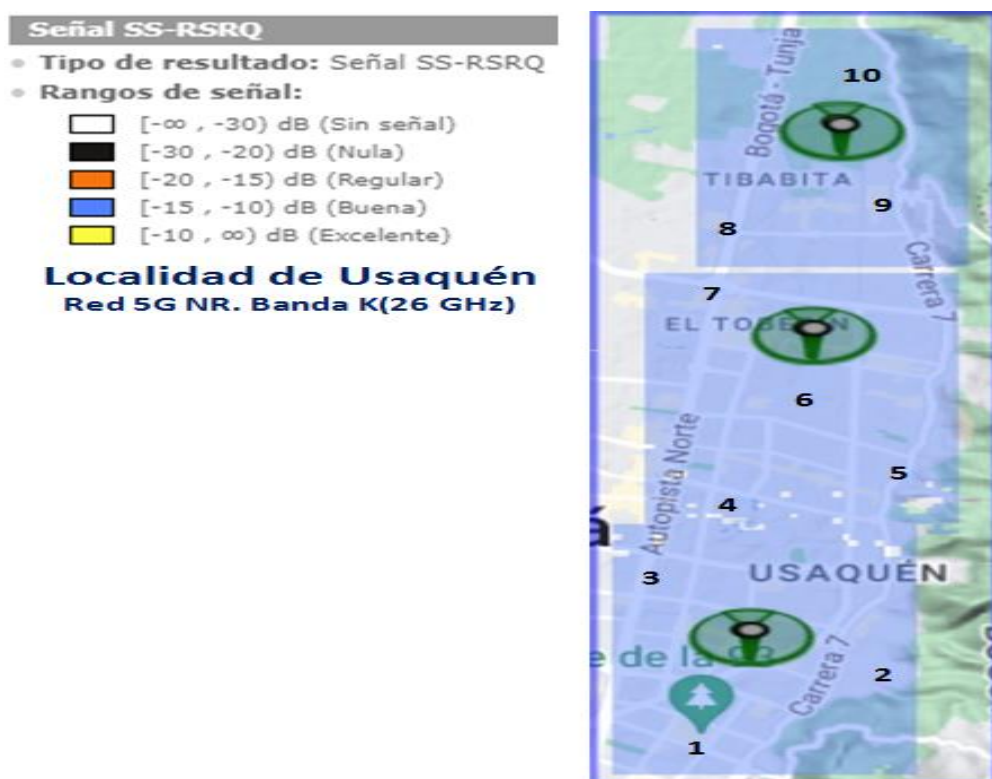
#	Latitud	Longitud	SS-RSRQ	Nivel
1	"04°40'24.63"N	074°02'56.03"W	-10.79 dB	Buena
2	"04°41'13.49"N	074°01'45.58"W	-10.79 dB	Buena
3	"04°42'11.39"N	074°03'14.57"W	-10.79 dB	Buena
4	"04°42'53.27"N	074°02'47.38"W	-10.80 dB	Buena
5	"04°43'10.51"N	074°01'35.69"W	10.79 dB	Buena
6	"04°43'58.55"N	074°02'15.24"W	-10.79 dB	Buena
7	"04°45'04.66"N	074°02'48.61"W	-10.79 dB	Buena
8	"04°45'38.73"N	074°02'42.43"W	-10.79 dB	Buena
9	"04°45'56.80"N	074°01'48.05"W	-10.79 dB	Buena
10	"04°47'15.21"N	074°02'01.65"W	-10.79 dB	Buena

*Nota.* Esta tabla relaciona 10 puntos de coordenadas geográficas con nivel de calidad “Buena” de la señal RSRQ. Elaboración propia.

Este parámetro, se obtuvo de la relación entre la potencia de señal recibida y la cantidad de ruidos e interferencias presentes en los sectores. Por consiguiente, la simulación con Xirio Online confirma la existencia de mayor señal RSRP y baja afectación de ruidos y perturbaciones en la estimación del nivel de calidad de la señal RSRQ.

**Figura 71**

*Nivel de Calidad de Señal SS-RSRQ*



*Nota.* En esta gráfica se observa el área de cobertura de calidad de la señal RSRQ. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace DL-SINR.** En la tabla 73, se observan el total de quince (15) puntos aleatorios seleccionados de la señal downlink DL-SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) de la localidad de Usaquén, donde los primeros cinco (5) puntos de coordenadas geográficas ubicados

en la zona de color amarillo, pertenecen a emplazamientos con una señal de “Excelente” calidad, los siguientes cinco (5) puntos aleatorios ubicados en la zona de color azul, pertenecen a una señal de nivel “Buena” y los restantes cinco (5) corresponden a una señal de nivel “Regular”.

**Tabla 73**

*Puntos Seleccionados de Nivel de Interferencia Downlink DL-SINR*

#	Latitud	Longitud	DL-SINR	Nivel
1	"04°40'29.15"N	074°02'58.50"W	38.62 dB	Excelente
2	"04°42'03.59"N	074°02'44.90"W	40.12 dB	Excelente
3	"04°43'31.04"N	074°02'16.48"W	39.92 dB	Excelente
4	"04°45'25.59"N	074°02'23.89"W	37.12 dB	Excelente
5	"04°47'23.42"N	074°02'44.90"W	35.52 dB	Excelente
6	"04°40'43.93"N	074°02'30.07"W	21.32 dB	Buena
7	"04°40'53.78"N	074°03'10.86"W	18.12 dB	Buena
8	"04°42'39.72"N	074°02'20.19"W	18.51 dB	Buena
9	"04°45'01.37"N	074°02'05.35"W	18.72 dB	Buena
10	"04°46'05.01"N	074°01'25.80"W	18.92 dB	Buena
11	"04°40'17.57"N	074°02'51.86"W	13.52 dB	Regular
12	"04°42'38.82"N	074°01'41.41"W	17.74 dB	Regular
13	"04°44'28.45"N	074°03'14.11"W	13.22 dB	Regular
14	"04°46'53.38"N	074°02'51.86"W	14.22 dB	Regular
15	"04°47'08.57"N	074°01'42.65"W	17.42 dB	Regular

*Nota.* Esta tabla registra 15 puntos de coordenadas geográficas de la señal de interferencia del enlace downlink con niveles de “Excelente”, “Buena” y “Regular. Elaboración propia.

En la figura 72, se muestra la ubicación los quince (15) puntos aleatorios escogidos de señal de interferencia e igualmente, se muestra el efecto de la simulación en Xirio online de la señal de interferencia DL-SINR en los tres (3) sectores de la localidad de Usaqué, que determinó una mayor cobertura del 96% aprox. con nivel de “Excelente” demarcada por la mancha amarilla, que denota la existencia de señales radioeléctricas en el canal downlink de alta potencia y baja afectación de ruidos e interferencias. Así mismo, se muestran pocos puntos de manchas azules y rojas que indican presencia de señales DL-SINR con categorías “Buena” y “Regular”. Este resultado obedeció a las excelentes condiciones de ondas radiales de alta frecuencia y mayor ancho de banda que funcionan en la banda K (26 GHz).

### Figura 72

*Gráfica de Interferencia de Enlace Downlink DL-SINR*



*Nota.* En la gráfica se muestra la cobertura de interferencia del enlace downlink DL-SINR.

Adaptado de (Xirio Online, 2023).

**Enlace Uplink UL-SINR.** En la tabla 74, se registran los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas geográficas seleccionados para realizar la simulación y comparación en Xirio online y de esa manera poder determinar el nivel de potencia y existencia de ruidos en la señal de interferencia UL-SINR del enlace uplink de la red 5G NR.

**Tabla 74**

*Interferencia de Enlace Uplink*

#	Latitud	Longitud	UL-SINR	Nivel
1	"04°40'23.93"N	074°02'57.63"W	17.10 dB	Excelente
2	"04°41'12.80"N	074°01'43.47"W	18.30 dB	Excelente
3	"04°41'53.45"N	074°03'13.70"W	18.20 dB	Excelente
4	"04°42'53.19"N	074°02'47.74"W	12.20 dB	Excelente
5	"04°43'30.76"N	074°01'57.07"W	18.40 dB	Excelente
6	"04°44'08.94"N	074°02'42.80"W	22.60 dB	Excelente
7	"04°45'00.27"N	074°01'48.41"W	19.60 dB	Excelente
8	"04°45'51.59"N	074°02'09.43"W	22.10 dB	Excelente
9	"04°46'51.94"N	074°02'44.03"W	18.00 dB	Excelente
10	"04°47'16.98"N	074°02'03.25"W	18.00 dB	Excelente

*Nota.* La tabla registra 10 puntos de coordenadas geográficas de la señal de interferencia del enlace uplink con nivel “Excelente”. Elaboración propia.

En la figura 73, se observa la cobertura de señal UL-SINR en el canal uplink con categoría de “Excelente” y con un máximo del 100% de presencia en la localidad de Usaquén. De esta manera, se logra un eficiente de tráfico de datos entre la terminal de usuario (UE) y la

estación (BS) de la red de telefonía móvil. Este excelente resultado se consigue gracias a óptimas condiciones de las ondas de radio de alta frecuencia, que poseen menor longitud de onda y mayor ancho de banda, muy propias en el funcionamiento de la banda K (26 GHz).

### Figura 73

*Gráfica de Interferencia de Enlace Ascendente*



*Nota.* La gráfica indica la cobertura de interferencia del enlace uplink UL-SINR. Adaptado de (Xirio Online, 2023).

### **Resultado de Capacidad**

Este resultado comprende la generación de informes y gráficas con el registro de valores de ancho de banda, carga de tráfico y otros datos sectorizados de la localidad de Usaquéen, con referencia al desempeño de los equipos y antenas de la red 5G NR.

**Informe de Throughput y Gráfica de Ancho de Banda.** En la tabla 75, se observan los resultados comparativos de capacidad de la red 5G NR obtenidos con la simulación Xirio online

referente al funcionamiento de la red de telefonía móvil en la banda K (26 GHz). Los resultados señalan que la red es capaz de dar servicios suficientes a los 125.500 usuarios estimados en cada sector (3 sectores) con una carga de tráfico promedio estimada del 11,76%, lo cual demuestra, que la red puede ser expandida a futuro. Con relación a los indicadores de throughput máximo en el enlace downlink DL-ThP, se presenta una velocidad máxima de tráfico de datos de 160 Gbps entre la estación base (NB) y la terminal de usuario (UE) y para el enlace uplink UL-ThP una velocidad máxima de 22 Gbps entre la terminal de usuario (UE) y la estación base (NB), Con relación al throughput garantizado, el informe arrojó datos únicamente de velocidad garantizada en el enlace uplink de 13,13 Gbps entre la terminal de usuario (UE) y la estación base (NB). Según el análisis efectuado, los datos de velocidad y rendimiento mencionados se encuentran dentro del estándar 3GPP Release 15, que establece velocidades de transferencia de datos de hasta 20 Gbps en el enlace downlink y 10 Gbps en el enlace uplink. (Rodhe&Schwarz, 2022).

### Tabla 75

*Informe de Throughput: Cobertura Multitransmisor Usaquén 5G NR (26 GHz)*

Localidad	Número Usuarios	Carga Tráfico (%)	DLThP Máx. (kbps)	ULThP Máx. (kbps)	DLThP Gar. (kbps)	DLThP No Gar. (kbps)	ULThP Gar. (kbps)	ULThP No Gar. (kbps)
Usaquén1	125.500	11,76	160.062,88	22.386,42	18.825	0	12.719,9	0
Usaquén2	125.500	11,76	160.062,88	22.386,42	18.825	0	12.291,87	0
Usaquén3	125.500	11,76	160.062,88	22.386,42	18.825	0	13.904,38	0

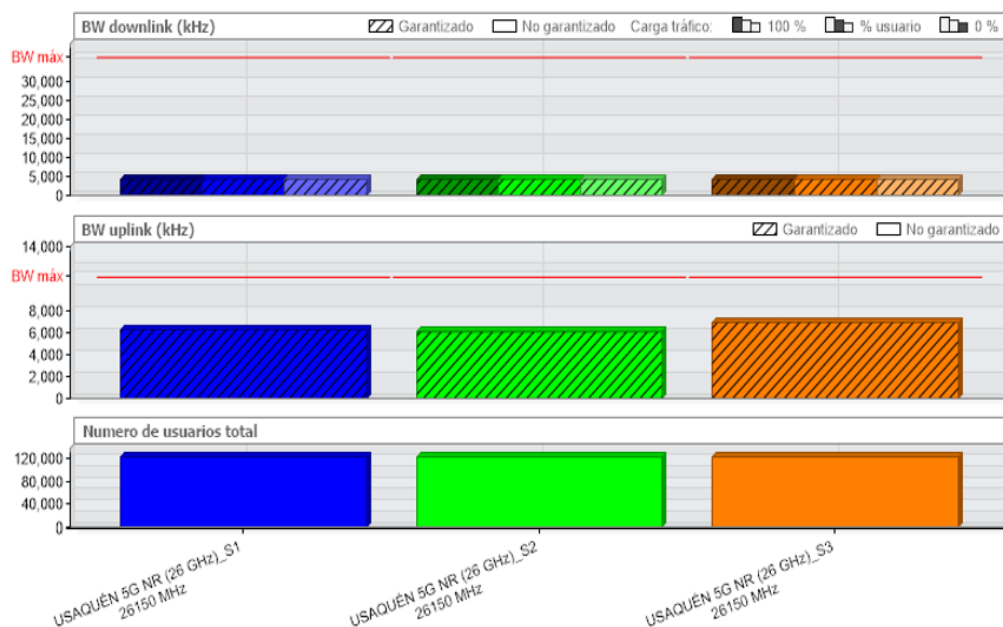
*Nota.* La tabla muestra los datos del Informe de throughput referente a la velocidad de tráfico de datos de los transmisores de la localidad de Usaquén. Adaptado (Xirio, 2023).

En la figura 74, se muestra el resultado gráfico de barras del enlace downlink con un ancho de banda garantizado de 4,22 GHz para el enlace de la estación base (BS) con las

terminales de usuario (UE) y también, el proceso en el canal uplink con un ancho de banda garantizado de 6,35 GHz, para el enlace de las terminales de usuario (UE) con las estaciones base de la red 5G NR. De esta manera, se consigue mayor velocidad y potencia en el tráfico de datos debido a que en la banda K, las ondas de radio tienen mayor ancho de banda y funcionan a altas frecuencias. De este modo, se concluye que los valores de anchos de banda garantizados permiten atender con suficiencia los servicios de comunicaciones de los 125.500 usuarios estimados en cada uno de los cuatro (3) sectores de la localidad.

**Figura 74**

*Gráfica de Ancho de Banda BW*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento del ancho de banda BW máximo downlink y uplink del estudio efectuado en la localidad de Usaquén. Adaptado de (Xirio, 2023)

## **Análisis Comparativo de las Simulaciones de la Red 5G NR en las Localidades de Suba, Engativá y Usaquéen de la Ciudad de Bogotá**

En el presente capítulo se realiza el análisis comparativo de los resultados obtenidos en los procesos de simulación de la red 5G NR en las bandas C (3,5 GHz) y K (26 GHz) aplicando el software Xirio Online en las tres (3) localidades.

Para establecer el comportamiento comparativo y tendencias de la cobertura y potencia de las señales radioeléctricas entre localidades y bandas de frecuencia, se aplicaron las siguientes funciones estadísticas de Promedio y Desviación Estándar:

Función Promedio, es un indicador, también denominado media aritmética que mide la tendencia central de un grupo de números en una distribución estadística. (Microsoft, 2023).

$$\bar{X} = \frac{x_1+x_2+x_3+x_4+\dots+x_n}{N} \quad (2)$$

Desviación Estándar, es una medida, también denominada desviación típica que permite ofrecer información sobre la dispersión media de una variable. Esta media siempre será mayor o igual cero. (López, 2020).

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Donde:

S = Desviación Estándar

$\sum$  = Sumatoria.

X = Cada valor.

$\bar{X}$  = Media aritmética.

n = Número de valores.

## Comparativo de Resultados de Cobertura e Interferencia en las Tres (3) Localidades para la Banda 3.5 GHz)

En la siguiente serie de tablas y gráficas se presentan los resultados del análisis estadístico realizado a los valores hallados en los procesos de simulación con el software Xirio Online en la banda C (3.5 GHz).

### *Resultados de Cobertura Multitransmisor*

En este punto se presenta gráficamente el resultado comparativo de las muestras tomadas de cobertura multitransmisor de la señal RSRP en las tres (3) localidades.

**Señal SS-RSRP Excelente.** Según los datos promedio (dBm) de la tabla 76, las localidades de Suba, Engativá y Usaquén reciben una excelente cobertura de señal de radio RSRP cuyos valores están por debajo del tope de -80 dBm, lo cual significa una eficiente recepción de potencia en las terminales de usuario (UE).

### **Tabla 76**

#### *Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente*

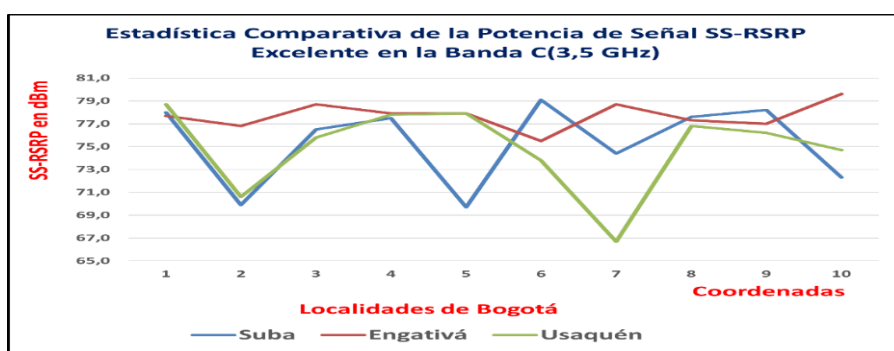
Señal SS-RSRP (dBm) Excelente. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-75,32	-77,71	-74,90
Desviación Estándar	3,53	1,15	3,73

*Nota.* La tabla muestra la comparación en las 3 localidades de los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP con categoría de “Excelente”. Elaboración propia.

En la figura 75, se muestra el comportamiento comparativo de las señales de potencia RSRP, presentando mayor variación de señal las localidades de Suba y Usaquén con tres (3) picos de mejor señal en los puntos de coordenadas 2, 5 y 7, debido a la cercanía con las antenas; mientras que la variación en la localidad de Usaquén se mantiene más o menos constante.

**Figura 75**

*Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente*



*Nota.* Comparativo de señal RSRP de nivel “Excelente” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal SS-RSRP Buena.** Según los datos de promedio (dBm) de la tabla 77, la cobertura de potencia de señal es de nivel bueno, cuyos valores se mantienen dentro del rango apropiado del estándar 3GPP.

**Tabla 77**

*Comparativo de Señales SS-RSRP Buena*

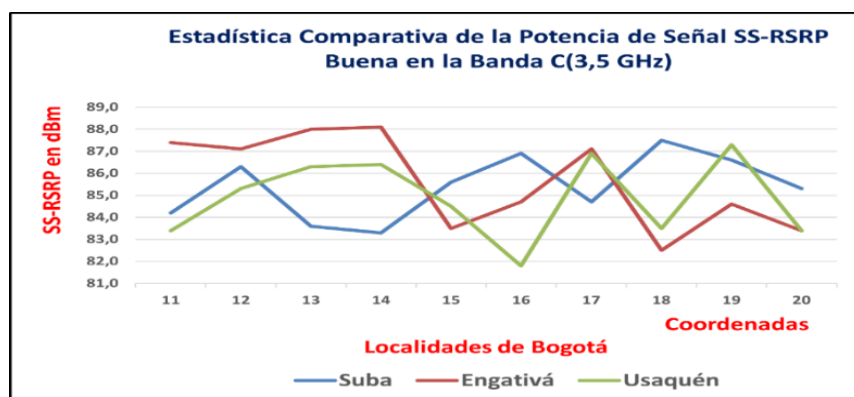
Señal SS-RSRP (dBm) Buena. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-85,40	-85,64	-84,88
Desviación Estándar	1,44	2,12	1,84

*Nota.* La tabla muestra la comparación en las 3 localidades de los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP con categoría de “Buena”. Elaboración propia.

En la figura 76, las variaciones de señal RSRP en las tres (3) localidades son parecidas con picos de potencia de nivel bueno que oscilan entre  $\pm$  -82 a -88 dBm, siendo menos buenos los puntos cercanos a -82 dBm y más buenos los cercanos a -88 dBm. En este caso, los puntos de medición se posicionan en sectores intermedios entre las antenas y los bordes de las celdas. Sin embargo, se nota una mayor dispersión de señal en la localidad de Engativá.

### Figura 76

#### *Comparativo de Señales SS-RSRP Buena*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento comparativo de la señal RSRP de nivel “Buena” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal SS-RSRP Regular.** En la tabla 78, se observan los valores promedio (dBm) de señal de potencia RSRP en las tres (3) localidades de nivel regular, los cuales se encuentran dentro del rango normal de  $\pm$  90,5 a 97,5 dBm, más cercanos a los bordes de las celdas.

**Tabla 78***Comparativo de Señales SS-RSRP Regular*

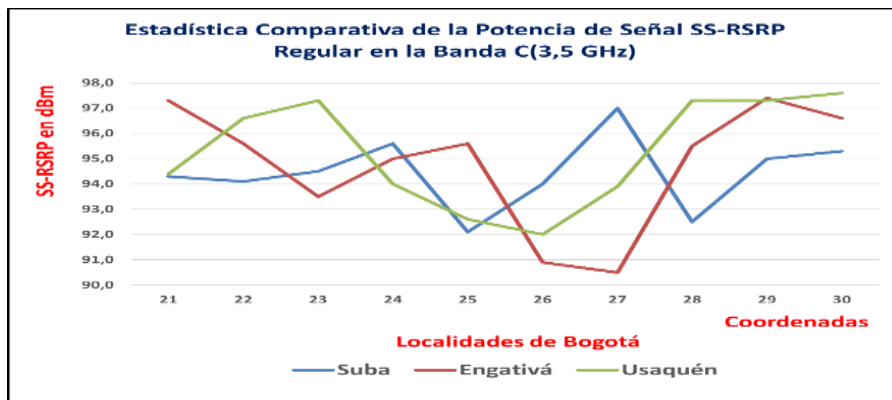
Señal SS-RSRP (dBm) Regular. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-94,44	-94,79	-95,30
Desviación Estándar	1,43	2,44	2,15

*Nota.* La tabla muestra la comparación en las 3 localidades de los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP con categoría de “Regular”. Elaboración propia.

En la figura 77, se aprecia el comportamiento muy similar de la señal de potencia RSRP en las tres (3) localidades, es decir al comienzo la potencia en los puntos de coordenadas 21, 22 y 23 es de nivel menos regular, luego la potencia disminuye para las localidades de Engativá y Usaquén en los puntos 26 y 27 con valores de mayor nivel regular.

Finalmente, la potencia se incrementa en los puntos 28 y 29 para estas dos (2) últimas localidades a un nivel más regular de -97 dBm. En este caso la mayor variación de señal de potencia se presenta en la localidad de Engativá.

Aunque, se advierte que todos los puntos de potencia analizados están dentro del rango normal 3GGP correspondiente a sectores muy cercanos a los bordes de las celdas y por supuesto a mayor distancia de las antenas.

**Figura 77***Comparativo de Señales SS-RSRP Regular*

*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento comparativo de la señal RSRP de nivel “Regular” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal SS-RSRP Nula.** En la tabla 79, están los valores promedio (dBm) de señal de potencia RSRP de nivel “Nula”, donde la potencia que irradian las antenas de las estaciones no llega a los sitios ubicados por fuera de las celdas en las tres (3) localidades. Se corrobora esta pérdida de potencia de señal con los valores promedio que están por encima de -100 dBm.

**Tabla 79***Comparativo de Señales SS-RSRP Nula*

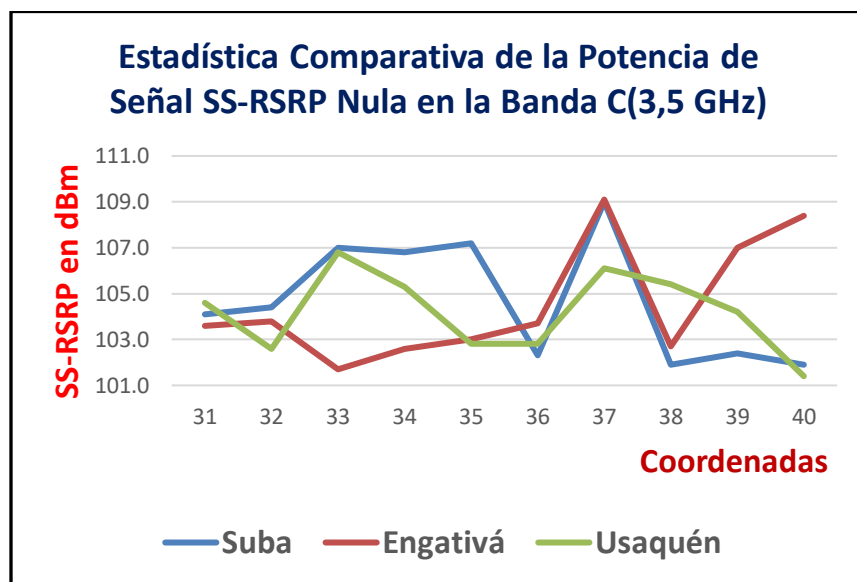
Señal SS-RSRP (dBm) Nula. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-104,70	-104,60	-104,20
Desviación Estándar	2,61	2,61	1,74

*Nota.* La tabla muestra la comparación en las 3 localidades de los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP con categoría de “Nula”. Elaboración propia.

En la figura 78, la variación de la señal de potencia RSRP es muy similar en las localidades de Suba y Usaquéen a diferencia de la localidad de Engativá que presenta mayor dispersión, pero es de anotar que todos los puntos de coordenadas geográficas de señal RSRP se encuentran dentro del rango apropiado de  $\pm -102,5$  a  $109,1$  -dBm correspondiente a sectores con nivel nulo o carentes de potencia de señal.

### Figura 78

*Comparativo de Señales SS-RSRP Nula*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento comparativo de la señal RSRP de nivel “Nula” en las 3 localidades. Elaboración propia.

### Resultados de Interferencia

En esta parte se comparan y analizan las muestras tomadas de puntos aleatorios de coordenadas geográficas por localidades de las señales RSSI, RSRQ, DL-SINR y UL-SINR.

**Señal RSSI Excelente.** En la tabla 80, se observan los valores promedio (dBm) de la fuerza de señal RSSI de las tres (3) localidades, los cuales son de nivel excelente, teniendo en cuenta que están por debajo de -80 dBm de conformidad al estándar 3GPP. Esto quiere decir que la potencia de señal RSRP es mínimamente afectada por ruidos e interferencias.

**Tabla 80**

*Comparativo de Señales RSSI Excelente*

Señal RSSI (dBm) Excelente. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-60,49	-64,61	-65,97
Desviación Estándar	9,36	7,48	5,62

*Nota.* Esta tabla registra los valores promedio y desviación estándar de la señal RSSI con nivel de “Excelente”. Elaboración propia.

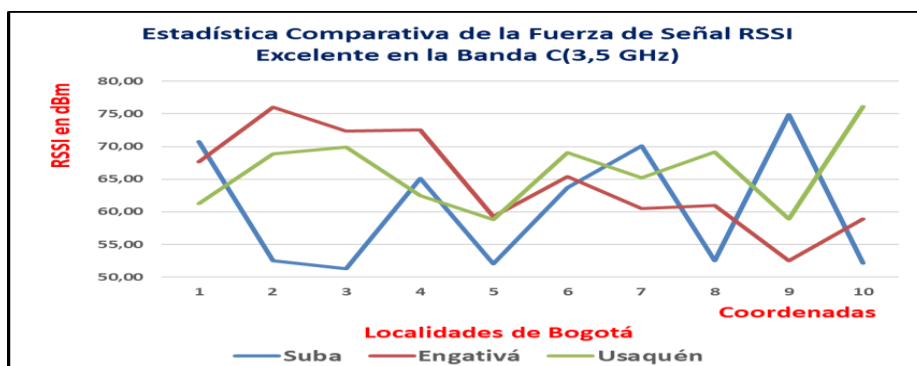
En la figura 79, en la localidad de Suba se observa una mayor dispersión en la fuerza de señal RSSI que fluctúa con valores muy excelentes en los puntos 2, 3, 5 y 8, y valores menos excelentes en los puntos 1, 4, 7 y 9, pero haciendo la salvedad que la fuerza señal es muy eficiente, con mínimas interferencias, debido a que toda su longitud está muy por debajo de -80 dBm.

Con respecto a las localidades de Engativá y Usaquén, la fuerza de señal presenta menor dispersión, su recorrido es más uniforme, pero se nota que la fuerza de señal, aunque sigue

siendo de nivel excelente, es más afectada por ruidos e interferencia, ya que sus valores están más cerca de -80 dBm.

### Figura 79

*Comparativo de Señales RSSI Excelente*



*Nota.* Esta gráfica muestra el comportamiento comparativo de la señal RSSI de categoría “Excelente” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal RSSI Buena.** En la tabla 81, se muestran los valores promedio (dBm) de fuerza de señal RSSI para las tres (3) localidades con nivel de “Buena”, los cuales se encuentran dentro del rango normal de -80 a -90 dBm, con una la fuerza de señal muy eficiente, pero susceptible de ser afectada por ruidos e interferencias.

### Tabla 81

*Comparativo de Señales RSSI Buena*

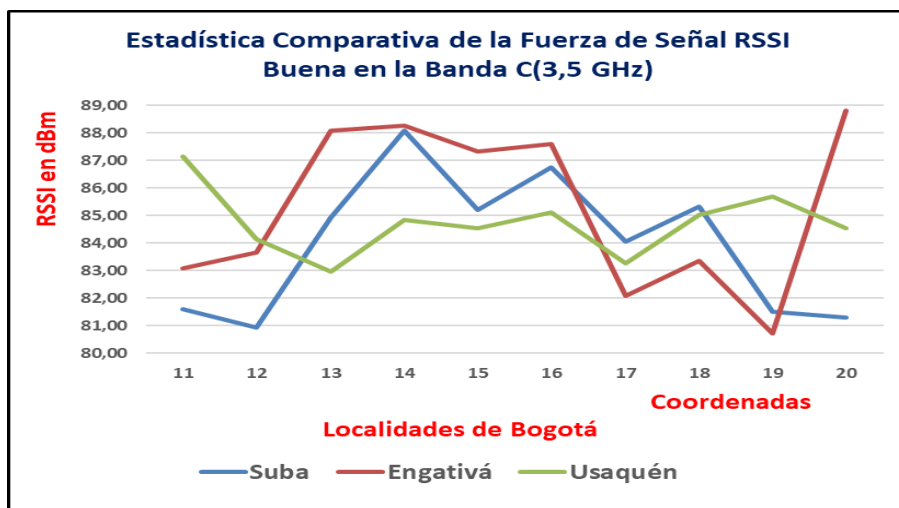
Señal RSSI (dBm) Buena. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-83,97	-85,31	-84,73
Desviación Estándar	2,52	3,00	1,18

*Nota.* Esta tabla registra los valores promedio y desviación estándar de la señal RSSI con nivel de “Buena”. Elaboración propia.

La figura 80, muestra que la localidad de Engativá presenta mayor dispersión de datos, debido a la ubicación aleatoria de los puntos de coordenadas geográficas seleccionados, lo cual indica que los puntos 11, 12, 17 y 19 poseen una fuerza de señal RSSI muy buena y poca presencia de ruido (Más cerca de antenas), mientras los puntos 13, 14, 15, 16 y 20 la fuerza de señal disminuye por afectación de mayor ruido (Más lejos de antenas), pero sigue siendo buena por encontrarse dentro del rango de -80 a -90 dBm. Las localidades de Suba y Usaquéen presentan menos dispersión, con altibajos de fuerza en algunos puntos, pero de todas sigue siendo de nivel buena.

### Figura 80

*Comparativo de Señales RSSI Buena*



*Nota.* Esta gráfica muestra el comportamiento comparativo de la señal RSSI de categoría “Buena” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal RSRQ Buena.** En la tabla 82, se registran los valores promedio (dBm) con nivel bueno de calidad de señal RSRQ, lo cual significa que las tres (3) localidades reciben una cobertura de señal radioeléctrica eficiente en potencia, fuerza y velocidad, ya que los mismos valores se ubican dentro del rango normal de -10 a -15 dB.

**Tabla 82**

*Comparativo de Señales SS-RSRQ Buena*

Señal RSRQ (dB) Buena. Banda 3,5 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dB)	-11,14	-10,80	-10,80
Desviación Estándar	0,74	0,02	0,01

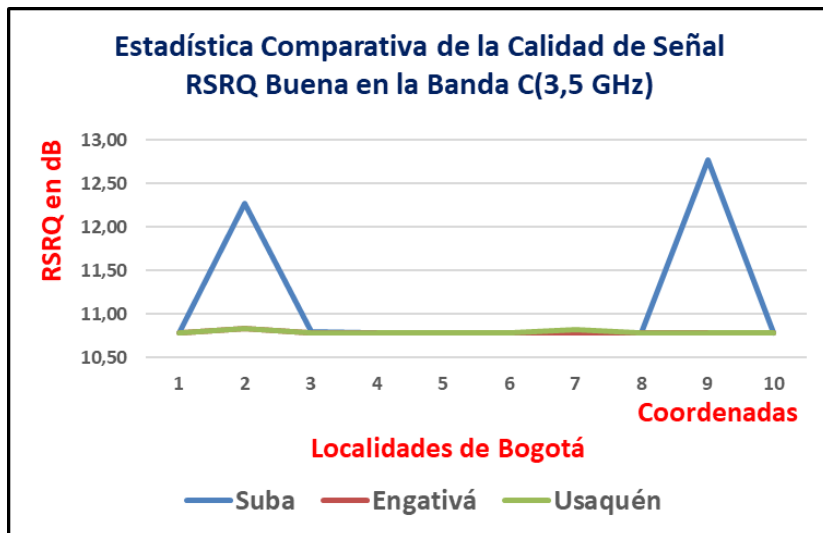
*Nota.* La tabla muestra los valores promedio y desviación estándar de la calidad de señal RSRQ con nivel de “Buena” en las 3 localidades. Elaboración propia.

En la figura 81, se observa que las tres (3) localidades poseen baja dispersión a excepción de la localidad de Suba que presenta en los puntos 2 y 9, picos de regular calidad de señal RSRQ, ocasionados por ubicación aleatoria de los dos (2) puntos de coordenadas geográficas al lado opuesto a la emisión de señal radioeléctrica de las antenas.

Sin embargo, se corrobora que la calidad de señal RSRQ es buena en las tres (3) localidades por estar dentro del rango adecuado de -10 a -15 dB.

**Figura 81**

*Comparativo de Señales RSRQ Buena*



*Nota.* En esta gráfica se aprecia el comportamiento comparativo de la calidad de señal RSRQ de categoría “Buena” para las 3 localidades. Elaboración propia.

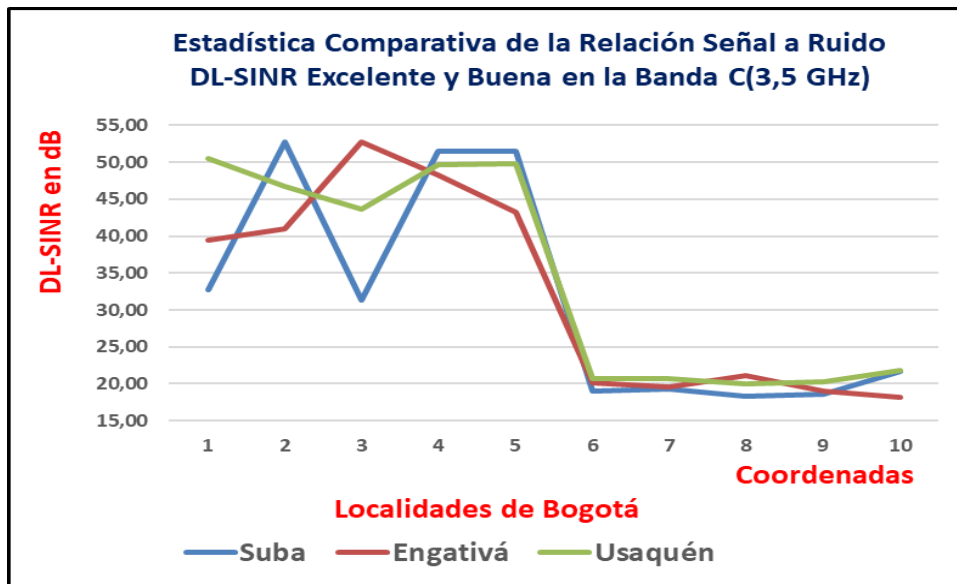
**Señal Downlink DL-SINR.** En la Figura 82, se observa el comportamiento de los quince (15) puntos aleatorios de coordenadas geográficas referentes a la medición de la relación señal a ruido DL-SINR en el enlace downlink de las tres (3) localidades.

Inicialmente, se aprecia una “Excelente” calidad de señal entre los puntos del 1 al 5 de coordenadas geográficas.

Luego, entre los puntos del 5 al 6 se disminuye la calidad a nivel “Buena” y finalmente se degrada la calidad de la señal a un nivel de “Regular” entre los puntos del 6 al 10 por afectación de mayores niveles de ruidos e interferencias.

Figura 82

Comparativo de Señales downlink DL-SINR



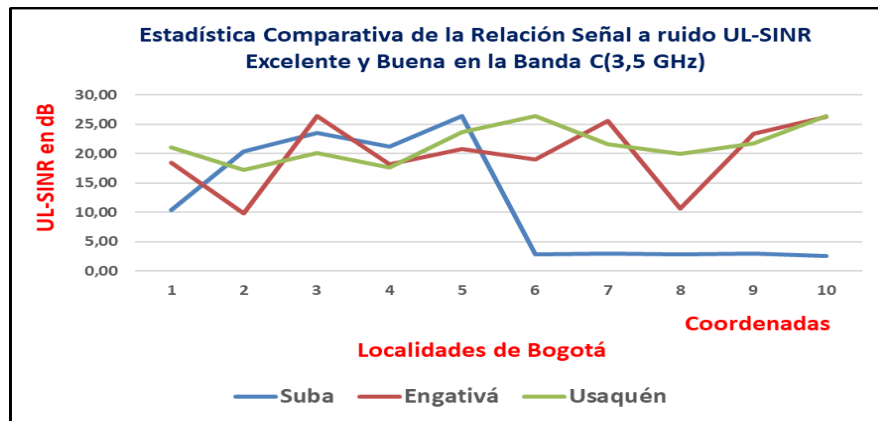
*Nota.* En esta gráfica se observa el comportamiento comparativo del enlace downlink DL-SINR en las categorías “Excelente” y “Buena” para las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal Uplink UL-SINR.** En este caso se aprecia en la figura 83 la señal uplink UL-SINR, correspondiente a una relación señal a ruido con categorías de totalmente “Excelente” en las localidades de Engativá y Usaquén, donde la simulación demuestra poca afectación de ruido e interferencias en las comunicaciones móviles.

De otro lado, la localidad de Suba arrojó niveles combinados entre “Excelente y “Buena” en los puntos del 6 al 10, posiblemente, este último tramo es afectado con mayores niveles de interferencias.

**Figura 83**

*Comparativo de Señales uplink UL-SINR*



*Nota.* En esta gráfica se aprecia el comportamiento comparativo del enlace uplink UL-SINR en las categorías “Excelente” y “Buena” para las 3 localidades. Elaboración propia.

### **Comparativo de Resultados de Cobertura e Interferencia en las Tres (3) Localidades para la Banda 26 GHz)**

En las siguientes tablas y gráficas se registran y analizan las medidas estadísticas de la comparación de señales de simulación de la red 5G NR en la banda K (26 GHz).

#### ***Resultados de Cobertura***

Este resultado hace referencia a los cálculos efectuados con los valores de puntos aleatorios de coordenadas por localidades de la señal SS-RSRP.

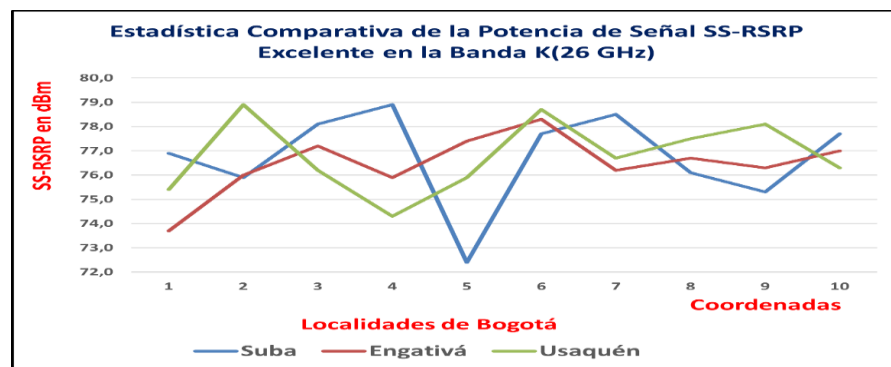
**Señal SS-RSRP Excelente.** En la tabla 83, se registra la muestra de diez (10) puntos aleatorios de coordenadas tomadas en las tres (3) localidades, cuyos valores promedio (dBm) se encuentran por debajo de -80 dBm indicando que la señal de potencia RSRP es de nivel “Excelente”.

**Tabla 83***Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente*

Señal SS-RSRP (dBm) Excelente. Banda 26 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-76,75	-76,47	-76,80
Desviación Estándar	1,93	1,22	1,48

Nota. La tabla registra los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP en la banda K con categoría de “Excelente”. Elaboración propia.

En la figura 84, se observa que la dispersión es similar en las tres (3) localidades, a excepción de la localidad de Suba, que presenta un pico en el punto 5 donde se baja la potencia de la señal a -72,4 dBm, debido a la localización de la coordenada geográfica detrás de la antena donde no recibe señal de potencia.

**Figura 84***Comparativo de Señales SS-RSRP Excelente*

Nota. Banda K de la señal RSSP de nivel “Excelente” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal SS-RSRP Buena.** Se observa en la tabla 84, el promedio (dBm) de potencia de la señal RSRP de buena calidad en las localidades de Suba, Engativá y Usaquén dentro de la métrica normal del estándar 3GPP de -82 a -89 dBm.

**Tabla 84**

*Comparativo de Señales SS-RSRP Buena*

Señal SS-RSRP (dBm) Buena. Banda 26 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-84,89	-84,50	-83,97
Desviación Estándar	2,20	1,48	1,69

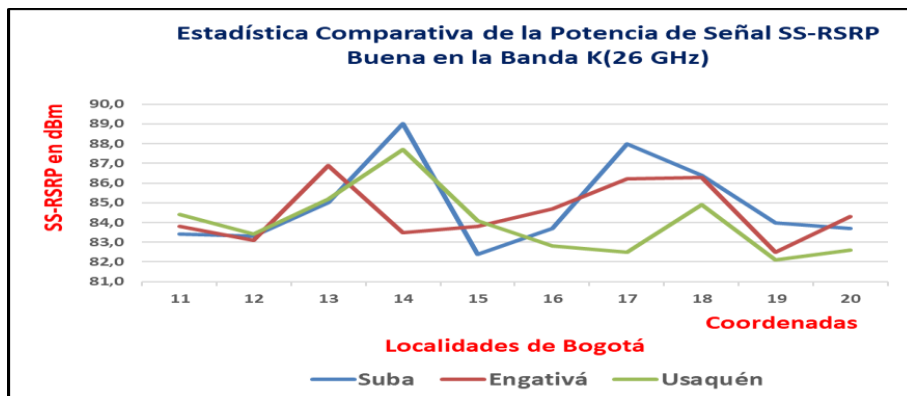
*Nota.* La tabla muestra los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP en la banda K con categoría de “Buena”. Elaboración propia.

Con relación al grado de dispersión, en la figura 85 se aprecia mayor variación de la potencia de señal RSRP en la localidad de Suba,

Estas condiciones favorables se generan más exactamente en los puntos de coordenadas geográficas 14 y 17 donde disminuye la potencia de señal por motivo de encontrarse estos sitios más alejadas de la ubicación de las antenas.

**Figura 85**

*Comparativo de Señales SS-RSRP Buena*



*Nota.* Esta gráfica evidencia el comportamiento comparativo en la banda K de la señal RSSP de nivel “Buena” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal SS-RSRP Regular.** La tabla 85, registra los valores promedio (dBm) de potencia de la señal RSRP de nivel “Regular” para las tres (3) localidades en el rango normal de -90 a -100 dBm.

**Tabla 85**

*Comparativo de Señales SS-RSRP Regular*

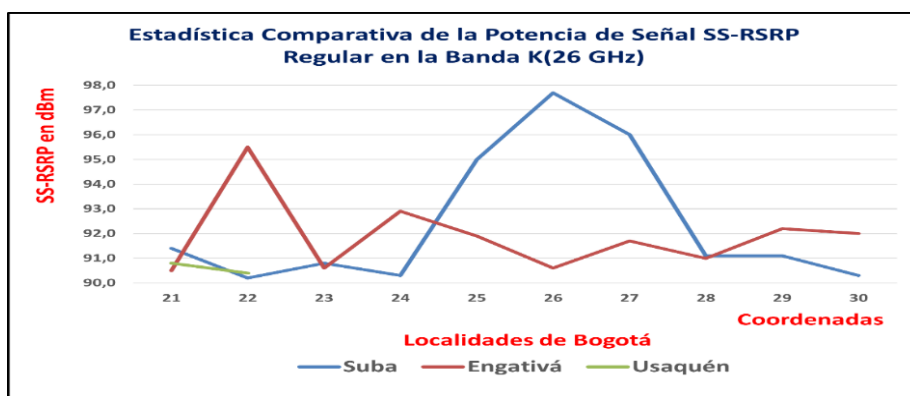
Señal SS-RSRP (dBm) Regular. Banda 26 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-92,39	-91,89	-90,60
Desviación Estándar	2,76	1,50	0,28

*Nota.* La tabla registra los valores promedio y desviación estándar de la señal RSRP en la banda K con categoría de “Regular”. Elaboración propia.

La figura 86, muestra el comportamiento de la variación de señal de potencia RSRP de nivel “Regular”, de las tres (3) localidades, denotando mayor dispersión en la localidad de Suba con presencia de un pico de disminución de la señal en el punto 26, cuya coordenada geográfica se ubica en el sitio Parque Mirador de los nevados, el cual está rodeado de bastante vegetación arbórea, que probablemente interfiere en la calidad de la señal.

### Figura 86

#### *Comparativo de Señales SS-RSRP Regular*



*Nota.* En la gráfica se evidencia el comportamiento comparativo en la banda K de la señal RSSP de nivel “Regular” en las 3 localidades. Elaboración propia.

### **Resultados de Interferencia**

En esta parte se realiza el comparativo y análisis de las muestras de puntos aleatorios de coordenadas geográficas seleccionadas en las tres (3) por localidades de las señales RSSI, RSRQ, DL-SINR y UL-SINR.

**Señal RSSI Excelente.** En la tabla 86, se registran los valores promedio (dBm) de fuerza de señal RSSI para las tres (3) localidades con nivel de “Excelente”, los cuales se encuentran dentro del rango normal de -80 a -90 dBm, con una fuerza de señal óptima para la banda K, pero

susceptible de ser afectada por interferencias. La señal RSSI, que denota la fuerza de señal radioeléctrica en comunicaciones celulares, se presenta para este resultado en los diez (10) puntos aleatorios de coordenadas de las tres (3) localidades registradas en la tabla 88, los cuales muestran un promedio de señal con nivel “Excelente” muy por debajo de -80 dBm y que genera coberturas fuertes señal RSSI en las mismas localidades. Así mismo, en la gráfica 95 se observa la comparación relativa de la dispersión de las tres (3) curvas que igualmente demuestran la eficiencia de cobertura total en comunicaciones para la banda K (26 GHz).

### **Tabla 86**

#### *Comparativo de Señales RSSI Excelente*

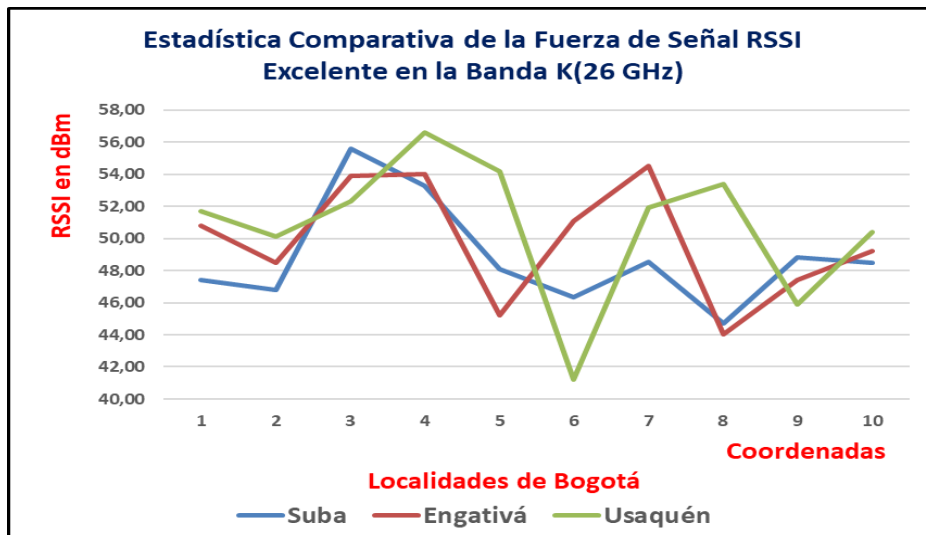
Señal RSSI (dBm) Excelente. Banda 26 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dBm)	-48,82	-49,87	-50,78
Desviación Estándar	3,27	3,68	4,38

*Nota.* La tabla muestra los valores promedio y desviación estándar en la banda K de la señal RSSI de nivel “Excelente” en las 3 localidades. Elaboración propia.

En la figura 87, se observa el comportamiento de la fuerza de señal RSSI de las tres (3) localidades, siendo evidente la mayor dispersión en la localidad de Usaquén que presenta una disminución de la fuerza de señal en la coordenada del punto 4, por lejanía de la antena y un incremento de la fuerza de señal en el punto 6, que está mucho más cerca de la antena.

**Figura 87**

*Comparativo de Señales RSSI Excelente*



*Nota.* La gráfica indica el comportamiento comparativo en la banda K de la señal RSSI de nivel “Excelente” en las 3 localidades. Elaboración propia.

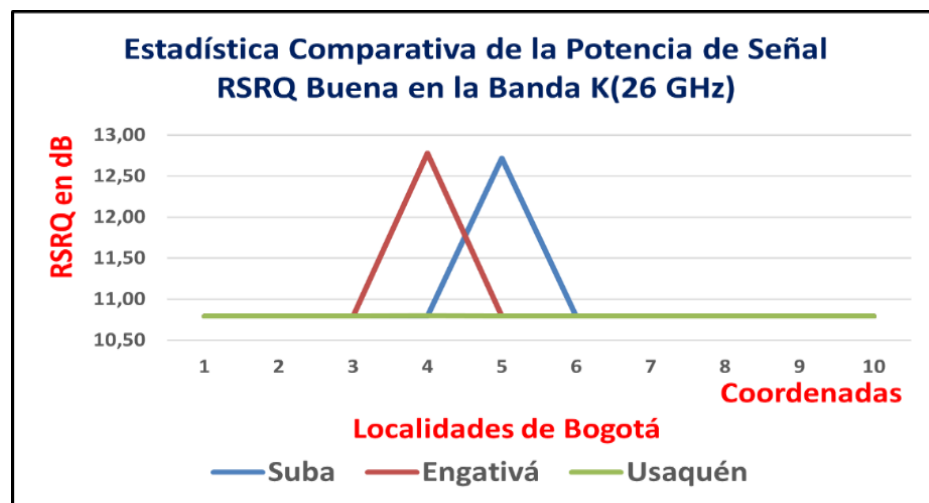
**Señal SS-RSRQ Buena.** La tabla 87, muestra la variación de la calidad de señal RSRQ de las tres (3) localidades. Se observa que el grado de dispersión es muy bajo, siendo constante la calidad de la señal RSRQ en las tres localidades a excepción de los puntos aleatorios 4 y 5 de las localidades de Engativá y Usaquén respectivamente, donde se disminuye la calidad de la señal a causa de que estos puntos se encuentran más alejados de las antenas. Es importante resaltar en este punto, también la presencia de dos (2) picos de mejor señal RSRQ en los puntos de coordenadas 4 y 6 de las localidades de Suba y Engativá respectivamente, lo que significa la ocurrencia de menores fenómenos de interferencias y condiciones atmosféricas.

**Tabla 87***Comparativo de Señales SS-RSRQ Buena*

Señal RSRQ (dB) Buena. Banda 26 GHz			
	Suba	Engativá	Usaquén
Promedio (dB)	-10,98	-10,99	-10,79
Desviación Estándar	0,61	0,63	0,00

*Nota.* En la tabla se registran los valores promedio y desviación estándar en la banda K de la señal RSRQ de nivel “Buena” en las 3 localidades. Elaboración propia.

En la figura 88, se muestran las curvas de comparación relativas de la señal con buena calidad.

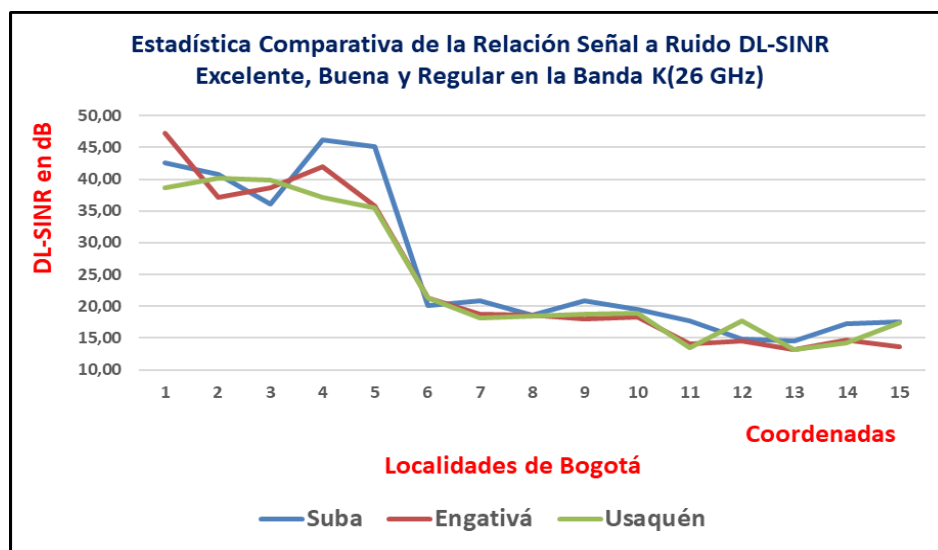
**Figura 88***Comparativo de Señales RSRQ Buena*

*Nota.* La gráfica señala el comportamiento comparativo en la banda K de la señal RSRQ de nivel “Buena” en las 3 localidades. Elaboración propia.

**Señal Downlink DL-SINR.** En la figura 89, se aprecia el comportamiento de los quince (15) puntos aleatorios seleccionados para la medición de la relación señal a ruido del enlace downlink DL-SINR en las tres (3) localidades. En el análisis, se evidenció una excelente calidad de la señal con escaso ruido a lo largo de los puntos del 1 al 5. Luego, una calidad de señal regular entre los puntos del 1 al 6 y finalmente, un nivel regular de calidad de la señal en la trayectoria de los puntos del 6 al 15, donde la señal del enlace downlink DL-SINR es afectada por mayor ruido e interferencias propios del medio ambiente en los sectores.

**Figura 89**

*Comparativo de Señales downlink DL-SINR*



*Nota.* En la gráfica se aprecia el comportamiento comparativo en la banda K del enlace downlink DL-SINR en las categorías “Excelente”, “Buena” y “Regular” para las 3 localidades.

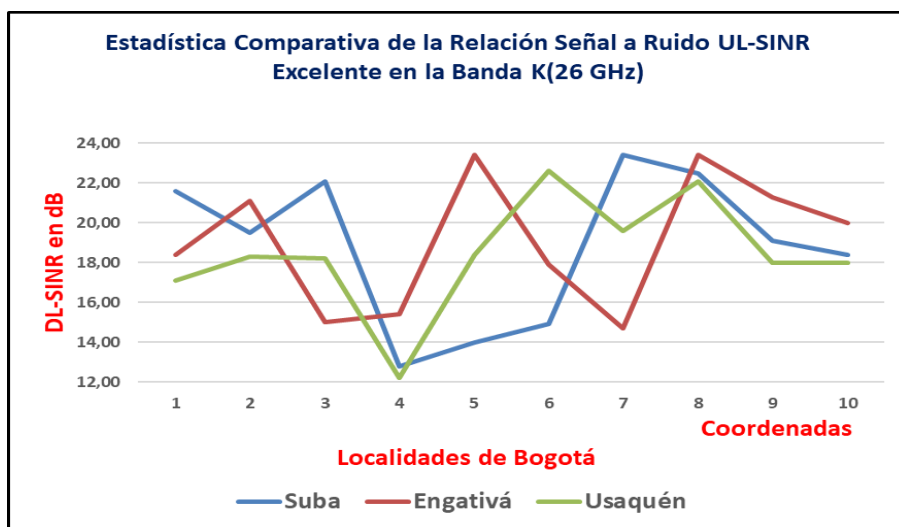
Elaboración propia.

**Señal Uplink UL-SINR.** En este caso se aprecia en la figura 90, la señal uplink UL-SINR, correspondiente a una relación señal a ruido con categorías de totalmente “Excelente” en el rango

apropiado de 12 a 24 dB para las tres (3) localidades. Este nivel de excelencia denota la presencia de una eficiente señal uplink UL-SINR, con afectación de muy escaso ruido en todos los sectores de las localidades.

### Figura 90

#### Comparativo de Señales Uplink UL-SINR



*Nota.* En esta gráfica se evidencia el comportamiento comparativo en la banda K del enlace uplink UL-SINR en las categorías “Excelente” para las 3 localidades. Elaboración propia.

#### Comparativo de Resultados de Capacidad entre las Bandas C (3.5 GHz) y K (26 GHz)

En las tablas 88 y 89 se relacionan los datos de los informes y gráficas de Throughput de cobertura multitransmisor generados por el software Xirio Online en la simulación de la red 5G NR en las localidades de Suba, Engativá y Usaquén.

**Tabla 88**

*Resultados de Capacidad Obtenidos en la Banda C (3.5 GHz)*

		%	BW DL	BW UL	WB DL	WB UL	ThP DL	ThP UL
	Número	Carga	Max.	Max.	Gar.	Gar.	Max.	Max.
Localidad	Usuarios	Tráfico	KHz	KHz	KHz	KHz	kbps	kbps
Suba	939.506	100,0	3.427	1.054	4.576	8.440	15.078	2.019
Engativá	611.444	100,0	3.427	1.054	3.474	6.666	15.078	2.019
Usaquén	376.501	75,0	3.427	1.054	2.567	4.778	15.078	2.019

*Nota.* La tabla registra el comparativo de datos del informe y gráficas de Throughput en la Banda C para las 3 localidades. Elaboración propia.

**Tabla 89**

*Resultados de Capacidad Obtenidos en la Banda K (26 GHz)*

			BW DL	BW UL	WB DL	WB UL	ThP DL	ThP UL
	Número	% Carga	Max.	Max.	Gar.	Gar.	Max.	Max.
Localidad	Usuarios	Tráfico Est	KHz	KHz	KHz	KHz	kbps	kbps
Suba	939.506	19,7	33.580	11.193	6.406	8.362	147.750	22.386
Engativá	611.444	14,4	36.378	11.193	5.211	7.779	160.063	22.386
Usaquén	376.501	11,8	36.378	11.193	4.278	6.360	160.063	22.386

*Nota.* La tabla muestra el comparativo de datos del informe y gráficas de Throughput en la Banda K para las 3 localidades. Elaboración propia.

Con los datos de las tablas anteriores se realizó un análisis comparativo referente a capacidad de atención a usuarios, carga de tráfico, fuerza y velocidad de señales downlink y uplink, cuyos resultados se muestran en las siguientes gráficas:

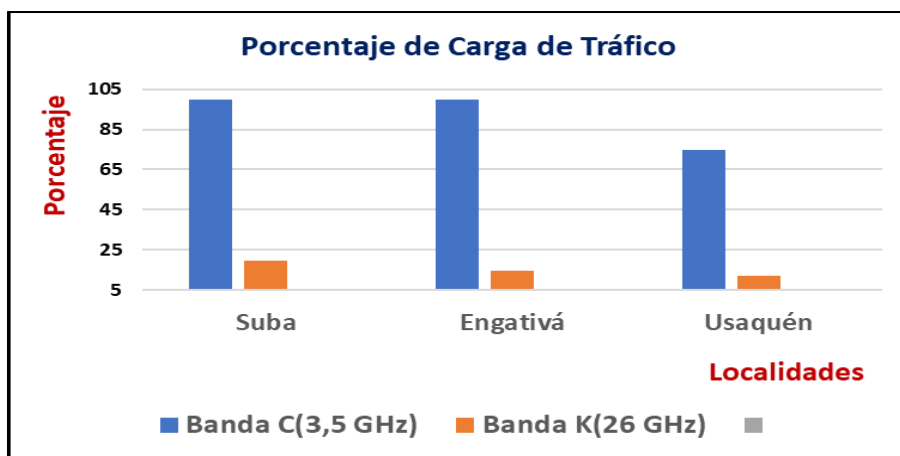
### ***Carga de Tráfico Estimada***

La carga de tráfico es el parámetro que establece el porcentaje utilizado del total de recursos disponibles (Transmisores, energía, etc.) de la red en cada uno de los emplazamientos.

En la figura 91, la simulación con Xirio Online arrojó que en la banda C (3.5 GHz) las localidades de Suba y Engativá consumen mayor cantidad de recursos equivalente al 100% y un porcentaje menor de uso de recursos en la localidad de Usaquén, equivalente al 75%. Mientras, que en la banda K (26 GHz) el porcentaje de consumo de recursos fueron bastante menores, en el orden del 19,7% para Suba, 14,4% para Engativá y del 11,8% para Usaquén.

### **Figura 91**

#### *Porcentaje de Carga de Tráfico*



*Nota.* En la gráfica se muestra la comparación en las bandas C y K del porcentaje de carga de tráfico en las 3 localidades. Elaboración propia.

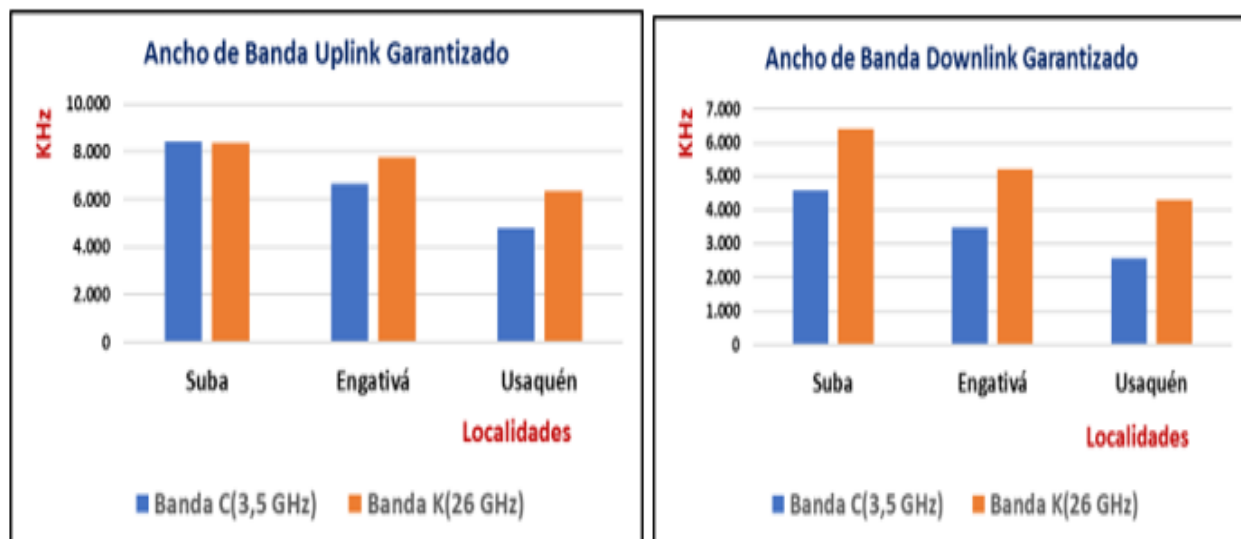
### *Ancho de Banda Garantizado*

Este ancho de banda garantizado se refiere al conjunto de recursos y servicios mínimos que ofrece el sistema de red para transmitir datos tanto para el enlace downlink, como para el enlace uplink. En la figura 92, se observa el comportamiento comparativo del ancho de banda garantizado entre localidades y banda de frecuencias C y K.

El resultado evidenció que en las tres(3) localidades y en las dos (2) bandas C y K se requiere mayor ancho de banda garantizado para el enlace uplink, debido a la necesidad de más potencia y fuerza en la señal para el adecuado tráfico de datos entre la terminal de usuario (UE) y la antena en la estación (BS), mientras que en el enlace downlink el ancho de banda garantizado es menor, en razón a menor potencia y fuerza de señal para la transmisión de datos entre la antena (BS) y la terminal de usuario (UE).

**Figura 92**

#### *Ancho de Banda Downlink y Uplink Garantizado*



*Nota.* En esta gráfica se evidencia el comportamiento comparativo en las bandas C y K de los anchos de banda downlink y uplink garantizado en las 3 localidades. Elaboración propia.

### *Ancho de Banda Máximo y Throughput Máximo del Enlace Downlink*

Este ancho de banda hace referencia a la capacidad máxima de transmisión de datos que pueden soportar los transmisores instalados y el throughput se refiere a la velocidad de los datos en el proceso de transmisión.

En la figura 93, se observa que el ancho de banda máximo en el enlace downlink es menor en la banda C y significativamente mayor en la banda K, debido a que en la banda K las ondas radiales son de mayor frecuencia y menor longitud de onda, lo cual garantiza mayor capacidad y velocidad de tráfico de datos. Así mismo, el ancho de banda va de la mano con el throughput, por consiguiente, se evidencia que los valores de ancho de banda y throughput son más o menos iguales y correspondientes para el proceso downlink en ambas bandas C y K.

**Figura 93**

### *Ancho de Banda Máximo y Throughput del Enlace Downlink*



*Nota.* La gráfica registra el comportamiento comparativo en las bandas C y K del ancho de banda y throughput downlink máximo en las 3 localidades. Elaboración propia.

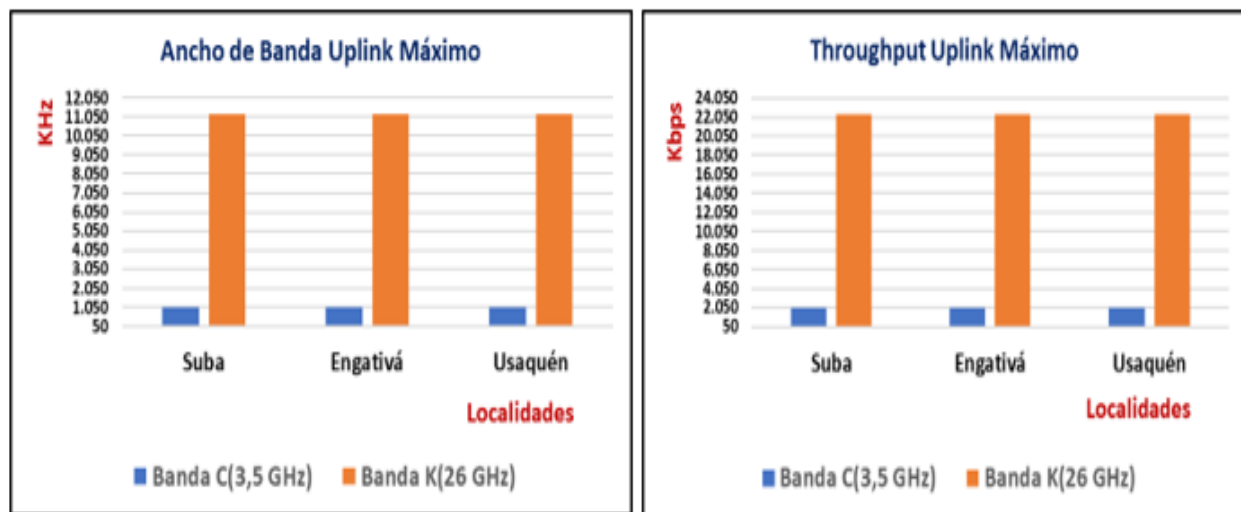
### *Ancho de Banda Máximo y Throughput Máximo del Enlace Uplink*

En la figura 94, se observa un similar comportamiento con la imagen anterior, ya que se presentan valores iguales y correspondientes de ancho de banda máximo y throughput máximo para el proceso uplink, tanto a nivel de localidades como a nivel de las bandas C y K.

Lo anterior demuestra, que la simulación con Xirio online arrojó indicadores y parámetros acertados para el adecuado funcionamiento de la red 5G NR en las dos (2) bandas de frecuencias seleccionadas C (3.5 GHz) y K (26 GHz).

**Figura 94**

#### *Ancho de Banda Máximo del Enlace Uplink*



*Nota.* La gráfica evidencia el comportamiento comparativo en las bandas C y K del ancho de banda y throughput uplink máximo en las 3 localidades. Elaboración propia.

## Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones principales obtenidas en el desarrollo del presente trabajo de grado.

La planeación y diseño de los escenarios de prueba para la simulación de una red de comunicaciones móviles, es el fundamento para la realización de un estudio técnico de implementación de una red de telefonía móvil celular. Asimismo, es importante documentar la estructura del estándar 5G NR, definir los indicadores KPI de desempeño, establecer la configuración de equipos transmisores de radio y terminales de usuario UE, e igualmente la caracterización de las bandas de frecuencias C (3.5 GHz) y K (26 GHz). Teniendo en cuenta los elementos anteriores, se pudo realizar paso a paso las simulaciones que dieron como resultado la estimación de la cobertura multitransmisor de la red móvil 5G NR de las tres (3) localidades de la ciudad de Bogotá.

Los indicadores de desempeño KPI (Key Performance Indicator) son importantes e indispensables en la planificación de redes 5G NR y simulación, ya que permitieron obtener una fotografía de la capacidad de cobertura radioeléctrica, la calidad de la señal radioeléctrica, la velocidad de transmisión de paquetes de datos y la afectación de ruidos e interferencias en los canales de comunicación downlink y uplink de las bandas de frecuencias C (3.5 GHz) y K (26 GHz).

Con el uso de las nuevas bandas de frecuencias C (3.5 MHz) y K (26 GHz) acogidas en este proyecto y el estudio técnico desarrollado para la planificación e implementación de redes 5G NR en las tres (3) localidades de Bogotá, se proporciona una herramienta de consulta a los operadores de telefonía móvil, una vez sean subastadas y asignadas las bandas de frecuencias para la implementación de la tecnología 5G en el país, teniendo en cuenta los procesos de

análisis y evaluación de resultados comparativos obtenidos en la simulación de redes 5G NR entre localidades y bandas de frecuencias C y K.

En los procesos de simulación de las redes 5G NR realizados con la herramienta Xirio Online, se logró obtener aproximadamente el 95% de cobertura radioeléctrica multitransmisor con niveles de “Excelente” y “Buena” en las bandas de frecuencias C y K de cada una de las tres (3) localidades. Este resultado permitió evidenciar la adecuada selección de emplazamientos, cantidad de antenas y ubicación de equipos transmisores RAN (Radio Access Network) necesarios para el cubrimiento apropiado de redes 5G NR en las localidades de Suba, Engativá y Usaquén de la ciudad de Bogotá.

Los parámetros de configuración de equipos RAN, antenas y terminales de usuario UE, se identificaron y registraron en la aplicación Xirio Online de conformidad con las características y especificaciones técnicas de los fabricantes. Lo anterior, permitió generar los informes y gráficas de resultados de cobertura multitransmisor, interferencias y capacidad de la red 5G NR, los cuales servirán de base o ayuda para los operadores en la identificación, ubicación y caracterización de emplazamientos para el despliegue de redes futuras de telefonía celular.

Mediante el estudio y análisis de infraestructura para redes de telefonía celular, se pudo determinar que para poder desplegar una red 5G NR con excelentes prestaciones, el sistema de antenas juega un papel importante, por lo que fue necesario recurrir a arreglos de antenas MIMO 4X4 compatibles con los equipos RAN, los cuales son indicados para zonas urbanas con población densa y proyectos expansivos de nuevos servicios con uso de banda ancha móvil.

El despliegue de esta red 5G NR, aplicado a los escenarios de prueba, permitió realizar los estudios de cobertura multitransmisor, cálculos de interferencia y cálculos de capacidad con el software Xirio Online, que arrojaron varios indicadores del estado de señal radioeléctrica,

entre ellos: El RSRP, que cuantifica la potencia, el RSSQ que mide la calidad y el SINR que valora la relación señal a ruido, cuyos datos fueron analizados y comparado su comportamiento de despliegue de señales radioeléctricas simuladas en las bandas C y K. Con los resultados positivos obtenidos en las mediciones, se pudo confirmar que la selección y configuración de equipos y antenas fue acertada para la simulación de la red 5G NR en las bandas C (3.5 GHz y K (26 Ghz), posibilitando la conectividad de todo tipo de dispositivos inteligentes (IoT, Big Data, robots, routers 5G, etc.), además de los equipos normales de transmisión y recepción de telefonía móvil.

Finalmente, los procesos de simulación y resultados comparativos, permitió evidenciar características y cualidades diferenciadoras entre las bandas de frecuencias C (3.5 GHz) y K (26 GHz) que pueden incidir de alguna manera en el funcionamiento de la red 5G NR. Entre estas tenemos que, que la banda C por su óptima relación de alcance/cobertura y capa/velocidad es más orientada a servicios de usuario en comunicaciones móviles, consumo de video, etc. Mientras que la banda K, por su condición de trabajo con ondas milimétricas y más ancho de banda permite mayores capacidades y velocidades para usos robustos empresariales de robótica industrial, realidad virtual, inteligencia artificial, entre otras tecnologías emergentes.

### Referencias Bibliográficas

- Adamowicz, A. (2023). *GSMA / 5G Non-Stand Alone vs. 5G Stand Alone: Esta es la diferencia*.  
<https://www.gsma.com/latinamerica/es/5g-non-stand-alone-vs-5g-stand-alone-esta-es-la-diferencia/>
- Alcaldía Bogotá. (2023). *Localidad de Engativá | Bogota.gov.co*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/engativa>
- Alcaldía de Bogotá. (2019). *Legalización de antenas de telefonía celular en Bogotá | Bogota.gov.co*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/planeacion/legalizacion-de-antenas-de-telefonía-celular-en-bogota>
- Alcaldía local de Usaquén. (2010). *Mapa Localidad 1 USAQUEN*.  
<https://usaquen1.wordpress.com/2010/11/14/9/>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2019). *Antenas para el desarrollo - Estrategia*.  
<https://www.sdp.gov.co/micrositios/antenas-estaciones-radioelectricas/estrategia.html>
- Alonso Martínez, R. (2018). *ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN PROYECTO FIN DE GRADO* [Escuela Técnica superior de ingeniería y sistemas de telecomunicación].  
[https://oa.upm.es/52780/1/TFG\\_RICARDO\\_ALONSO\\_MARTINEZ.pdf](https://oa.upm.es/52780/1/TFG_RICARDO_ALONSO_MARTINEZ.pdf)
- Álvarez Madera, N, & Loaiza Torres, J. A. (2017). *Uso del espectro radioeléctrico en redes móviles 5G*. <https://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/942>
- America Digital. (2021). *Conoce el primer Estándar mundial de Comunicaciones Autónomas para redes 5G - News America Digital*. <https://news.america-digital.com/primer-estandar-mundial-redes-5g/>
- Anktion Tech. (2023). *5G BBU - Desarrollado por EmpireCMS*.

<http://www.0746law.com/851.html>

- Apple. (2023). *Apple iPhone 13 A2482, A2631, A2633, A2634, A2635 Datos técnicos del móvil* :: GSMchoice.com. <https://www.gsmchoice.com/es/catalogo/apple/iphone13/>
- Arreola-Rosales, J. (2019). *¿Qué es la 5G y qué beneficios traerá al mundo?* | Foro Económico Mundial. <https://es.weforum.org/agenda/2019/08/que-es-la-5g-y-que-beneficios-traera-al-mundo>
- Artiles Brito, J. F. (2018). *Tendencias actuales de las comunicaciones satelitales y su importancia en las redes móviles de 5ta generación (5G)*.
- Barragán Martínez, X. (2021). *Las Redes 5G - CEABAD*. <https://ceabad.com/2021/04/16/las-redes-5g/>
- Branch. (2021). *¿Cómo fue la situación digital de Colombia durante 2020 y 2021?* <https://branch.com.co/marketing-digital/estadisticas-de-la-situacion-digital-de-colombia-en-el-2020-2021/>
- Buitrago, J. D. (2018). *Crecimiento de población en Bogotá - Bogotá - ELTIEMPO.COM*. <https://www.eltiempo.com/bogota/crecimiento-de-poblacion-en-bogota-237688>
- CableFree.RSRP. (2020). *LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement - CableFree*. <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsrq-measurement-lte/>
- CableFree. (2020). *5G Frequency Bands & Spectrum Allocations - CableFree*. <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/5g-frequency-bands-lte/>
- CableFree Wireless Technology. (2020). *LTE RSRQ to SINR - CableFree*. <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-rsrq-sinr/>
- Castro Sánchez, D. (2021). *Diseño de una red de acceso radio 5G (RAN-5G) aplicado a la zona portuaria de Valencia*.

- Comercio, S. de I. y. (2022). *Infraestructura de Telecomunicaciones Móviles en Colombia: Evidencia para el periodo 2015 - 2020*.  
[https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/042022/ES-Infraestructura-de-Telecomunicaciones-Moviles-en-Colombia\\_VF\\_Publica.pdf](https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/042022/ES-Infraestructura-de-Telecomunicaciones-Moviles-en-Colombia_VF_Publica.pdf)
- Cortés, J. (2019). *Legalización de antenas de telefonía celular en Bogotá* | *Bogota.gov.co*.  
<https://bogota.gov.co/mi-ciudad/planeacion/legalizacion-de-antenas-de-telefonía-celular-en-bogota>
- Cuba Zúñiga, D. J. (2018). (PDF) *Arquitectura C-RAN basada en SDN para redes móviles 5G*.  
[https://www.researchgate.net/publication/326391440\\_Arquitectura\\_C-RAN\\_basada\\_en\\_SDN\\_para\\_redes\\_moviles\\_5G](https://www.researchgate.net/publication/326391440_Arquitectura_C-RAN_basada_en_SDN_para_redes_moviles_5G)
- David Gonzalez-Franco, J., Calderón, C. A., & Preciado, J. E. (2020). *Propuesta de un sistema clasificador de servicios para la gestión de redes 5G con la utilización de aprendizaje automático*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21765.68326>
- David Rodríguez, J., Carlos Bautista, J., & Sotomonte, L. (2019). Xirio: Herramienta para la planeación de redes de comunicaciones móviles celulares. *Repository.Udistrital.Edu.Co*.  
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13741>
- De la Hoz, N. (2021). *El déficit de inversiones que impide superar la brecha digital es de \$2,1 billones*. El Déficit de Inversiones Que Impide Superar La Brecha Digital Es de \$2,1 Billones. <https://www.larepublica.co/empresas/el-deficit-de-inversiones-que-impide-superar-la-brecha-digital-es-de-21-billones-3263690>
- DEB.Suba. (2019). *La localidad de Suba concentra la mayor población, con más de 1,2 millones de personas* | *Observatorio de Desarrollo Económico*.  
<https://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/dinamica-economica/la-localidad-de->

suba-concentra-la-mayor-poblacion-con-mas-de-12-millones-de

Deloitte. (2020). *Next-gen radio access networks | Deloitte Insights*.

<https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2021/radio-access-networks.html>

Electronics, A. (2020). *Los desafíos para cumplir con los indicadores clave de desempeño del*

*5G: backhaul del 5G | Arrow.com*. Los Desafíos Para Cumplir Con Los Indicadores Clave de Desempeño Del 5G: Backhaul Del 5G | Arrow.Com.

<https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/the-challenges-in-meeting-5g-key-performance-indicators>

ELTiempo. (2018). *Crecimiento de población en Bogotá - Bogotá - ELTIEMPO.COM*.

Crecimiento Poblacional, ¿riesgo Para La Calidad de Vida? / Opinión.

<https://www.eltiempo.com/bogota/crecimiento-de-poblacion-en-bogota-237688>

Enacom. (2021). *¿Qué son las interferencias? - ENACOM*. [https://www.enacom.gob.ar/-que-son-las-interferencias-\\_p376](https://www.enacom.gob.ar/-que-son-las-interferencias-_p376)

Engativá. (2023). *Localidad de Engativá | Bogota.gov.co*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/engativa>

ENTER.CO. (2017). *Este es el plan para mejorar las comunicaciones en Bogotá • ENTER.CO*.

<https://www.enter.co/especiales/colombia-conectada/plan-mejorar-comunicaciones-bogota/>

FCC. (2020). *Auction 107: 3.7 GHz Service | Federal Communications Commission*.

<https://www.fcc.gov/auction/107/factsheet>

FEMP. (n.d.). *Potencia emitida por un teléfono móvil*. <http://femp.femp.es/files/3580-576-fichero/P.21.pdf>

- Fernández Santana, R. (2020). *Planificación Doble simulación de exposición radioeléctrica y simulación de cobertura 5G mediante el software XIRIO online en Puerto del Rosario*. [Universitat Oberta de Catalunya (España)].  
<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/127058/6/rfernandezs1985TFM0121.pdf>
- Fitzgibbons, L. (2023). *¿Qué es una unidad de banda base (BBU)? - Definición de WhatIs.com*.  
<https://www.techtarget.com/whatis/definition/baseband-unit-BBU>
- Frackiewicz, M. (2023). *Relación señal-interferencia-más-ruido (SINR)*.  
<https://ts2.space/es/relacion-senal-interferencia-mas-ruido-sinr/>
- García, V. (2020). *Banda C será vital para 5G, pero sigue la discordia con la industria satelital / DPL News*. <https://dplnews.com/banda-c-sera-vital-para-5g-pero-sigue-la-discordia-con-la-industria-satelital/>
- GL Communications. (2022). *Soluciones de prueba de red 5G New Radio (NR) y 5G Core (5GC)*.  
<https://www.gl.com/5G-NR-Core-network-test-measurement-solution.html>
- Gómez Liberal, C. (2021). *Repositori Institucional (O2): Redes Móviles 5G: evolución new radio*. <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/126666?mode=full>
- Guevara Córdoba, F. A. (2019). *Comparativo entre la tecnología de redes 4G y 5G y los beneficios de su implementación en Colombia*.  
<https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/189>
- HBR Radiofrequency., T. (2022). *n258 (26 GHz) - Radiofrecuencia HB*.  
<https://halberdbastion.com/technology/cellular/5g-nr/5g-frequency-bands/n258-26-ghz>
- HBR Radiofrequency Technologies. (2022). *n78 (3500 MHz) - HB Radiofrequency*.  
<https://halberdbastion.com/technology/cellular/5g-nr/5g-frequency-bands/n78-3500-mhz>

Hospital Engativá. (2014). *Mapa Diagnóstico Localidad Engativá*.

[http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Diagnosticos distritales y locales/Local/2014/10\\_Diagnostico\\_Local\\_2014\\_Engativá\\_12abr\\_2016.pdf](http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Diagnosticos%20distritales%20y%20locales/Local/2014/10_Diagnostico_Local_2014_Engativá_12abr_2016.pdf)

Huawei. (2023). *HUAWEI 5G CPE Pro 2 Specifications - HUAWEI Global*.

<https://consumer.huawei.com/en/routers/5g-cpe-pro-2/specs/>

Huo, Y., Dong, X., & Xu, W. (2017). 5G cellular user equipment: From theory to practical hardware design. *IEEE Access*, 5, 13992–14010.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2727550>

Hurtado Cortés, J. C. (2019). *Análisis de la tecnología massive mimo para las redes móviles 5g en Colombia*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/16530?show=full>

IntraconTelecom. (2023). *INTRACOM TELECOM* :: <https://www.intracom-telecom.com/>

Jordán, E. (2021). *Divisiones funcionales de Open RAN – Explicación – TeleSemana.com*.

<https://www.telesemana.com/blog/2021/04/13/divisiones-funcionales-de-open-ran-explicacion/>

La República. (2021). *El déficit de inversiones que impide superar la brecha digital es de \$2,1 billones*. <https://www.larepublica.co/empresas/el-deficit-de-inversiones-que-impide-superar-la-brecha-digital-es-de-21-billones-3263690>

LaNetaNeta. (2022). *Banda C 5G: ¿Qué es y por qué es importante? - La Neta Neta*.

<https://lanetaneta.com/banda-c-5g-que-es-y-por-que-es-importante/>

López, J. F. (2020). *Desviación estándar o típica | 2023 | Economipedia*.

<https://economipedia.com/definiciones/desviacion-tipica.html>

Martins, J. (2022). *¿Qué es el Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA)? • Asana*.

<https://asana.com/es/resources/pdca-cycle>

- MaxComm. (2023). *MaxComm 5G Outdoor CPE OWR-203*. <https://es.4gltecpe.com/maxcomm-5g-outdoor-cpe-owr-203-owr-203.html>
- Medina, M. (2022). *¿Qué es Banda Ancha y para qué sirve? - NetService IT Solutions*. Qué Es Banda Ancha? <https://www.netserviceits.com/que-es-banda-ancha-y-para-que-sirve/>
- Microsoft. (2023). *Calcular el promedio de un grupo de números - Soporte técnico de Microsoft*. <https://support.microsoft.com/es-es/office/calcular-el-promedio-de-un-grupo-de-números-e158ef61-421c-4839-8290-34d7b1e68283>
- MinTic. (2019). *Plan 5G Colombia El Futuro Digital es de Todos mintic - Buscar con Google*. [https://www.google.com/search?q=Plan+5G+Colombia+El+Futuro+Digital+es+de+Todos+mintic&rlz=1C1ALOY\\_esCO1040CO1040&oq=Plan+5G+Colombia+El+Futuro+Digital+es+de+Todos+mintic&aqs=chrome..69i57j0i30i546i625l2j0i546j0i30i546.5788j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Plan+5G+Colombia+El+Futuro+Digital+es+de+Todos+mintic&rlz=1C1ALOY_esCO1040CO1040&oq=Plan+5G+Colombia+El+Futuro+Digital+es+de+Todos+mintic&aqs=chrome..69i57j0i30i546i625l2j0i546j0i30i546.5788j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- MinTic. (2021). *Operadores solucionaron 109 reportes de fallas menores de telefonía e internet fijo y móvil en el país*. <https://mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/175757:Operadores-solucionaron-109-reportes-de-fallas-menores-de-telefonía-e-internet-fijo-y-móvil-en-el-país>
- Molina, J. A. (2021). (1) *¿Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz? - Quora*. <https://es.quora.com/Las-ondas-de-radio-viajan-a-la-velocidad-de-la-luz>
- Navarro, E. (2019). *¿Cuál es la clave para el éxito de 5G? El core, obviamente. | DPL News*. <https://dplnews.com/cual-es-la-clave-para-el-exito-de-5g-el-core-obviamente/>
- NetSpot. (2023). *RSSI: Cómo comprobar el valor RSSI con NetSpot*. <https://www.netspotapp.com/es/wifi-signal-strength/what-is-rssi-level.html>
- Nuñez, V. (2022). *Indicadores KPI: Qué son, cuántos tipos existen y recomendaciones. ¿Qué*

- Son Los Indicadores KPI y Qué Tipos Existen? <https://vilmanunez.com/indicadores-kpi/>
- Nybsys.About-us. (2023). *About Us NYBSYS*. <https://nybsys.com/about-us/>
- Nybsys. (2023). *5G RU (Unidad de radio) - NYBSYS*. <https://nybsys.com/wireless/5g/ran/radio-unit/>
- Observatorio TIC. (2021). *Así se mueve el mercado de la portabilidad móvil en Colombia - 360 Radio*. <https://360radio.com.co/mercado-de-la-portabilidad-movil-en-colombia/>
- Onda 5GMM. (2020). *5G mmWave Band n258 (26 GHz) - 5gmmwave*. <https://www.5gmmwave.com/5g-mmwave-frequency-bands/5g-mmwave-band-n258-26-ghz/>
- Pérez, C. A. (2021). *Análisis comparativo entre un Drive Test RF realizado con el modelo tradicional y un Drive Test utilizando un Dron Phantom como vehículo*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28820>
- Pérez Murillo, O. (2021). *Estudio de cobertura de la tecnología 5G para las zonas metropolitanas de la ciudad de Bogotá D.C.* <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80441>
- Pertiñez López, I. J. (2015). *Dimensionamiento y planificación radioeléctrica de un sistema de comunicaciones móviles de cuarta generación, denominado como LTE (Long Term Evolution)* [Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla (España)]. [https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12312/fichero/%23PFC\\_+Planificaci%C3%B3n+Radioel%C3%A9ctrica+de+una+red+de+comunicaciones+m%C3%B3viles+LTE+en+Sevilla+con+Xirio+Online.pdf](https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12312/fichero/%23PFC_+Planificaci%C3%B3n+Radioel%C3%A9ctrica+de+una+red+de+comunicaciones+m%C3%B3viles+LTE+en+Sevilla+con+Xirio+Online.pdf)
- Pinterest. (2023). *Mapa localidad de Suba*. <https://co.pinterest.com/pin/607423068489743069/>
- Puerto Suárez, L. L. (2017). *Estudio de prospectiva en el uso de la tecnología 5g en Colombia al*

2025. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9217?show=full>
- Quilaguy Beltrán, Ó. L. (2020). *Términos de referencia para la migración de LTE a 5G en Colombia* - hdl:11349/25253. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25253>
- RedHat. (2021). *¿Qué significa 5G? ¿Qué Significa 5G?* <https://www.redhat.com/es/topics/5g-networks/what-is-5g>
- RedHat. (2022). *¿Qué es el Internet de las cosas? ¿Qué Es El Internet de Las Cosas (IoT)?* <https://www.redhat.com/es/topics/internet-of-things/what-is-iot>
- ResearchGate. (2020). *2. Les principales caractéristiques des IMT-2020 par... | Download Scientific Diagram*. [https://www.researchgate.net/figure/Les-principales-caracteristiques-des-IMT-2020-par-rapport-rapport-rapporta-celles-des\\_fig2\\_351690356](https://www.researchgate.net/figure/Les-principales-caracteristiques-des-IMT-2020-par-rapport-rapport-rapporta-celles-des_fig2_351690356)
- Revista Semana. (2022a). *¿Cómo avanza la expansión en telecomunicaciones?* <https://www.semana.com/empresas/articulo/como-avanza-la-expansion-en-telecomunicaciones/303557/>
- Revista Semana. (2022b). *Cobertura y acceso, la apuesta de Claro Colombia*. <https://www.semana.com/hablan-las-marcas/articulo/cobertura-y-acceso-la-apuesta-de-claro-colombia/202229/>
- Rodhe&Schwarz. (2022). *Medir el caudal de datos con el CMX500 | Rohde & Schwarz*. [https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/medir-el-caudal-de-datos-con-el-cmx500-nota-de-aplicacion\\_56280-1238594.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/medir-el-caudal-de-datos-con-el-cmx500-nota-de-aplicacion_56280-1238594.html)
- Rodríguez Juan Pablo y Peña Francisco. (2018). *Detección de Fallas que Afectan el Desempeño de la Red Móvil en la Zona de la 93 Mediante el Análisis de KPI\**. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13739/RodriguezPreciadoJuanPablo2018%20PeñaBelalcazarManuelFrancisco2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rojas Valderrama, Ligia, C. Mi. (2022). *Desarrollo de 5G en Colombia*.

[https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-236811\\_documento\\_soporte\\_consulta\\_publica\\_desarrollo\\_5g\\_colombia.pdf](https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-236811_documento_soporte_consulta_publica_desarrollo_5g_colombia.pdf)

Román, E. (2015). *Telefonía móvil para todos los públicos / El Cajón Desastre de Eu Román*.

<https://eugenioroman.wordpress.com/2015/01/25/moviles/>

Rouse, M. (2020). *RAN. Red de Acceso de Radio o RAN*.

<https://www.computerweekly.com/es/definicion/Red-de-Acceso-de-Radio-o-RAN>

Schwarz, R. &. (2022). *Coexistencia de servicios 5G y satelitales en la banda C / Rohde &*

*Schwarz*. [https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/coexistencia-de-servicios-5g-y-satelitales-en-la-banda-c-ficha-de-aplicacion\\_56279-620189.html](https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/coexistencia-de-servicios-5g-y-satelitales-en-la-banda-c-ficha-de-aplicacion_56279-620189.html)

Secretaría de Desarrollo Económico Bogotá. (2015). *Tecnologías de la Información y la Comunicación: un análisis regional / Observatorio de Desarrollo Económico*.

<https://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/competitividad/tecnologias-de-la-informacion-y-la-comunicacion-un-analisis-regional>

SmartPrix. (2023). *Precio de Poco X4 Pro 5G en India 2023, especificaciones completas y revisión / precio inteligente*. <https://www.smartprix.com/mobiles/poco-x4-pro-ppd1d708v5c2>

Superintendencia\_Industria \_ Comercio. (2020). *Infraestructura de telecomunicaciones móviles en Colombia*. [https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/042022/ES-Infraestructura-de-Telecomunicaciones-Moviles-en-Colombia\\_VF\\_Publica.pdf](https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/042022/ES-Infraestructura-de-Telecomunicaciones-Moviles-en-Colombia_VF_Publica.pdf)

Valora Analitik. (2021). *Los planes de Telefónica Movistar Colombia para competir en el país*. <https://www.valoraanalitik.com/2021/03/09/planes-de-telefonica-movistar-colombia-para-competir-en-el-pais/>

Winncom Technologies Corp. (2022). *Sistemas Punto-a-Multipoint Con Licencia, WiBAS G5*

*Connect+ Full Outdoor PtMP Terminal Station Radio, 24.25-26.5GHz, HFDD/TDD, GbE, Automatic Polarization, Enhanced, WG5-CONN-E-PLUS-24-26.*

<https://www.winncom.com/es/products/WG5-CONN-E-PLUS-24-26>

WON. (2022). *WOM cumple su primer año de operación en Colombia*

<https://www.wom.co/noticias/wom-cumple-primer-ano-operacion-colombia>

Xataka. (2022). *Nuevo Motorola Edge 30, ficha técnica con características y precio.*

<https://www.xataka.com/moviles/motorola-edge-30-caracteristicas-precio-ficha-tecnica>

Xirio. (2023). *Manual XIRIO*. <https://www.xirio-online.com/web/help/es/index.htm?rx.htm>

Xirio Online. (2023). *Bienvenido a XIRIO ONLINE*. [https://www.xirio-](https://www.xirio-online.com/web/home/welcome.aspx)

[online.com/web/home/welcome.aspx](https://www.xirio-online.com/web/home/welcome.aspx)

Zyxel.Networks. (2023). *Parámetros de calidad de señal LTE – Zyxel Support Campus EMEA.*

[https://support.zyxel.eu/hc/es/articles/360005188999-Parámetros-de-calidad-de-señal-](https://support.zyxel.eu/hc/es/articles/360005188999-Parámetros-de-calidad-de-señal-LTE)

[LTE](https://support.zyxel.eu/hc/es/articles/360005188999-Parámetros-de-calidad-de-señal-LTE)